



**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH**

Departament d'Enginyeria Mecànica

Tesis doctoral

**Contribución al estudio
de la rugosidad superficial,
obtenida mediante el proceso de
fresado en alta velocidad, en la fase de acabado,
de aceros templados, de moldes y matrices**

Autor: Jose-Antonio Ortiz-Marzo

**Programa de Doctorado
en Ingeniería Mecánica, Fluidos y Aeronautica**

Directora: Irene Buj Corral

Barcelona, septiembre de 2018

**Tesis presentada para obtener el título de Doctor por
la *Universitat Politècnica de Catalunya*.**

RESUMEN.

En la presente tesis se ha estudiado y analizado los factores que influyen en el acabado superficial obtenido mediante fresado de alta velocidad de componentes de moldes y matrices fabricados con aceros templados. Con este estudio se ha determinado el grado de influencia de los diferentes parámetros de mecanizado o variables más significativas sobre la rugosidad superficial y se han obtenido diferentes modelos predictivos del parámetro de rugosidad Ra , en distintas operaciones de mecanizado.

Las principales tecnologías y factores implicados que se han tenido en cuenta en este estudio son: la máquina-herramienta y su control numérico, los materiales de fabricación de los moldes y matrices, los programas de diseño/mechanizado y sus estrategias de mecanizado, las herramientas y sus condiciones de corte, los sistemas de sujeción de pieza y herramienta a la máquina y diferentes sistemas de lubricación. Un mayor conocimiento del proceso implica la reducción de costes de fabricación.

Palabras clave: Acabado Superficial, Aceros Templados, Fresado en Alta Velocidad, Moldes, Matrices, Rugosidad.

RESUM.

A la present tesi s'ha estudiat i analitzat els factors que influeixen en l'acabat superficial obtingut mitjançant fresat d'alta velocitat de components de motlles i matrius fabricats amb acers endurits. Amb aquest estudi s'ha determinat el grau d'influència dels diferents paràmetres de mecanitzat o variables més significatives sobre la rugositat superficial i s'han obtingut diferents models predictius del paràmetre de rugositat Ra , en diferents operacions de mecanitzat.

Les principals tecnologies i factors implicats que s'han tingut en compte en aquest estudi són: la màquina-eina i el seu control numèric, els materials de fabricació dels motlles i matrius, els programes de disseny/mechanitzat i les seves estratègies de mecanitzat, les eines i les seves condicions de tall, els sistemes de subjecció de peça i eina a la màquina i diferents sistemes de lubricació. Un major coneixement del procés implica la reducció de costos de fabricació.

Paraules clau: Acabat Superficial, Acers endurits, Fresatge en Alta Velocitat, Motlles, Matrius, Rugositat.

ABSTRACT.

In this thesis, the factors influencing the surface finish obtained by high speed milling of moulds and dies components made from hardened steels have been studied and analyzed. This study has determined the degree of influence of the different machining parameters or more significant variables on the surface roughness and different predictive models of the roughness parameter Ra have been obtained in different machining operations.

The main technologies and factors involved that have been taken into account in this study are: machine tools and their numerical control, moulds and dies manufacturing materials, design/machining programs and their machining strategies, tools and their cutting conditions, the clamping systems of parts and tools to the machine and different systems of lubrication. A greater knowledge of the process implies the reduction of manufacturing costs.

Keywords: Surface Finish, Hardened Steels, High Speed Milling, Moulds, Dies, Roughness.

PRÓLOGO.

Las razones por las que se ha llevado a cabo esta tesis son variadas y de forma breve se detallarán a continuación. Por una parte, debido a la experiencia laboral previa, dedicada a dar asesoramiento técnico a empresas del sector de fabricación, en concreto en los procesos de mecanizado y tras visitar cientos de empresas y resolver muchos casos concretos (distintas piezas, materiales, operaciones de mecanizado), se ha tenido una visión general de este sector industrial, especialmente localizado en las diferentes comarcas de Cataluña. Por otra parte, una de las necesidades observadas fue mejorar el conocimiento teórico-experimental de los procesos de mecanizado y de paso, la productividad y la sostenibilidad de las empresas del sector de fabricación.

El tema y objetivo de esta tesis se ha centrado en el estudio del acabado superficial obtenido mediante la operación de fresado en alta velocidad, para la fabricación de componentes de moldes y matrices, con aceros templados, que se utilizan habitualmente en los diferentes sectores industriales, principalmente en el sector de la automoción. Éste era un tema novedoso a nivel nacional, por la necesidad del sector de conocimientos específicos y por las experiencias previas desarrolladas. Por este motivo, a nivel práctico en la industria surgían muchas dudas y problemas para su ejecución e implantación de forma fiable y repetitiva.

A partir de un mayor conocimiento de la influencia de los parámetros más importantes y de las limitaciones de las tecnologías implicadas, la empresa, el operario, el usuario podrá tener un mayor conocimiento, un mayor control del proceso de mecanizado, en relación al acabado superficial. Si el programa de control numérico permite incluir el modelo predictivo, tal como esta previsto aplicar en la industria 4.0, se podrán seleccionar las condiciones de corte propias para cada caso concreto (velocidad de corte, avance por diente, profundidad de corte axial, profundidad de corte radial) y obtener una estimación de la rugosidad superficial a replicar en el componente a mecanizar. De esta forma, se realizarán menos pruebas experimentales y será posible reducir el coste de fabricación, el gasto energético y el impacto medioambiental.

Por otra parte la realización de esta tesis ha permitido obtener unos conocimientos teórico-experimentales que se han aplicado en la mejora de la docencia de asignaturas donde se explican los procesos de mecanizado avanzados. También se ha aplicado en la tutorización de diferentes proyectos finales de carrera relacionados con esta temática.

AGRADECIMIENTOS.

A mi directora actual, Dra. Irene Buj, por su apoyo y asesoramiento continuo en la finalización de esta tesis. A mi exdirector, Dr. Joan Vivancos i Calvet, por su apoyo imprescindible, desde el inicio de la tesis.

A los profesores-investigadores Dr. Carmelo L. Perez y Dr. Hernan A. Gonzalez por su ayuda inestimable en los estudios estadísticos presentados en esta tesis. A mis compañeros del laboratorio de tecnología de fabricación de *ETSEIB(UPC)*, Ramón Casado y Alex Domínguez, por su ayuda en la realización de la experimentación y en la obtención de los datos experimentales.

A las siguientes empresas por la colaboración y asesoramiento técnico de su personal:

FUNDACIÓ CIM, FUNDACIÓ ASCAMM (actualmente EURECAT),
UTILTALL, PROTECMO, MOLTER, MOLDES IRVA
ACEROS BOHLER, TRATAMIENTOS TÉRMICOS CARRERAS,
FARRESA ELECTRÓNICA (CNC HEIDENHAIN)

Al ministerio de Educación y Ciencia del Gobierno Central Español, por la ayuda a proyectos de investigación, dentro del Plan Nacional de I+D+I (2000-2003) que ha hecho posible la realización de todos los estudios experimentales de la tesis presentada, con el proyecto: DPI-2003:04727: Modelo predictivo del acabado superficial de moldes y matrices fabricados con aceros mediante fresado a alta velocidad.

Y finalmente a mi familia (Anabel y mis 2 hijas, Esther y Miriam) y mis padres, por su apoyo incondicional y su gran paciencia para poder ver finalizada esta tesis.

Muy agradecido estoy también, a la música de los diversos autores, que siempre me ha acompañado en las incontables horas dedicadas a este trabajo.

En la montaña de Montserrat (Olesa-Barcelona) existe la siguiente inscripción tallada sobre una roca, a tener en cuenta en nuestro quehacer diario:

***“ESFORÇA’T EN EL TEU QUEFER,
COM SI DE CADA DETALL QUE PENSIS
DE CADA PARAULA QUE DIGUIS
DE CADA PEÇA QUE POSIS,
DE CADA COP DE MARTELL QUE DONIS
DEPENGUÉS LA SALVACIÓ DE LA HUMANITAT
PERQUÈ EN DEPEN CREU-HO”
MARAGALL, abril de 1961.***

“Esfuézate en tu trabajo, como si de cada detalle que pienses, de cada palabra que digas, de cada pieza que pongas, de cada golpe de martillo que des, dependiera la salvación de la humanidad, porque depende, créelo”

ÍNDICE.

RESUMEN.....	3
RESUM.	4
ABSTRACT.	5
PRÓLOGO.....	6
AGRADECIMIENTOS.....	7
ÍNDICE.....	9
INDICE DE FIGURAS.....	13
INDICE DE TABLAS.....	19
ACRÓNIMOS.....	21
NOTACIÓN DE VARIABLES.....	23
1. INTRODUCCIÓN.....	27
1.1. Objetivos.	28
1.2. Metodología.....	29
1.3. Medios de investigación.....	30
1.4. Base conceptual de la calidad superficial.....	32
1.5. Herramientas de corte para operaciones de fresado.	42
1.6. Selección de las condiciones de corte	45
1.7. Estimación de la rugosidad en operaciones de fresado	48
1.8. Moldes y matrices.	53
2. ESTADO DEL ARTE.....	61
2.1. Mecanizado en Alta Velocidad.	61
2.2. Modelización del acabado superficial.	66
2.3. Máquina-herramienta.	80
2.4. Controles Numéricos.....	86
2.5. Programas de mecanizado.	91
2.6. Herramientas de corte.....	96
2.6.1. Estudios de desgaste de herramientas de corte.....	102
2.7. Sistemas de fijación de las herramientas.	105
2.8. Sistemas de sujeción de las piezas.....	109
2.9. Materiales de las piezas.....	110
2.10. Sistemas de lubricación.....	115

2.11. Investigación de mercado.....	119
2.12. Estudios de investigación sobre moldes y piezas reales.....	122
3. CONCEPTOS DE ESTADISTICA.....	125
3.1. Variabilidad de la medida.....	125
3.2. Diseño de experimentos estadístico.....	128
4. ESTUDIOS EXPERIMENTALES SOBRE ACEROS DE MOLDES.....	133
4.1. Estudio de la operación de copiado.....	134
4.1.1. Materiales y métodos.....	134
4.1.2. Diseño de experimentos en la operación de copiado de acero de moldes.....	139
4.1.3. Análisis del acabado superficial obtenido.....	146
4.1.4. Validación de los modelos obtenidos.....	155
4.1.5. Conclusiones.....	156
4.2. Estudio de la influencia del desgaste de las herramientas en el acabado superficial.....	157
4.2.1. Materiales y métodos.....	157
4.2.2. Análisis de resultados.....	160
4.2.3. Conclusiones.....	166
4.3. Estudio de la operación de contorneado sobre aceros de moldes.....	167
4.3.1. Materiales y métodos genéricos.....	167
4.3.2. Influencia del sistema de lubricación sobre distintos aceros de moldes.....	169
4.3.2.1. <i>Materiales y Métodos</i>	169
4.3.2.2. <i>Análisis de resultados inicial, con lubricación aire y material M333</i>	173
4.3.2.3. <i>Análisis de resultados para distintos sistemas de lubricación y material W302</i>	175
4.3.2.4. <i>Análisis de resultados con distintos materiales y lubricación aire</i>	177
4.3.2.5. <i>Análisis de resultados con distintos materiales y sistemas de lubricación</i>	178
4.3.2.6. <i>Conclusiones</i>	180
4.3.3. Influencia del desgaste de herramienta sobre la rugosidad.....	180
4.3.3.1. <i>Materiales y Métodos</i>	181
4.3.3.2. <i>Análisis de resultados</i>	182
4.3.3.3. <i>Conclusiones</i>	188
4.3.4. Influencia del voladizo de herramienta y tipo de portapinzas.....	188
4.3.4.1. <i>Materiales y métodos</i>	188
4.3.4.2. <i>Análisis de resultados</i>	189
4.3.4.3. <i>Conclusiones</i>	193
4.3.5. Influencia del equilibrado del sistema de sujeción de herramienta sobre el acabado.....	193
4.3.5.1. <i>Materiales y métodos</i>	193

4.3.5.2. <i>Análisis de resultados</i>	194
4.3.5.3. <i>Conclusiones</i>	197
4.3.6. Diseño de experimentos en operación de contorneado.	197
4.3.6.1. <i>Materiales y métodos</i>	197
4.3.6.2. <i>Resultados de la experimentación</i>	198
4.3.6.3. <i>Validación del modelo predictivo calculado</i>	204
4.3.6.4. <i>Conclusiones</i>	205
4.3.7. Conclusiones generales de los estudios realizados.....	206
5. ESTUDIOS EXPERIMENTALES SOBRE ACEROS DE MATRICES	209
5.1. Materiales y métodos.....	209
5.2. Influencia del método de corte en aceros de matrices.	214
5.2.1. Materiales y métodos.....	214
5.2.2. Analisis de resultados	214
5.3. Influencia del desgaste de herramienta.....	216
5.3.1. Análisis de resultados	216
5.4. Diseño de experimentos para operación contorneado de acero de matrices.	218
5.4.1. Materiales y métodos.....	218
5.4.2. Analisis de resultados.	218
5.4.3. Validación del modelo para aceros de matrices.	227
5.5. Conclusiones de los estudios para aceros de matrices.....	227
6. ESTUDIO EN PIEZA TEST COMPLEJA.	229
6.1. Materiales y métodos.....	229
6.2. Diseño de experimentos en pieza test.....	234
6.2.1. Modelo predictivo global para la pieza test.....	236
6.2.2. Validación modelo global.	240
6.2.3. Analisis alternativo de los resultados obtenidos.....	241
6.3. Estudio de la influencia de otros parámetros de mecanizado.	245
6.3.1. Influencia de distintos centros de mecanizado.	245
6.3.1.1. <i>Resultados en Fundació ASCAMM</i>	246
6.3.1.2. <i>Resultados en Moldista</i>	249
6.3.1.3. <i>Resultados en Fundació CIM</i>	253
6.3.1.4. <i>Relación de tolerancia cordal, avances lineales y radios de curvatura</i>	256
6.3.1.5. <i>Comprobación de resultados respecto al modelo global de los centros de mecanizado y tolerancias cordales</i>	258
6.3.2. Influencia de diferentes programas CAM.	259

6.3.2.1.	<i>Resultados con el programa Powermill.</i>	259
6.3.2.2.	<i>Resultados con el programa Hypermill.</i>	260
6.3.2.3.	<i>Resultados con el programa Mastercam.</i>	262
6.3.2.4.	<i>Comprobación de resultados respecto diferentes programas CAM.</i>	264
6.3.2.5.	<i>Conclusiones relación tolerancia cordal, programas de mecanizado.</i>	265
7.	CONCLUSIONES FINALES Y TRABAJOS FUTUROS	267
8.	LISTA DE REFERENCIAS.	273
8.1.	Artículos de investigación (por orden alfabético).	273
8.2.	Libros técnicos.	277
8.3.	Normativas.	278
8.4.	Catálogos y documentos técnicos.	279
9.	PUBLICACIONES REALIZADAS.	283
10.	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS COMPLEMENTARIAS.	287
10.1.	Artículos de Investigación.	287
10.2.	Libros y documentos.	292
10.3.	Normativas varias.	293
10.4.	Estudios de investigación.	293
10.5.	Proyectos de investigación.	294

INDICE DE FIGURAS.

Figura 1.1. Centro de mecanizado Deckel.	31
Figura 1.2. Máquina óptica de medición Mitutoyo.	31
Figura 1.3. Medición con rugosímetro Taylor Hobson.	32
Figura 1.4. Perfil de la superficie. Fte.: (ISO 4287:1997).	33
Figura 1.5. Características de transmisión de los perfiles de rugosidad y de ondulación. Fte.: (ISO 4287:1997).	33
Figura 1.6. Representación del parámetro Ra . Fte.: (Predev, 1998).	35
Figura 1.7. Posiciones para la localización de los requisitos complementarios. Fte.: (ISO 1302:2002).	36
Figura 1.8. Distintas superficies con igual parámetro Ra . Fte.: (Predev, 1998).	36
Figura 1.9. Anchura de los elementos del perfil. Fte.: (ISO4287: 1997).	37
Figura 1.10. Parámetro de rugosidad Rz . Fte.: (ISO 4287: 1997).	39
Figura 1.11. Indicación de los parámetros Ra y Rz en los dibujos. Fte.: (ISO 1302:2002).	40
Figura 1.12. Ejemplo de datos obtenidos en la medición de los parámetros de rugosidad.	41
Figura 1.13. Distintos tipos de herramientas de fresado. Fte.: (Korloy 2012).	42
Figura 1.14. Características geométricas de fresas de punta plana. Fte.: (Mitsubishi 2014).	43
Figura 1.15. Operación de contorneado (izquierda) y ranurado (derecha). Fte.: (Sartorius 2008).	44
Figura 1.16. Contorneado con fresa de punta esférica. Fte.: (Hitachi 2003).	44
Figura 1.17. Diámetro efectivo De , función de ap . Fte.: (Sartorius 2008).	44
Figura 1.18. Acabado superficial teórico o altura de cresta, h . Fte.: (Hitachi 2003).	48
Figura 1.19. Altura de cresta, h sobre superficie plana. Fte.: (Uitall 2002).	49
Figura 1.20. Altura de cresta, h , sobre superficie plana, en función de las variables D y Rd	50
Figura 1.21. Altura de cresta, h en superficie inclinada. Fte.: (Uitall 2002).	51
Figura 1.22. Inclinación de herramienta de corte. Fte.: (Sandvik 1999).	52
Figura 1.23. Fases para la fabricación de moldes o matrices. Fte.: (Sandvik 2002).	53
Figura 1.24. Ejemplo de molde de inyección de plásticos. Fte.: (SOLIDWORKS 2017).	54
Figura 1.25. Ejemplo de matriz de embutición. Fte.: (Valenciano 1966).	56
Figura 1.26. Serie de herramientas de corte para moldes. Fte.: (Tungaloy 2011).	57
Figura 1.27. Simulación proceso de estampación. Fte.: (AutoForm 2017).	58
Figura 1.28. Ejemplo mallado componentes de un molde con programa QuickCAST. Fte.: (ESI Group 2017).	58
Figura 1.29. Ejemplo de parámetros de acabado superficial por sector de fabricación. Fte.: (Arrazola 1999).	58
Figura 2.1. Velocidad de corte en función del material. Fte.: (Dashchenko 2003).	61
Figura 2.2. Postizo de un molde de inyección de plástico. Fte.: (Makino 2003).	63
Figura 2.3. Tiempos y costes de fabricación de una matriz. Fte.: (López de Lacalle 2002).	64
Figura 2.4. Errores de alineación de las plaquitas de corte. Fte.: (Baek 2000).	71
Figura 2.5. Rugosidad Ra , en función del avance y de los errores de alineación. Fte.: (Baek 2000).	71
Figura 2.6. Orientaciones de las trayectorias de corte. Fte.: (Toh 2004).	74
Figura 2.7. Velocidad de corte efectiva en superficie inclinada. Fte.: (Aspinwall, 2007).	76

Figura 2.8. Ajuste manual del acabado superficial. Fte.: (Protolabs 2017).	79
Figura 2.9. Herramientas y accesorios para pulido final de moldes. Fte.: (Rúa 2016).....	80
Figura 2.10. Centro de Mecanizado Vertical. Fte.: (Gildemeister 2004).	81
Figura 2.11. Centro de mecanizado Mazak Integrex i400-AM. Fte.: (Brooks, 2014).....	83
Figura 2.12. Ejemplo de robot colaborativo en procesos de medición. Fte.: (Brooks 2016).	84
Figura 2.13. Pieza test Mercedes. Fte.: (López de Lacalle 1999).	84
Figura 2.14. Pieza test Cachan. Fte.: (López de Lacalle 1999).	84
Figura 2.15. Pieza test NCG. Fte.: (López de Lacalle 1999).	84
Figura 2.16. Comunicación entre programa CNC y máquina-herramienta. Fte.: (Heidenhain 2003).....	86
Figura 2.17. Tolerancia cordal exterior e interior. Fte.: (López de Lacalle 1999).	88
Figura 2.18. Tolerancia cordal del ciclo 32. Fte.: (Heidenhain 2004).....	88
Figura 2.19. Acabado sin optimización del Control. Fte.: (Heidenhain 2007).....	89
Figura 2.20. Acabado con optimización del Control. Fte.: (Heidenhain 2007).....	89
Figura 2.21. Acabado con afectación de la vibración, sin optimización del Control.	89
Figura 2.22. Acabado con menor afectación de la vibración, con optimización del Control.	89
Figura 2.23. Cambios de trayectoria con lazo. Fte.: (Siemens 2011).	92
Figura 2.24. Operación de corte trocoide. Fte: (Utiltall 1999).	92
Figura 2.25. Estrategia de corte trocoide en fase de acabado. Fte.: (SAMEC 2003).	93
Figura 2.26. Estrategia de mecanizado tangencial. Fte.: (OPEN MIND 2015).....	94
Figura 2.27. Estrategia de Acabado de planos 3D. Fte.: (OPEN MIND 2016).....	95
Figura 2.28. Software VERICUT 8. Fte.: (CGTech 2016).	95
Figura 2.29. Software ATC. Fte.: (DMG 2004).	96
Figura 2.30. Fresas integrales de MAV. Fte.: (Kobelco 2002).	97
Figura 2.31. Sustrato de metal duro. Fte.: (Kobelco 2002).	97
Figura 2.32. Fresa VC2PSB con tolerancias de corte de precisión. Fte.: (Kobelco 2003).....	98
Figura 2.33. Acabado con fresa convencional (a) y fresa de precisión (b). Fte.: (Kobelco 2003).	99
Figura 2.34. Nueva fresa IMPACT MIRACLE REVOLUTION. Fte.: (Mitsubishi 2017).	100
Figura 2.35. Nueva tecnología de recubrimiento de la serie IMPACT MIRACLE. Fte.: (Mitsubishi 2017).....	100
Figura 2.36. Ejemplo de portapinzas de fijación mecánica. Fte.: (Lamikiz 2002).	105
Figura 2.37. Ejemplo de portapinzas de fijación mecánica. Fte.: (Lamikiz 2002).....	105
Figura 2.38. Ejemplo cono ISO, tipo CAT y superficies de contacto con husillo. Fte.: (Lamikiz 2002).....	106
Figura 2.39. Ejemplo cono HSK A63 y superficies de contacto con husillo. Fte.: (Lamikiz 2002).	106
Figura 2.40. Fijación térmica de la herramienta, con con ISO tipo BT. Fte.: (MST 2004).....	107
Figura 2.41. Sistema de fijación térmica integral. Serie UNO. Fte.: (MST 2015).	108
Figura 2.42. Mordaza mecánica y accesorios modulares. Fte.: (Gerardi 2003).	109
Figura 2.43. Designación por colores de los materiales de trabajo. Fte.: (ISO 513:2012).....	110
Figura 2.44. Sistema de microlubricación. Fte.: (Noga 2002).	115
Figura 2.45. Superficie respuesta de metros mecanizados para desgaste $VB = 0,10$ mm. Fte.: (Ortiz 2004).....	119

Figura 2.46. Molde de teléfono. Fte.: (Loftus 2002).	123
Figura 2.47. Ranuras en la superficie superior de los botones del molde. Fte.: (Loftus 2002).	124
Figura 3.1. Componentes de la incertidumbre en la medición. Fte.: (ISO 14253-2:2011).	128
Figura 3.2. Tabla de la matriz de diseño factorial 2^2 . Fte.: (Pepió 2011).	130
Figura 3.3. Gráfica de semizetas, con indicación de términos significativos. Fte.: (Pepió 2011).	131
Figura 3.4. Superficie respuesta del modelo obtenido. Fte.: (Pepió 2011).	131
Figura 4.1. Pieza tipo 1 y métodos de corte: A en concordancia, B en oposición.	134
Figura 4.2. Posicionamiento de la pieza respecto a herramienta en máquina.	136
Figura 4.3. Simulación de la operación de mecanizado.	136
Figura 4.4. Portapinzas mecánico MST, ref. CTH.	135
Figura 4.5. Fresa ref. VC-2SB R3 mm. Fte.: (Kobelco 2003).	137
Figura 4.6. Vistas herramienta nueva MMC Kobelco VC-2SB R3.	137
Figura 4.7. Ángulos de medición de la experimentación. Pieza tipo 1.	138
Figura 4.8. Gráficas de los efectos principales de la rugosidad $Ra(A)$.	142
Figura 4.9. Gráficas de las interacciones significativas de la rugosidad $Ra(A)$.	143
Figura 4.10. Superficie respuesta modelo $Ra(A)$. Ra versus Rd , fz .	143
Figura 4.11. Gráficas de los efectos principales de la rugosidad $Ra(B)$.	144
Figura 4.12. Gráficas de las interacciones significativas de la rugosidad $Ra(B)$.	145
Figura 4.13. Superficie respuesta modelo $Ra(B)$. Ra versus Rd , fz .	145
Figura 4.14. Perfil de rugosidad zona A, experimento 20, ángulo 45° .	147
Figura 4.15. Perfil de rugosidad zona A, experimento 20, ángulo 90° .	148
Figura 4.16. Experimento 9, ángulo 90° . Zona A y zona B.	154
Figura 4.17. Experimento 16, ángulo 90° . Zona A y zona B.	154
Figura 4.18. Experimento 17, ángulo 90° . Zona A y zona B.	153
Figura 4.19. Experimento 24, ángulo 90° . Zona A y zona B.	153
Figura 4.20. Residuos en experimentos adicionales para el modelo $Ra(A)$, en función de Rd .	154
Figura 4.21. Residuos en experimentos adicionales para el modelo $Ra(B)$, en función de Rd .	155
Figura 4.22. Vistas de la herramienta nueva ref. VF-2SB R3.	158
Figura 4.23. Medición desgaste herramienta en superficie de incidencia.	159
Figura 4.24. Posición pieza para medición de rugosidad a 45° .	159
Figura 4.25. Relación desgaste de las aristas de corte de la herramienta $T1$ y longitud de mecanizado, a 85° .	160
Figura 4.26. Relación desgaste de las aristas de corte de la herramienta $T2$ y longitud de mecanizado, a 85° .	161
Figura 4.27. Vistas del desgaste de la herramienta $T2$, para $Lm = 944$ m.	162
Figura 4.28. Vistas del desgaste de la herramienta $T2$, para $Lm = 1.504$ m.	162
Figura 4.29. Rugosidad Ra versus longitud de mecanizado para herramienta $T1$.	163
Figura 4.30. Rugosidad Ra versus longitud de mecanizado para herramienta $T2$.	164
Figura 4.31. Acabado superficial para longitud de mecanizado $Lm=1.477$ m y distintos ángulos de medición.	1664
Figura 4.32. Operación de contorneado con corte en concordancia.	167

Figura 4.33. Dispositivo de inyección aire y microlubricación.	170
Figura 4.34. Dispositivo de inyección de aire frío. Fte.: (Celifa 2006).	170
Figura 4.35. Medición de la excentricidad de la herramienta.	172
Figura 4.36. Puntos de medición de la rugosidad en la superficie mecanizada.....	173
Figura 4.37. Acabado superficial en la probeta M333 a $Lm = 200$ mm.	174
Figura 4.38. Acabado superficial en la probeta M333, con herramienta estabilizada a $Lm = 1.400$ mm.	174
Figura 4.39. Perfil de rugosidad a $Lm = 200$ m en probeta M333.	175
Figura 4.40. Perfil de rugosidad a $Lm = 1.400$ m en probeta M333.	175
Figura 4.41. Rugosidad Ra , en función de los sistemas de lubricación. Acero W302, corte en concordancia.	176
Figura 4.42. Rugosidad Ra , de los diversos materiales, con lubricación aire réplica, corte en concordancia.	177
Figura 4.43. Rugosidad Ra , en corte en concordancia, para los diversos materiales y sistemas de lubricación.	178
Figura 4.44. Rugosidad Ra , en corte en oposición, para los diversos materiales y sistemas de lubricación.	179
Figura 4.45. Herramienta nueva para estudio desgaste.....	181
Figura 4.46. Parada de la máquina tras realizar el ensayo	182
Figura 4.47. Rugosidad Ra versus método de corte y longitud de mecanizado Lm	183
Figura 4.48. Rugosidad RSm versus método de corte y longitud de mecanizado Lm	184
Figura 4.49. Desgaste herramienta 1. Corte en concordancia tras 16 m de mecanizado.....	185
Figura 4.50. Fotografías de la superficie mecanizada tras 16 m de mecanizado. Corte en concordancia.....	185
Figura 4.51. Perfil de rugosidad, $Lm = 16$ m, punto $p2$, corte en concordancia.	186
Figura 4.52. Desgaste herramienta 6. Corte en oposición tras 16 m de mecanizado.	185
Figura 4.53. Fotografías de la superficie mecanizada tras 16 m de mecanizado. Corte en oposición.	185
Figura 4.54. Perfil de rugosidad, $Lm = 16$ m, punto $p2$, corte en oposición.	187
Figura 4.55. Fotografías ampliadas de la superficie con $Lv = 30$ mm. Portapinzas mecánico.	190
Figura 4.56. Fotografías ampliadas de la superficie con $Lv = 15$ mm. Portapinzas térmico.	191
Figura 4.57. Comparativa Ra versus longitud voladizo Lv [mm] de herramienta y tipo de portapinzas.	192
Figura 4.58. Portapinzas equilibrable y sensores de medición de vibración.	194
Figura 4.59. Fotografías ampliadas de la superficie mecanizada con el portapinzas equilibrado.	196
Figura 4.60. Fotografías ampliadas de la superficie mecanizada con el portapinzas desequilibrado.	196
Figura 4.61. Diagrama de Pareto con la indicación de la significación de factores e interacciones.	201
Figura 4.62. Probabilidad normal de los residuos.	202
Figura 4.63. Residuos versus nº de observaciones.	202
Figura 4.64. Valores de rugosidad Ra según el modelo para distintos fz [mm/diente].	204
Figura 4.65. Residuos en puntos estrella en función de fz [mm/diente].	204
Figura 5.1. Contorneado con fresa de punta plana. Fte.: (Hitachi 2003).	211
Figura 5.2. Herramienta ref. VCMDD0600. Fte.: (Kobelco 2002).	211
Figura 5.3. Vista frontal de la herramienta ref. VCMDD0600.	212
Figura 5.4. Sistema de fijación de la herramienta en la experimentación.	213
Figura 5.5. Experimentos sobre pieza prismática tipo 3.	208
Figura 5.6. Desgaste herramienta en cara de incidencia con los dos métodos de corte para $Lm = 720$ mm.	216

Figura 5.7. Superficies mecanizadas según el método de corte para el acero K390.	217
Figura 5.8. Diagrama de Pareto con los términos significativos de la experimentación.	221
Figura 5.9. Gráficas de los efectos principales para rugosidad, R_a en operación de contorneado.	222
Figura 5.10. Gráficas de interacciones para rugosidad, R_a en operación de contorneado.	222
Figura 5.11. Superficie respuesta de la rugosidad R_a versus A_d y f_z , para $V_c = 150$ m/min.	223
Figura 5.12. Acabado superficial obtenido en la probeta K340-8.	224
Figura 5.13. Acabado superficial obtenido en la probeta K340-2.	224
Figura 5.14. Perfil de rugosidad, medición perpendicular, punto p_2 , experimento n° 5.	226
Figura 5.15. Perfil de rugosidad, medición paralela, punto p_2 , experimento n° 5.	226
Figura 5.16. Residuos en experimentos adicionales en función de f_z [mm/diente].	227
Figura 6.1. Pieza test compleja.	229
Figura 6.2. Placa material ref. W302-X de la pieza test compleja.	231
Figura 6.3. Posicionamiento de la pieza test en máquina.	229
Figura 6.4. Pieza test en proceso de mecanizado, fase semiacabado.	230
Figura 6.5. Centro de mecanizado Deckel DMC 105 V linear F. ASCAMM.	233
Figura 6.6. Toma de imágenes del acabado superficial.	231
Figura 6.7. Diagrama de Pareto para los efectos e interacciones del modelo global.	238
Figura 6.8. Gráfica de la Probabilidad normal de los residuos en modelo global.	238
Figura 6.9. Gráfica de Residuos versus número de observaciones en modelo global.	238
Figura 6.10. Valores de rugosidad R_a según el modelo para distintos R_d [mm].	240
Figura 6.11. Residuos en puntos estrella en función de R_d [mm].	240
Figura 6.12. Valores máximos, medios y mínimos de R_a para los distintos experimentos.	242
Figura 6.13. Gráfica de intervalos de rugosidad ampliados según los grupos de puntos de medición.	244
Figura 6.14. Fotografías superficie curva (punto 3) en la experiencia 16. F. ASCAMM.	246
Figura 6.15. Fotografías superficie curva (punto 3) en la experiencia 16.1. F. ASCAMM.	247
Figura 6.16. Rugosidad R_a en los puntos de medición, para los diferentes experimentos. F. ASCAMM.	248
Figura 6.17. Rugosidad R_{Sm} en los puntos de medición, para los experimentos. F. ASCAMM.	249
Figura 6.18. Rugosidad R_a en los puntos de medición, para los diferentes experimentos. Moldista.	250
Figura 6.19. Fotografías superficie curva (punto 3) en experimento 16. Moldista.	251
Figura 6.20. Fotografías superficie curva (punto 3) en experimento 16.1. Moldista.	251
Figura 6.21. Intervalos ampliados de rugosidad R_a en los experimentos. Moldista.	252
Figura 6.22. Rugosidad R_{Sm} en los puntos de medición para cada experimento. Moldista.	252
Figura 6.23. Rugosidad R_a en los puntos de medición para cada experimento. F. CIM.	253
Figura 6.24. Rugosidad R_{Sm} en los puntos de medición para cada experimento. F. CIM.	254
Figura 6.25. Fotografías superficie curva (punto 3) en el experimento 16. F. CIM.	255
Figura 6.26. Fotografías superficie curva (punto 3) en el experimento 16.1. F. CIM.	255
Figura 6.27. Tolerancia cordal y avance lineal máximo para diferentes radios de curvatura R_c [mm].	257
Figura 6.28. Facetas en superficie curva convexa (punto 3), experimento 16. F. ASCAMM.	257
Figura 6.29. Gráfica de residuos del modelo teórico global versus tolerancia cordal y centros de mecanizado.	259

Figura 6.30. Fotografías superficie curva (punto 3) en el experimento 16. Hypermill.	260
Figura 6.31. Rugosidad Ra en los puntos de medición, para los experimentos. Hypermill.	261
Figura 6.32. Rugosidad RSm en los puntos de medición, para los experimentos. Hypermill.	262
Figura 6.33. Rugosidad Ra en los puntos de medición, para los experimentos. Mastercam.	263
Figura 6.34. Rugosidad RSm en los puntos de medición, para los experimentos. Mastercam.	264
Figura 6.35. Gráfica de residuos del modelo global en relación a programas CAM.	265

Nota del autor: Las figuras y tablas que no muestran una fuente de procedencia de la misma, son de elaboración propia.

INDICE DE TABLAS.

Tabla 1.1. Valores de rugosidad estándar frente a números de calidades de rugosidad. Fte.: (ISO 1302:2002).....	35
Tabla 1.2. Filtro del perfil de rugosidad, λc frente parámetros de rugosidad Ra , Rz . Fte.: (ISO 4288:1996).....	41
Tabla 1.3. Relación de la altura de cresta, h , respecto las variables Rd y D	50
Tabla 2.1. Composición química en porcentaje en peso de aceros básicos. Fte.: (ASCAMM 2000).	112
Tabla 2.2. Tabla de equivalencias entre distintas normas de materiales.	113
Tabla 4.1. Composición química del material W. Nr. 12344. Fte: (Böhler 2000).	138
Tabla 4.2. Factores y niveles del diseño de experimentos. Pieza tipo 1.....	139
Tabla 4.3. Matriz del Diseño de Experimentos. Pieza tipo 1.	140
Tabla 4.4. Matriz del Diseño de Experimentos. Pieza tipo 1. Puntos centrales.	140
Tabla 4.5. Matriz del Diseño de Experimentos. Pieza tipo 1. Puntos validación.	149
Tabla 4.6. Rugosidad Ra y RSm en pieza 20, en función de los ángulos de medición.....	149
Tabla 4.7. Variabilidad de la medida de la rugosidad, Ra en función del método de corte.....	150
Tabla 4.8. Variabilidad de la rugosidad, Ra en función del ángulo de medición en la zona A.	151
Tabla 4.9. Variabilidad de la rugosidad, Ra en función del ángulo de medición en la zona B.	151
Tabla 4.10. Parámetros de corte efectivos de la herramienta.	160
Tabla 4.11. Variabilidad de la medida del desgaste VB a $Lm = 1.504$ m para $T1$ y $T2$	165
Tabla 4.12. Variabilidad de la medida de rugosidad para 2 longitudes de mecanizado, herramienta $T1$	165
Tabla 4.13. Notación probetas según lubricación y método de corte.	169
Tabla 4.14. Relación de aceros para moldes seleccionados.	171
Tabla 4.15. Características principales de los materiales de ensayo de los aceros <i>Böhler</i>	171
Tabla 4.16. Rugosidad Ra , en función de los sistemas de lubricación. Acero W302, corte en concordancia.....	179
Tabla 4.17. Rugosidad Ra versus método de corte y longitud de mecanizado.....	179
Tabla 4.18. Rugosidad Ra versus método de corte.	179
Tabla 4.19. Rugosidad RSm versus método de corte y longitud de mecanizado.....	183
Tabla 4.20. Rugosidad RSm versus método de corte.....	184
Tabla 4.21. Excentricidad de la herramienta con diferente portapinzas y longitud de voladizo Lv	189
Tabla 4.22. Influencia de Lv , en la rugosidad, con portapinzas mecánico.	190
Tabla 4.23. Influencia de Lv , en la rugosidad, con portapinzas térmico.	191
Tabla 4.24. Medida de la excentricidad en cada uno de los experimentos.	195
Tabla 4.25. Amplitud de la vibración en función de la carga y estado de equilibrado.....	195
Tabla 4.26. Rugosidad Ra en función del estado de equilibrado.....	195
Tabla 4.27. Rugosidad RSm en función del estado de equilibrado.....	195
Tabla 4.28. Factores y niveles del diseño de experimentos para contorneado de acero de moldes.....	198
Tabla 4.29. Condiciones de corte en el diseño de experimentos en pieza prismática.	199
Tabla 4.30. Experimentos en los 4 puntos centrales del diseño de experimentos en pieza prismática.....	199
Tabla 4.31. Experimentos en 8 puntos estrella del diseño de experimentos en pieza prismática.	200
Tabla 4.32. Análisis de regresión inicial con factores e interacciones de segundo orden.	200

Tabla 4.33. Análisis de regresión de segundo orden.	201
Tabla 4.34. Ecuaciones de regresión lineales y no lineales.	203
Tabla 4.35. Valores de rugosidad Ra , según el modelo predictivo calculado.	204
Tabla 5.1. Composición química [%] y propiedades de aceros de matrices.	210
Tabla 5.2. Comparación en porcentaje [%] de las propiedades de aceros de matrices. Fte.: (Böhler 2009).	210
Tabla 5.3. Rugosidad, Ra para fresado en concordancia según el tipo de acero.	215
Tabla 5.4. Rugosidad, Ra para fresado en oposición según el tipo de acero.	215
Tabla 5.5. Factores y niveles seleccionados para operación de contorneado.	218
Tabla 5.6. Matriz del Diseño de Experimentos para operación de contorneado.	219
Tabla 5.7. Variabilidad de la medida de rugosidad operación contorneado, en puntos centrales.	220
Tabla 5.8. Experimentación adicional operación contorneado.	220
Tabla 5.9. Análisis de variancia para rugosidad Ra , con términos significativos definitivos.	220
Tabla 5.10. Variación de la rugosidad en función de la dirección de medición.	220
Tabla 6.1. Puntos de control de medición de rugosidad en pieza test.	231
Tabla 6.2. Condiciones de corte del diseño de experimentos pieza test.	234
Tabla 6.3. Condiciones de corte y resultados de Ra , en el diseño de experimentos de la pieza test.	235
Tabla 6.4. Condiciones y resultados de Ra en los 4 puntos centrales del diseño de experimentos.	235
Tabla 6.5. Condiciones para los experimentos en 5 puntos centrados del diseño de experimentos.	236
Tabla 6.6. Análisis de regresión con todos los factores principales y las interacciones de segundo orden.	237
Tabla 6.7. Análisis de regresión final con el factor más significativo Rd	237
Tabla 6.8. Ecuaciones de regresión lineales y no lineales.	239
Tabla 6.9. Valores de rugosidad Ra , según el modelo predictivo global.	237
Tabla 6.10. Intervalos de rugosidad ampliados de Ra [μm] según los grupos de puntos de medición.	244
Tabla 6.11. Condiciones de corte del experimento 16.	245
Tabla 6.12. Valores medios de rugosidad Ra [μm] en los puntos de medición. F. ASCAMM.	248
Tabla 6.13. Valores medios de rugosidad RSm [μm] en los puntos de medición. F. ASCAMM.	249
Tabla 6.14. Valores medios de rugosidad Ra [μm] en los puntos de medición. Moldista.	250
Tabla 6.15. Valores medios de rugosidad RSm [μm] en los puntos de medición. Moldista.	253
Tabla 6.16. Valores medios de rugosidad Ra [μm] en los puntos de medición. F. CIM.	254
Tabla 6.17. Valores medios de rugosidad RSm [μm] en los puntos de medición. F. CIM.	254
Tabla 6.18. $F_{m\acute{a}x}$ [mm/min] en relación tolerancia cordal y radios de curvatura.	256
Tabla 6.19. Ecuaciones de la relación entre $F_{m\acute{a}x}$ y TC para cada Rc	258
Tabla 6.20. Valores medios de rugosidad Ra [μm] en los puntos de medición. Hypermill.	261
Tabla 6.21. Valores medios de rugosidad RSm [μm] en los puntos de medición. Hypermill.	262
Tabla 6.22. Valores medios de rugosidad Ra [μm] en los puntos de medición. Mastercam.	263
Tabla 6.23. Valores medios de rugosidad RSm [μm] en los puntos de medición. Mastercam.	264

ACRÓNIMOS.

AA: Aluminium Alloy (Aleación de Aluminio).

ACC: Active Chatter Control.

AENOR: Asociación Española de NORmalización y certificación.

AFC: Adaptive Feed Control.

AG: Algorith Genetic (Algoritmo Genético).

AIM: Added Interface Module (Módulo adicional de amortiguación).

ISI: American Iron and Steel Institute (Instituto Americano del hierro y el acero).

AM: Additive Manufacturing (Fabricación por adición de material).

AMPT: International Conference on Advances in Materials and Processing Technologies.

ANN: Artificial Neural Network (Análisis por Redes Neuronales Artificiales, RNA).

ASCAMM: Associació Catalana d'Empreses de Motlles i Matrius.

ATC: Application Tuning Cicle.

APMX: Depth of cut maximum (Profundidad de corte máxima).

CAD: Computer Assisted Design (Diseño Asistido por Ordenador).

CAM: Computer Assisted Manufacturing (Fabricación Asistida por Ordenador).

CBN: Cubic Boric Nitric (Nitruro de Boro Cúbico).

CIRP: College International pour la Recherche en Productique - The International Academy for Production Engineering (Academia internacional para la Ingeniería de Producción).

CNC: Computer Numerical Control (Control Numérico por Ordenador).

DC: Cutting Diameter (Diámetro de corte).

DMG: Deckel Maho Gildemeister.

DMLS: Direct Metal Laser Sintering (Sinterización Metálica Directa por Láser).

DOE: Design Of Experiments (Diseño de Experimentos).

ETSEIB: Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona.

ETSEIAT: Escola Tècnica Superior d'Enginyeries Industrial i Aeronàutica de Terrassa (en la actualidad, *ESEIAAT: Escola Superior d'Enginyeries Industrial, Aeronàutica i Audiovisual de Terrassa*).

ETMM: European Tool & Mould Making magazine.

FAV: Fresado en Alta Velocidad (*High Speed Milling*).

HAM: High Accuracy Machining (Mecanizado con Alta Precisión).

HB: Hardness Brinell (Dureza Brinell).

HPM: High Performance Machining (Mecanizado con Alto Rendimiento).

HPC: High Precision Cutting (Corte de Alta Precisión).

HRA: Hardness Rockwell A (Dureza Rockwell escala A).

HRC: Hardness Rockwell C (Dureza Rockwell escala C).

HSC: High Speed Cutting (Alta Velocidad de Corte).

HSM: High Speed Machining (Mecanizado en Alta Velocidad, MAV).

HSS: High Speed Steel (Acero Rápido).

HSSA: High Speed Surface Accuracy (Alta Velocidad y Precision Superficial).

HV: Hardness Vickers (Dureza Vickers)

IC: Intervalo de Confianza.

IMTS: International Manufacturing Technology Show.

ISO: International Standardization Organization.

ITW: Institut für Technologie und Werkzeugmaschinen - Institute of Production Management, Technology and Machine Tools (Instituto de Tecnología y Máquina-Herramienta).

JIM: Joint Interface Module (Unión mecatrónica activa).

JIS: Japanese Industrial Standard.

MESIC: Manufacturing Engineering Society International Conference.

MQL: Minimum Quantity of Lubricant (Mínima Cantidad de Lubricante ó microlubricación).

MMC: Mitsubishi Materials Corporation.

MMC: Máquinas de Medición por Coordenadas.

PCBN: Polycrystalline Cubic Boric Nitric (Nitruro de Boro Cúbico Policristalino).

PM: Material Pulvimetalúrgico.

PVD: Physical Vapor Deposition (Deposición Física en Vapor).

TC: Tolerancia Cordal

TMT: International Research / Experts Conference "Trends in the development of Machinery and associated Technology"

UNE: Una Norma Española. Documento normativo de AENOR.

UPC: Universitat Politècnica de Catalunya.

UPV: Universidad Politécnica del país Vasco.

VAPR: Vibration Average Per Revolution (Vibración promedio por revolución).

W. Nr.: Werkstoff Nummer (Norma alemana para designación de aceros según número de material).

NOTACIÓN DE VARIABLES.

Parámetros de rugosidad:

- Ra [μm]: Parámetro de rugosidad de amplitud, media aritmética de las desviaciones verticales del perfil de rugosidad.
- Ra_{teo} [μm]: Parámetro de rugosidad, Ra teórica.
- Ra_M [μm]: Parámetro de rugosidad Ra obtenido con un modelo predictivo.
- RSm [μm]: Parámetro de rugosidad de la anchura media de los elementos del perfil.
- Zp [μm]: Profundidad de pico en un perfil de rugosidad.
- Zv [μm]: Profundidad de valle en un perfil de rugosidad.
- Rt [μm]: Parámetro de rugosidad de amplitud que representa la suma de la máxima altura de pico, Zp y de la máxima profundidad de valle, Zv , comprendidas en una longitud de evaluación.
- Rth [μm]: Parámetro geométrico de rugosidad, que indica el acabado superficial teórico, equivalente a h [μm].
- Rz [μm]: Parámetro de rugosidad que representa la suma de la máxima altura de pico, Zp y de la máxima profundidad de valle, Zv , comprendidas en una longitud de muestreo.
- h [μm]: Parámetro geométrico de rugosidad, altura de cresta, que indica el acabado superficial teórico, equivalente a Rth [μm].
- lr ó l [mm]: Longitud de muestreo. (*Sampling length*)
- ln [mm]: Longitud de evaluación. (*Evaluation length*)
- Xsi [μm]: Anchura de un elemento del perfil de rugosidad.
- $Z(x)$ [μm]: Altura del perfil de rugosidad a lo largo del eje X.
- λ_c : Filtro de perfil de rugosidad. (*Long-wave filter roughness profile*)
- λ_s : Filtro de perfil de rugosidad. (*Short-wave filter roughness profile*)

Condiciones de corte:

- Rd [mm] (ó ae [mm]): Paso o profundidad de corte radial y perpendicular a la superficie, en operaciones de fresado. (*Radial cutting depth*)
- Rdv [mm]: Paso o profundidad de corte radial vertical sobre el eje Y.
- Ad [mm] (ó ap [mm]): Profundidad de corte axial. (*Axial cutting depth*)
- α [$^\circ$]: Ángulo de inclinación de superficies respecto a línea horizontal.

- β [°]: Ángulo de inclinación del eje de una herramienta de corte respecto a línea vertical.
- D [mm] (ó D_c [mm]): Diámetro de corte de la herramienta de corte. (*Cutting diameter*)
- R [mm]: Radio de corte de la herramienta. (*Cutting radius*)
- R_c [mm]: Radio de curvatura de la pieza.
- D_e [mm]: Diámetro efectivo de la herramienta de corte. (*Effective cutting diameter*)
- f_z [mm/diente]: Avance por diente. (*Feed per tooth*)
- f [mm/rev]: Avance por revolución. (*Feed per revolution*)
- f_1, f_2 : aristas de corte de la herramienta (*flute 1, flute 2*)
- V_c [m/min]: Velocidad de corte. (*Cutting speed*)
- V_{ce} [m/min]: Velocidad de corte efectiva. (*Effective cutting speed*)
- S [min^{-1}]: Velocidad de giro de la herramienta. (*Rotation speed*)
- F [mm/min]: Velocidad de avance de la herramienta. (*Feed*)
- $S_{m\acute{a}x}, F_{m\acute{a}x}$: Velocidad de giro o de avance máximo de máquina.
- z : Número de aristas de corte de la herramienta. (*Number cutting edges*)
- L [m]: Longitud de corte mecanizada. (*Cutting length*)
- L_a [mm]: Longitud de amarre o fijación de pieza. (*Clamping length*).
- L_v [mm]: Longitud de voladizo de herramienta. (*Overhanging length*).
- VB [mm]: desgaste en la cara de incidencia de la herramienta. (*Flank wear*)
- hm [mm]: Espesor medio de viruta. (*Average width chip*)
- t [mm]: Ancho de ranura. (*Slot width*)
- T_1, T_2 : Herramienta 1, Herramienta 2. (*Tool 1, Tool 2*).
- U [g·mm]: Desequilibrio residual del sistema o conjunto de elementos en rotación. (*Residual unbalance*)
- m [kg] masa del sistema. (*Mass*)
- e [g·mm/kg]: Excentricidad del sistema o máximo desequilibrio residual permitido (*Maximum residual unbalance allowed*)
- G : Clase o grado de equilibrado según norma ISO1940-1.
- δ [mm]: Flexión de la herramienta.
- F_c [N]: Fuerza de corte.
- E [MPa]: Módulo de Young, para metal duro igual a 560.000 MPa.

Parámetros estadísticos: (en general, las unidades son en [μm])

- \bar{x}_c : Media o valor promedio de la calibración
- \bar{x}_m : Media o valor promedio de la muestra
- x_{mi} : Valor de la medida tomada para una muestra
- n_c : Tamaño de la calibración
- n : Tamaño de la muestra
- s_c : Desviación estándar o típica de una calibración corregida
- s_m : Desviación estándar o típica de una muestra corregida
- μ : Media poblacional
- σ^2 : Varianza poblacional
- ε : Error cuadrático medio de la muestra
- ε_T : Error absoluto total
- x : Medida total de la muestra
- $x_{m\acute{a}x}$: Valor máximo respecto la medida total de una muestra
- $x_{m\acute{i}n}$: Valor mínimo respecto la medida total de una muestra
- R : Error de repetibilidad de la muestra (Rango ó Recorrido)
- r : Error de reproducibilidad de la muestra
- e_r : residuo estandarizado
- U_c : Incertidumbre expandida de la calibración
- U_m : Incertidumbre expandida de la medición
- k : Factor de recubrimiento o de cobertura
- u_c : Incertidumbre típica combinada
- u_m : Incertidumbre de la medición. Equivalente al error ε .
- t : factor de seguridad según la distribución de Student para un valor $n-1$

Las variables empleadas con el método de calidad del diseño de experimentos:

- A, B, C, D: Factores del diseño de experimentos
- X_i : Variables codificadas de los factores del diseño de experimentos
- Y : variable de la respuesta del modelo lineal
- β_i : factores del modelo lineal
- e_r : Residuo del modelo lineal
- y_i : Variables de las respuestas de la experimentación
- R^2 [%]: Valor estadístico de R^2 ajustado (*adjusted R-squared statistic*)

1. INTRODUCCIÓN.

Cualquier producto obtenido mediante procesos de fundición o deformación plástica, ya sea de material plástico o metálico, requiere de moldes o matrices para su fabricación. La producción de moldes y matrices para este fin, es cada vez más exigente. Por un lado se requiere una mayor calidad de fabricación y por otro lado, una reducción continua de los tiempos y costes de producción, para ser más competitivos. Con los estudios de investigación que se van realizando sobre los procesos de fabricación y con la aparición de nuevas tecnologías, nuevos medios y sistemas de producción, es posible alcanzar estas exigencias, de forma más o menos eficiente (Sandvik 2002).

La situación actual del sector del molde y matriz, se explicaba en un reciente artículo de 2016, de la revista *Plásticos Universales*, con una entrevista a Daniel Altimiras, presidente de *ASCAMM (Associació Catalana d'Empreses de Motlles i Matrius)*. En los últimos quince años, este sector ha sido muy fluctuante por diferentes motivos: falta de fidelización del cliente, falta de relevo generacional, falta de formación específica, crisis financiera, deslocalización de la producción. Además de estos motivos, en concreto en Cataluña el pequeño tamaño de las empresas y las trabas de las administraciones públicas han supuesto unos problemas añadidos para el mantenimiento estable del sector. El sector de automoción, es el sector clave que interviene de forma clara en la fabricación continua de nuevos productos, o en su reparación dentro del sector de moldes y matrices. A partir del 2010, se ha producido el aumento del negocio en el sector, en cuanto a importaciones, exportaciones (Güell 2016a).

A partir de estas necesidades, inicialmente surgió la motivación de la presente tesis doctoral, desarrollada en el Departamento de Ingeniería Mecánica de la *Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)*, donde se han dispuesto de las instalaciones y equipamientos necesarios para obtener unos resultados satisfactorios y que constituyan una nueva aportación dentro de la temática sobre el Mecanizado en Alta Velocidad (MAV).

Debido a la complejidad del proceso de mecanizado, actualmente no existe en el mercado ningún modelo o programa que contemple de forma integral todo el proceso de mecanización. A partir del conocimiento actual de los estudios científico-técnicos sobre los procesos de mecanizado, de las tecnologías implicadas y de la problemática concreta del fabricante de moldes y matrices, se han planteado unos modelos predictivos del acabado superficial que ayuden a reducir los tiempos y costes de fabricación de manera eficiente, fiable y repetitiva.

Los trabajos de la presente tesis han formado parte del proyecto DPI-2003-04727: *Modelo predictivo del acabado superficial de moldes y matrices fabricados con aceros mediante fresado a alta velocidad*, (Vivancos 2006) cofinanciado por el ministerio de Educación y Ciencia del Gobierno Central Español, dentro del Plan Nacional de I+D+I (2000-2003). También cabe destacar que los resultados obtenidos y toda la experimentación desarrollada en este proyecto han servido de base en el proyecto DPI-2007-66546: *Optimización del acabado superficial de moldes y matrices fabricados con aceros templados mediante el proceso de fresado a alta velocidad, en función del pulido posterior* (Vivancos 2010).

1.1. Objetivos.

La finalidad principal de esta tesis ha sido el estudio de la influencia de las distintas condiciones de corte en el acabado superficial obtenido (principalmente del parámetro de rugosidad Ra) en operaciones de fresado clásicas: copiado con herramienta de punta esférica y contorneado con herramienta de punta plana. Es una nueva contribución científico-técnica en el campo del fresado en alta velocidad, centrado en las operaciones de acabado y en la calidad superficial obtenida en materiales de trabajo endurecidos y utilizados para la fabricación de componentes de moldes y matrices. Para conseguir esta finalidad principal se han planteado los siguientes objetivos:

- Obtener modelos predictivos basados en la metodología del diseño de experimentos, que permiten integrar y controlar los parámetros más significativos de las tecnologías implicadas en el Fresado en Alta Velocidad (FAV), para realizar la última operación de acabado superficial, directamente en máquina.
- Realizar la experimentación con materiales de elevada dureza: Aceros de moldes con dureza entre 50-54 HRC y aceros de matrices con dureza entre 60-62 HRC. Ensayos realizados con los materiales clásicos y nuevos materiales con mayor tendencia en un uso futuro.
- Realizar la experimentación con distintas estrategias de mecanizado y distintos parámetros de mecanizado, para comprobar su influencia en los resultados de la rugosidad superficial.

Un mayor conocimiento de las relaciones entre los parámetros de corte y de rugosidad evitaría en gran medida, operaciones previas como la electroerosión (por hilo o por penetración), o posteriores operaciones de rectificado o pulido manual, para así reducir los tiempos y costes de fabricación y aumentar la calidad en la producción de piezas o componentes mecanizados.

1.2. Metodología.

Debido a la complejidad del tema y a la gran cantidad de factores que influyen, los diferentes modelos predictivos que se presentan en esta tesis, se obtienen a partir del estudio y análisis previo de la experimentación necesaria, con la aplicación de la metodología estadística del diseño de experimentos, tal que permita estimar el grado de influencia de los parámetros más significativos integrados dentro del conjunto de la multitud de variables existentes.

Todo ello ha exigido definir, inicialmente, diferentes piezas tipo básicas, para poder experimentar las operaciones y estrategias de mecanizado tipo de fresado, realizadas en el proceso de acabado de moldes y matrices. Por este motivo, la metodología seguida es la siguiente:

1. Establecer el conocimiento de la base conceptual de la calidad superficial y de la estimación de la rugosidad superficial, de los tipos de herramientas de corte utilizadas, de las condiciones de corte a seleccionar en las operaciones de fresado y del sector de moldes y matrices
2. Estudio y análisis del estado del arte de las tecnologías implicadas en el proceso de mecanizado:
 - Mecanizado en alta velocidad
 - Modelización del acabado superficial.
 - Máquina-herramienta
 - Control numérico computerizado (*CNC*)
 - Programas de simulación de mecanizado (*CAD/CAM*) y sus estrategias de mecanizado
 - Herramientas de corte y sus condiciones de corte
 - Sistema de sujeción de las herramientas
 - Sistema de sujeción de las piezas
 - Material de las piezas a mecanizar
 - Sistema de lubricación
3. Planificación de ensayos experimentales para estimar el grado de influencia de distintos parámetros de mecanizado en la rugosidad superficial.
4. Realización de los ensayos experimentales con el control y conocimiento de todos los parámetros de mecanizado implicados en el proceso.

5. Medición de la rugosidad en cada una de las zonas de las piezas tipo mecanizadas, para cada tipo de herramienta, cada tipo de operación y cada tipo de estrategia de mecanizado. Obtención de los perfiles de rugosidad correspondientes, con los distintos parámetros de rugosidad. Toma de fotografías de los diferentes perfiles de rugosidad obtenidos.
6. Desarrollo de los modelos analíticos cuando se aplica el Diseño de Experimentos. Con ello se determina el grado de influencia de cada variable y la interrelación entre ellas para llegar a establecer unos modelos predictivos del acabado superficial obtenido en los procesos de fresado.
7. Análisis de los resultados obtenidos en relación a los parámetros de rugosidad superficial estudiados.
8. Conclusiones para cada caso concreto de experimentación realizada.

En relación a la documentación presentada, se han seguido las recomendaciones para la presentación de tesis doctorales elaboradas por el *Servei de Biblioteques, Publicacions i Arxius* y la *Oficina de Doctorat de la UPC*, con atención a la normativa UNE 50136:1997 (ISO 7144:1986).

1.3. Medios de investigación.

Para el desarrollo de la metodología citada anteriormente se dispuso inicialmente del siguiente equipamiento propio de la Fundación CIM, en colaboración con el Departamento de Ingeniería Mecánica de la UPC.

- Software *CAD* para el diseño de las piezas a fabricar: *CATIA*.
- Software *CAM* para generar los programas de *CNC*: *POWERMILL* v.6. Otros programas disponibles *MASTERCAM* v.8, *HYPERMILL* v.6.
- Centro de Mecanizado de Alta Velocidad *DECKEL MAHO* modelo *DMU 50 eVolution*. Velocidad de giro máxima: 18.000 min⁻¹, con control *CNC Heidenhain* i430 (Figura 1.1) y potencia máxima de husillo máquina: 10 kW. Grado de equilibrado husillo máquina, G2,5.

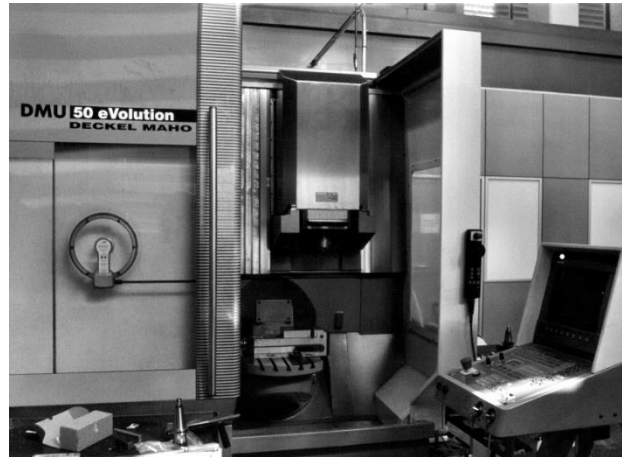


Figura 1.1. Centro de mecanizado Deckel.

Se planificaron algunos ensayos experimentales en otros centros de mecanizado para contrastar los resultados experimentales. Gracias a la colaboración del centro tecnológico ASCAMM, con su centro de mecanizado vertical Deckel, con control *CNC* Heidenhain i530 y gracias a la empresa Tecnoperfil, con su centro de mecanizado Makino, con control *CNC* Heidenhain i530. Tanto el centro tecnológico como la empresa están especializados en la fabricación de moldes y matrices.

- Máquina óptica de medición 3D tipo Mitutoyo (ACE) *QUICK VISION* para visualizar y medir el desgaste de las herramientas y para visualizar el aspecto del acabado superficial (Figura 1.2), con distintas ampliaciones: zoom 1: 36 aumentos (36X); zoom 2: 72 aumentos (72X); zoom 3: 216 aumentos (216X). Los diferentes aumentos también pueden ser indicados a partir del tamaño de de la ventana de captación de la imagen correspondiente: (a) 6,324 mm x 4,717 mm; (b) 3,134 mm x 2,339 mm; (c) 1,048 mm x 0,783 mm.



Figura 1.2. Máquina óptica de medición Mitutoyo.

- Máquina de medir rugosidad y perfiles *TAYLOR HOBSON “Talysurf Serie 2”* (Figura 1.3). La incertidumbre de la medición para parámetros de amplitud de la rugosidad, con este dispositivo, dada por el certificado de calibración del fabricante es $\pm (2\% + 0,004 \mu\text{m})$. La resolución del rugosímetro utilizado para la medición de los resultados de los experimentos era de $0,0001 \mu\text{m}$. Como ejemplo de la calibración, en este certificado se muestra que para un valor de rugosidad medio de $Ra = 0,70 \mu\text{m}$ (se redondea al valor más cercano de $0,01 \mu\text{m}$), la desviación típica obtenida es, $s_c = 0,003 \mu\text{m}$ y la máxima incertidumbre expandida, $U_c = \pm 0,021 \mu\text{m}$ (Taylor 2004). Esta incertidumbre de medición se obtiene a partir de la incertidumbre típica combinada, u_c , multiplicada por un factor de recubrimiento $k=2$, tal que garantiza un nivel de confianza del 95%. Salvo indicación contraria, el palpador del rugosímetro siempre debe realizar su desplazamiento perpendicular al rayado característico del acabado superficial obtenido mediante un determinado proceso de fabricación, tal como se muestra en la Figura 1.3.

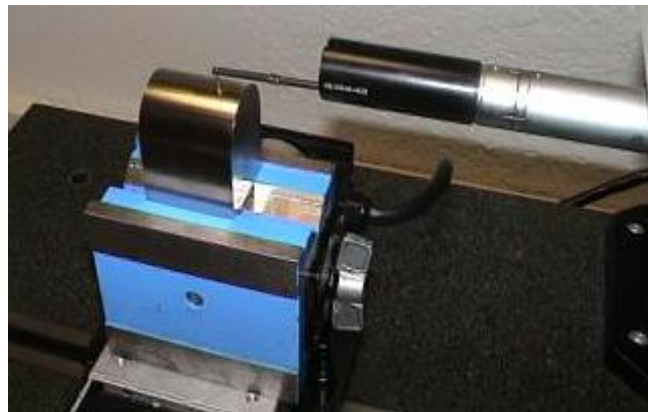


Figura 1.3. Medición con rugosímetro Taylor Hobson.

1.4. Base conceptual de la calidad superficial.

Como indicador de la calidad o estado superficial de una pieza se emplea el perfil de superficie o rugosidad (Figura 1.4) y sus parámetros R , que se encuentran bien definidos en la normativa vigente UNE-EN ISO 4287:1999 (ISO 4287:1997). Según la norma internacional ISO4287, para definir la calidad superficial de una pieza es necesario determinar una serie de parámetros obtenidos mediante un instrumento de contacto o rugosímetro.

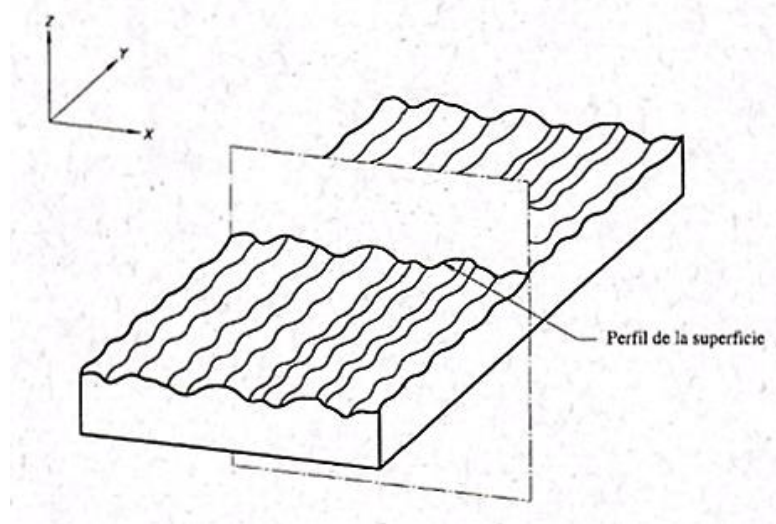


Figura 1.4. Perfil de la superficie. Fte.: (ISO 4287:1997).

La norma UNE-EN ISO 4288:1998 (ISO 4288:1996) establece las reglas y procedimientos para la comparación con los límites de tolerancia de los valores medidos de los parámetros de estado superficial definidos en distintas normas internacionales, como la norma ISO 4287, ISO 12085, ISO 13565. En concreto, la norma ISO 4288 también especifica las reglas a considerar por defecto, para la elección de la longitud de onda de corte, λ_c (filtro superior del perfil de rugosidad) cuando se miden parámetros de rugosidad, conforme a la norma ISO 4287, mediante rugosímetros o instrumentos de contacto (de palpador) según la norma ISO 3274 (ISO 3274:1996). La banda de transmisión de los perfiles de rugosidad viene definida por los filtros de perfil λ_s (filtro inferior del perfil de rugosidad) y λ_c (Figura 1.5). La relación por defecto entre estos filtros viene dada por la norma ISO 3274.

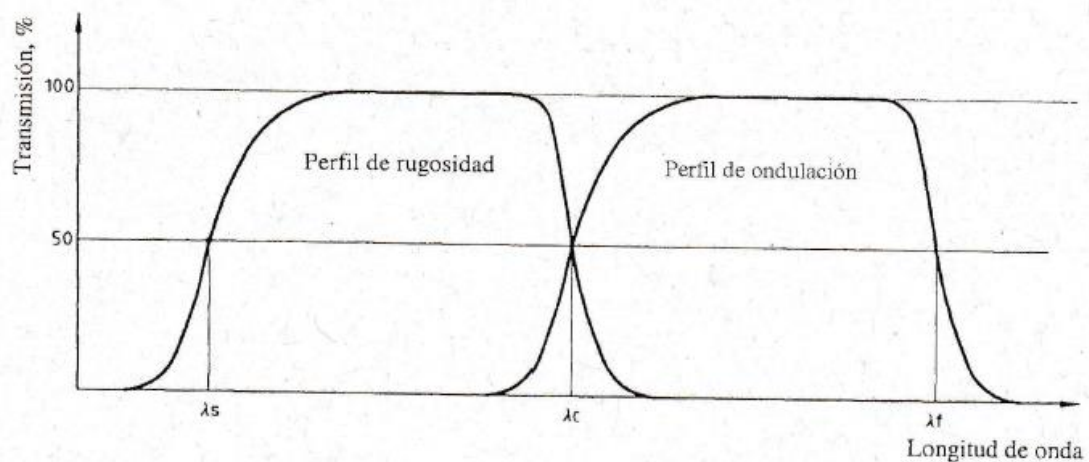


Figura 1.5. Características de transmisión de los perfiles de rugosidad y de ondulación. Fte.: (ISO 4287:1997).

Debe distinguirse entre el término “acabado superficial”, o calidad superficial que describe las características geométricas de una superficie, en base a los parámetros de rugosidad (objeto de la presente tesis) y el término “integridad superficial” que se refiere a las propiedades del material, como la resistencia a la fatiga y la resistencia a la corrosión (Kalplakjian, 2008).

Otra definición a tener en cuenta es la textura superficial que contempla términos como la rugosidad, ondulación, imperfecciones y las desviaciones de forma, en una área delimitada. Las desviaciones de forma y ondulaciones presentes en las superficies de una pieza se estudian a partir de las definiciones, términos y parámetros de tolerancias para cotas dimensionales lineales y angulares (sin indicación individual de tolerancia en plano) según norma UNE-EN 22768-1:1994 (ISO2768-1:1989) y los parámetros de tolerancias para cotas geométricas según norma UNE-EN 22768-2:1994 (ISO2768-2:1989).

Las imperfecciones en la textura de la superficie no son consideradas en las normas citadas anteriormente, simplemente, se indica que las medidas deberían ser tomadas allí donde no existan estas irregularidades. La norma UNE-EN ISO 8785:2000 (ISO 8785:1998) define las imperfecciones superficiales que pueden presentarse en una pieza e indica que son zonas a evitar para la medición de los parámetros de rugosidad. Estas imperfecciones o irregularidades en la superficie de un componente se producen por errores accidentales en los procesos fabricación, almacenamiento o por el propio uso de la superficie. Esta norma ha identificado una extensa lista de imperfecciones superficiales que se enumeran a continuación: hendiduras, surcos, arañazos, grietas, poros, sopladuras, rechupes externos, fisuras, mermas, huellas circulares cóncavas/convexas, abolladuras, protuberancias, verrugas, burbujas, escamas, cuerpos extraños, rizados, rebabas, depósitos.

El parámetro de rugosidad, R_a , es uno de los más utilizados a nivel industrial y académico y corresponde a la media aritmética de las desviaciones verticales del perfil de rugosidad, con respecto a la línea media, comprendida en una longitud de muestreo (o longitud básica). La longitud de muestreo, l_r , es la longitud en la dirección del eje X , utilizada para identificar las irregularidades que caracterizan al perfil en evaluación (ISO 4287:1997).

Por otra parte, las longitudes de muestreo de los perfiles de rugosidad son iguales a las longitudes de onda características de los filtros de perfil, λ_c . En la Ec. 1.1 y en la Figura 1.6 queda reflejado el concepto del parámetro de rugosidad R_a .

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

Ec. 1.1

Donde $Z(x)$ es la altura del perfil de rugosidad a lo largo del eje X . La variable l , es la longitud de muestreo (ó lr) donde se evalúa el parámetro de rugosidad Ra .

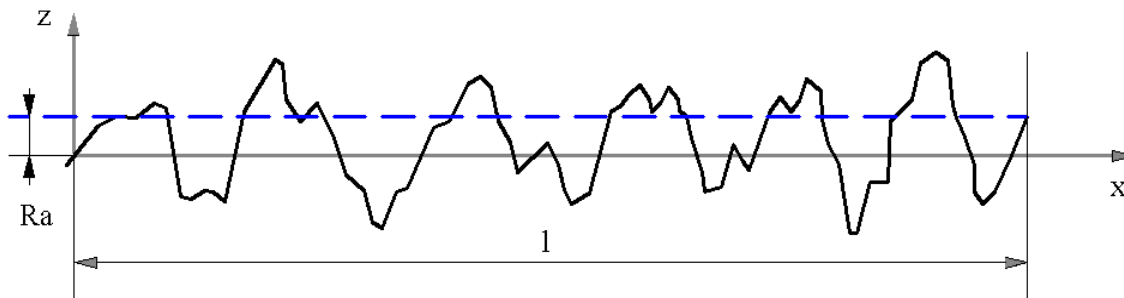


Figura 1.6. Representación del parámetro Ra . Fte.: (Predev, 1998).

La norma UNE-EN ISO 1302:2002 (ISO 1302:2002) presenta una tabla con la comparación del parámetro de rugosidad Ra y los números de calidades de rugosidad correspondientes para especificar la rugosidad sobre los planos de diseño de piezas (Tabla 1.1).

Tabla 1.1. Valores de rugosidad estándar frente a números de calidades de rugosidad. Fte.: (ISO 1302:2002).

Ra [μm]	Números de Calidades
12,5	N10
6,3	N9
3,2	N8
1,6	N7
0,8	N6
0,4	N5
0,2	N4
0,1	N3
0,05	N2
0,025	N1

Según se indica en la norma ISO 1302:2002, para poder asegurar que un requisito de calidad superficial no es ambiguo, además de la indicación del parámetro de calidad superficial y su valor numérico (posiciones a y b), puede ser necesario especificar unos requisitos adicionales: longitud de muestreo (posición a), proceso de fabricación (posición c), surcos superficiales y su orientación (posición d), tolerancias de mecanizado (posición e). Estos requisitos de calidad superficial deben indicarse en distintas posiciones sobre un símbolo gráfico completo (Figura 1.7).

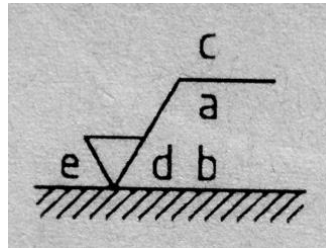


Figura 1.7. Posiciones para la localización de los requisitos complementarios. Fte.: (ISO 1302:2002).

El parámetro de rugosidad, o parámetro de amplitud, Ra , mide las irregularidades verticales de las superficies a medir. Si existen irregularidades horizontales no las considera, por lo que es posible que superficies con distinto acabado superficial presenten el mismo valor de Ra , tal como se muestra en la Figura 1.8.

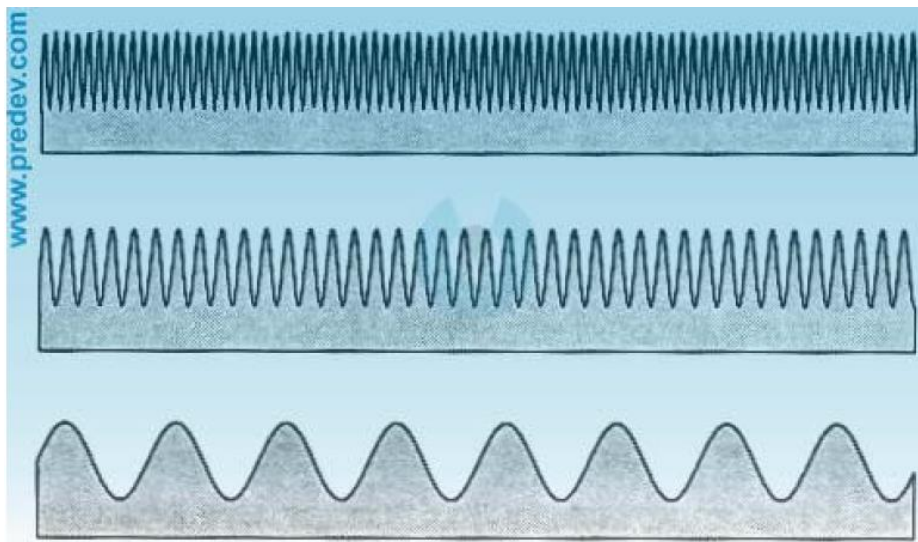


Figura 1.8. Distintas superficies con igual parámetro Ra . Fte.: (Predev, 1998).

Por este motivo, es recomendable utilizar otro parámetro de rugosidad que contemple las irregularidades horizontales en las piezas de estudio. Como se mostrará posteriormente en las

experimentaciones realizadas, el parámetro de rugosidad o parámetro de espaciamiento, RSm , es adecuado y complementa al parámetro Ra , para caracterizar el estado superficial de una pieza. El parámetro de rugosidad RSm expresado según la Ec. 1.2, mide la anchura media de los elementos del perfil, comprendida en una longitud de muestreo.

$$RSm = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m X_{Si} \quad \text{Ec. 1.2}$$

Donde X_{Si} es la anchura de un elemento de perfil, m es el número de elementos de perfil presentes en el perfil de rugosidad, en una longitud de muestreo. Un elemento del perfil de rugosidad comprende una zona alta o pico y una zona baja o valle, con una anchura X_{Si} , tal como puede apreciarse en la Figura 1.9.

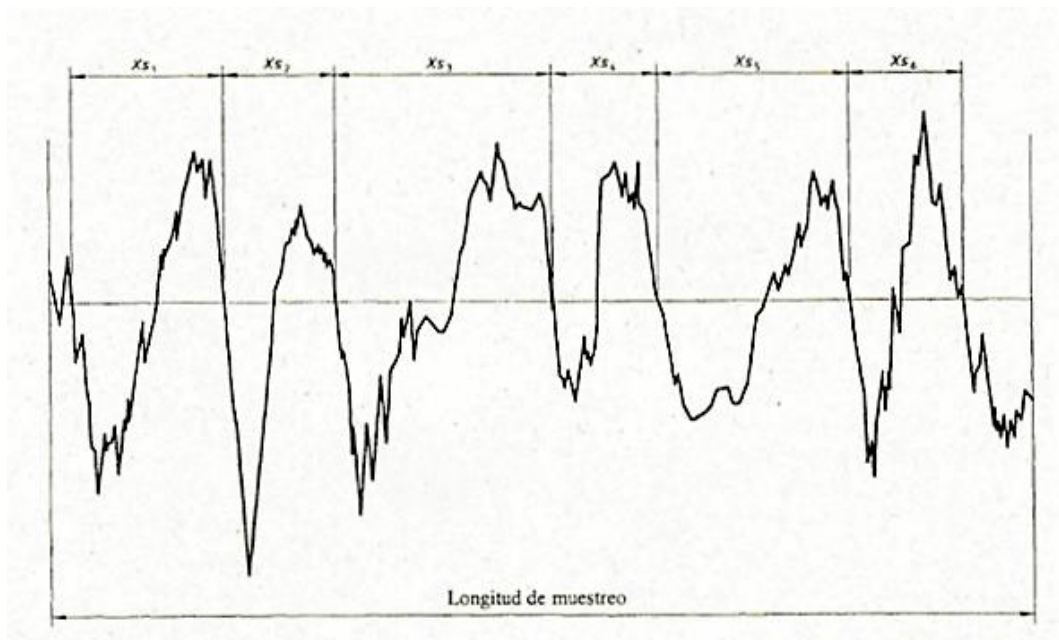


Figura 1.9. Anchura de los elementos del perfil. Fte.: (ISO4287: 1997).

En esta tesis se han considerado, principalmente, los parámetros de rugosidad detallados anteriormente, necesarios para cumplir con las exigencias en calidad superficial para el proceso de mecanizado, en las operaciones de fresado, en la fase de acabado. Otros parámetros de rugosidad importantes se tienen en cuenta, en determinados sectores industriales, o para acabados superficiales específicos de otros procesos de fabricación, o en función de la aplicación de los componentes.

Un parámetro de rugosidad, especialmente utilizado en ámbitos académicos, es el parámetro de amplitud, R_t , que representa la suma de la máxima altura de pico, Z_p y de la máxima profundidad de valle, Z_v , comprendidas en una longitud de evaluación (ISO 4287:1997). La longitud de evaluación, l_n , es la longitud, en la dirección del eje X , utilizada para evaluar el perfil de rugosidad. Por defecto, se tomará un valor de longitud de evaluación igual a 5 veces la longitud de muestreo (ISO 4288:1996).

En ámbitos académicos, se suele tomar la siguiente relación entre parámetros de amplitud (Artiga 2001): $R_t \sim (4-8) \cdot R_a$. El valor 4 (el más habitual), se emplea en la medición de superficies rugosas donde se aprecian visualmente las alturas de cresta. El valor 8 se emplea en rugosidades muy finas, con valores de rugosidad muy bajos. Esta relación es aproximada, pues depende del nivel de la fase de arranque de viruta (acabado-semiacabado-semidesbaste-desbaste), del proceso de fabricación implicado y por lo tanto de la forma del perfil de rugosidad obtenido.

La rugosidad R_t presenta el inconveniente que sólo tiene en cuenta el pico más alto y el valle más profundo, por lo que es sensible a la presencia de imperfecciones superficiales. Para minimizar este inconveniente se puede emplear un parámetro de rugosidad similar al anterior, el parámetro de amplitud R_z , que muestra la máxima altura del perfil y representa la suma de la máxima altura de pico, Z_p y de la máxima profundidad de valle, Z_v , comprendidas, en este caso, en una longitud de muestreo (Figura 1.10). Este parámetro siempre debe cumplir la condición $R_z \leq R_t$, con una relación aproximada, $R_z \sim 0,85 \cdot R_t$ (Artiga 2001).

Por otra parte, es necesario destacar que este parámetro sufrió una variación en su definición en la nueva norma, que definen los parámetros de rugosidad, ISO 4287:1997, respecto a la anterior norma ISO 4287-1:1984. Por lo que debe vigilarse como se utiliza este parámetro en planos, documentos técnicos, o rugosímetros (ISO 4287:1997). En la norma antigua ISO 4287-1:1984, la rugosidad R_z , indicaba la “altura de las irregularidades en diez puntos”, y se calculaba el promedio de 5 alturas de pico y 5 alturas de valle, en la longitud de muestreo.

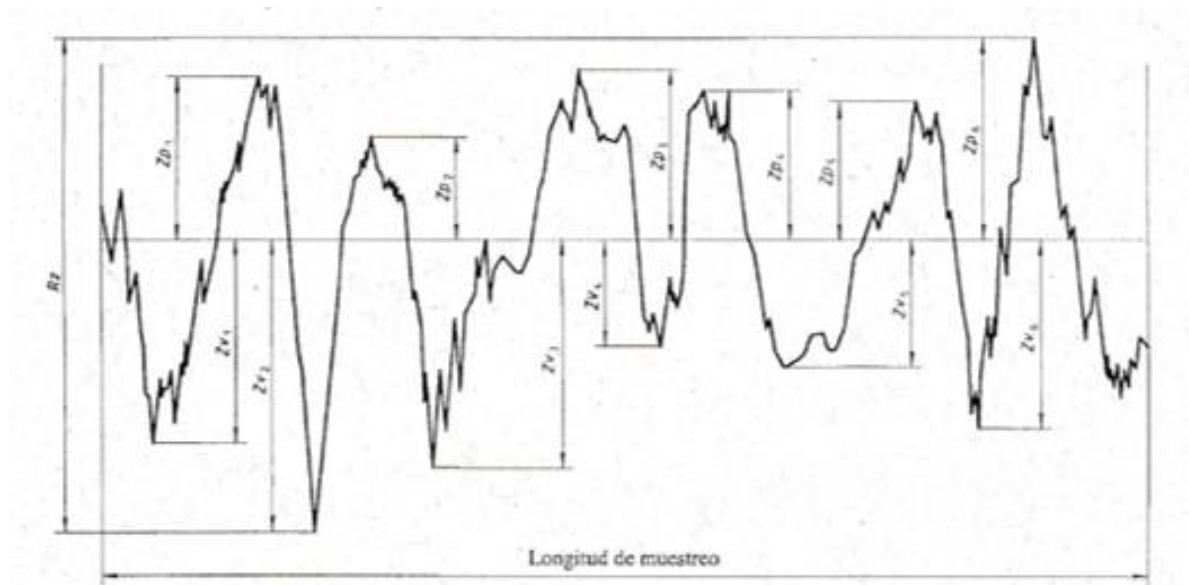


Figura 1.10. Parámetro de rugosidad R_z . Fte.: (ISO 4287:1997).

El estado superficial de una pieza a verificar puede ser homogéneo o ser diferente en diferentes zonas, por lo que es necesario establecer unas reglas o formas distintas de indicar e interpretar los límites de especificación de calidad superficial: la “regla del 16%” y la “regla del valor máximo”. Con la aplicación de estas reglas básicas se podrá considerar una superficie aceptable o no, según los requisitos especificados en los dibujos, planos o documentos técnicos de la pieza. Estas reglas se detallan en la norma ISO 4288:1996 y en la norma ISO 1302:2002.

La “regla del 16%” se define por defecto como la regla para todas las indicaciones de los requisitos de calidad superficial. Cuando los requisitos se especifican por medio del límite superior (o inferior) del parámetro de rugosidad, la superficie se considera aceptable si como máximo el 16% de todos los valores medidos del parámetro considerado, es superior (o inferior), al valor especificado en los planos o documentos técnicos de la pieza (ISO 4288:1996).

En la Figura 1.11 se muestra la indicación del parámetro de rugosidad donde se aplica la “regla del 16%”, con la banda de transmisión por defecto ($\lambda_s - \lambda_c$), tal que para una rugosidad $R_a = 0,70 \mu\text{m}$ le corresponde un valor de $\lambda_s = 0,0025 \text{ mm}$ y de $\lambda_c = 0,80 \text{ mm}$.

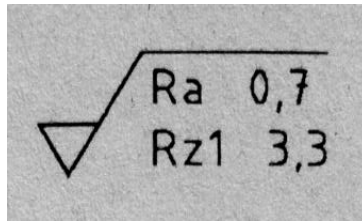


Figura 1.11. Indicación de los parámetros Ra y Rz en los dibujos. Fte.: (ISO 1302:2002).

Si se debe aplicar la “regla del valor máximo” al requisito de calidad superficial, debe añadirse “máx.” a la designación del parámetro de rugosidad correspondiente.

En la Figura 1.12 se muestra un ejemplo con los resultados de medición de los distintos parámetros de rugosidad comentados anteriormente (Ra , RSm , Rt , Rz). Esta imagen pertenece a uno de los experimentos realizados para uno de los estudios en concreto que se detallaran más adelante.

El perfil de rugosidad mostrado es homogéneo, periódico, a lo largo de toda la longitud de evaluación analizada. En este caso, para una longitud de muestreo $lr = 0,8$ mm, le corresponde por defecto, una longitud de evaluación, $ln = 5 \cdot 0,8 = 4$ mm. La distancia mínima que requiere el palpador del rugosímetro para realizar la medición es igual a la longitud de evaluación más una longitud de muestreo. En este caso se requiere una longitud de superficie plana de medición superior a los 4,8 mm, en la dirección perpendicular al rayado característico y principal de la superficie. Este hecho debe ser tenido en cuenta cuando se utilizan los rugosímetros con palpador de contacto, ya que la complejidad geométrica en una pieza puede delimitar su uso e impedir la medición de la rugosidad según la normativa.

Taylor Hobson

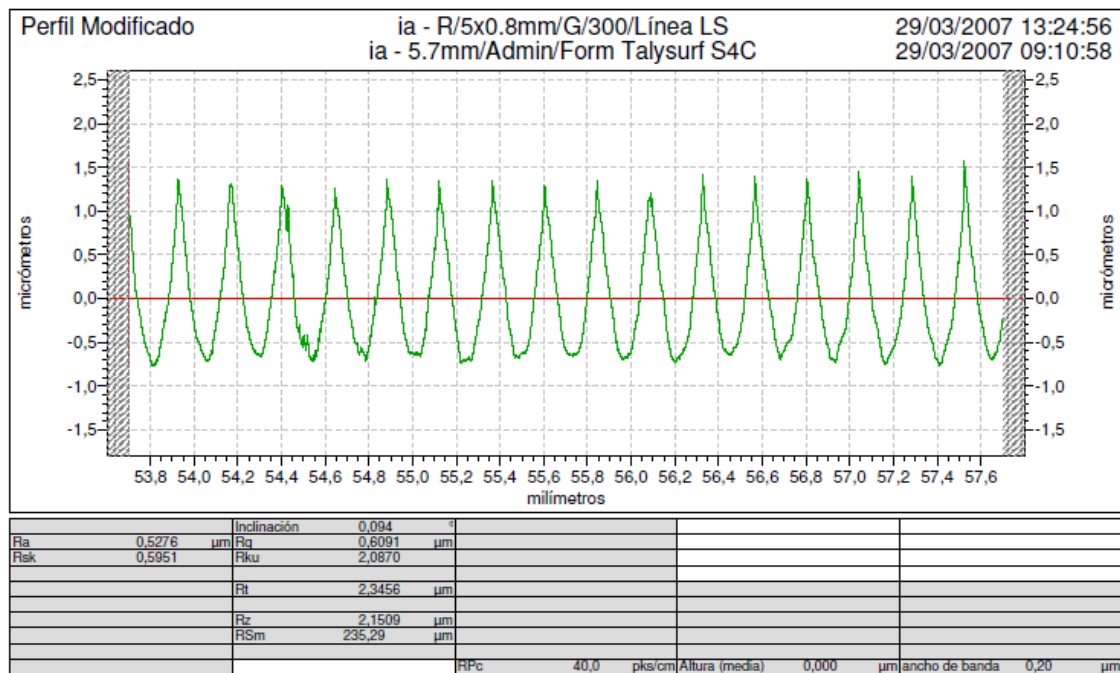


Figura 1.12. Ejemplo de datos obtenidos en la medición de los parámetros de rugosidad.

Según la norma UNE-EN ISO 4288:1998 (ISO 4288:1996), se establece el filtro del perfil de rugosidad, λc (o longitud de muestreo lr) en función del rango de rugosidad. En la Tabla 1.2 se muestran estos valores para los perfiles de rugosidad Ra y Rz .

Tabla 1.2. Filtro del perfil de rugosidad, λc frente parámetros de rugosidad Ra , Rz . Fte.: (ISO 4288:1996).

Rz [μm]	Ra [μm]	λc [mm]
$< 0,025$	$\leq 0,02$	0,08
$< 0,1$	$0,02 < Ra \leq 0,1$	0,25
$< 0,5$	$0,1 < Ra \leq 2$	0,8
< 10	$2 < Ra \leq 10$	2,5
< 50	$10 < Ra \leq 80$	8

1.5. Herramientas de corte para operaciones de fresado.

Las herramientas de corte se seleccionan en función de múltiples parámetros, como el tipo de operación de mecanizado a ejecutar, el volumen del material a arrancar (desbaste, acabado) y el material de trabajo a mecanizar. Las características y propiedades principales de las herramientas de corte utilizadas en operaciones de mecanizado quedan limitadas por tres aspectos básicos: el material base o sustrato, las características geométricas y el recubrimiento superficial. Los distintos fabricantes de herramientas de corte disponen de catálogos específicos de herramientas para el mecanizado de los distintos componentes de moldes y matrices, en las distintas fases de desbaste y acabado (Tungaloy 2011).

Respecto a las características geométricas de las herramientas de corte utilizadas en las operaciones de fresado (conocidas en el taller como “fresas”), en la fase de acabado se emplean herramientas integrales, de un único material base. En la Figura 1.13, se muestran diferentes tipos de herramientas.

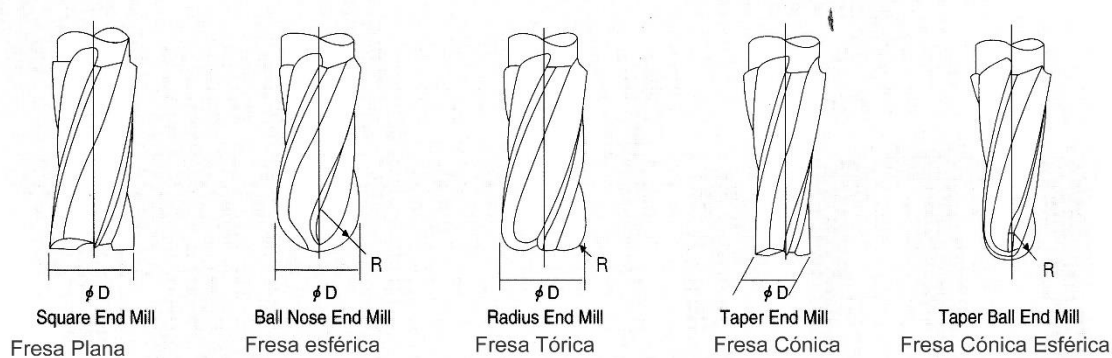


Figura 1.13. Distintos tipos de herramientas de fresado. Fte.: (Korloy 2012).

Las fresas planas se emplean principalmente en operaciones de contorneado o de escuadrado. Cuando se requiere un refuerzo de las puntas, con un filo más robusto, o redondeado de las esquinas de la pieza a mecanizar, se utilizan las fresas tóricas, con distintos radios de la punta de la herramienta (por ejemplo: 0,5 mm, 1 mm ó 2 mm). Cuando se realiza el acabado final de paredes inclinadas, a veces se recurre a fresas cónicas con distintos ángulos de inclinación de las aristas de corte respecto al eje de la herramienta (por ejemplo, los ángulos para mecanizado de moldes de inyección de plásticos: 0,5°, 1°, 1,5°; los ángulos para mecanizado de matrices de forja: 3°, 5°).

En la Figura 1.14, como ejemplo, se muestran los distintos parámetros de diseño variables en las herramientas integrales, para el caso concreto de las fresas de punta plana, de 4 aristas de corte (4 labios). Este tipo de fresas se emplean en las operaciones de contorneado para el fresado de superficies verticales.

En la Figura 1.14 también se aprecia cómo varía la sección transversal, en función del número de aristas de corte. A menor número de aristas de corte, con una menor sección transversal del núcleo de la herramienta se produce una mayor evacuación de la viruta mecanizada, pero se reduce la rigidez de la herramienta, pues el diámetro del núcleo de la herramienta es menor. Para aumentar la rigidez de la herramienta, y reducir la flexión de la misma, debe seleccionarse la longitud de corte mínima, necesaria para realizar la operación de mecanizado.

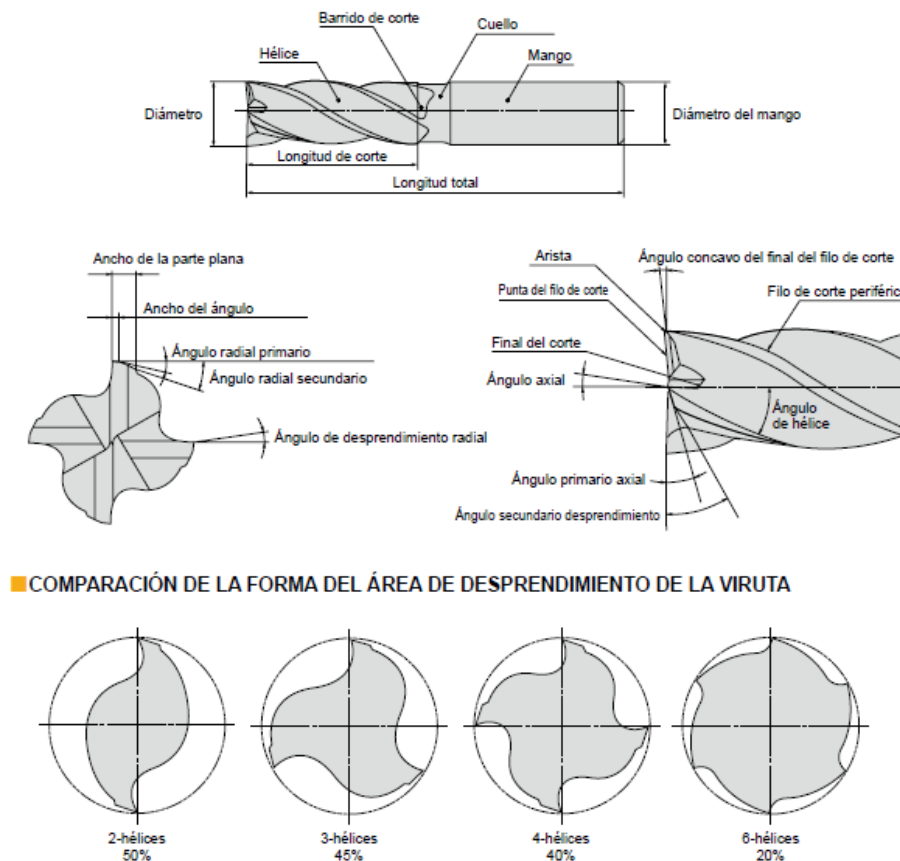


Figura 1.14. Características geométricas de fresas de punta plana. Fte.: (Mitsubishi 2014).

Las fresas de punta plana con 2 y 3 aristas de corte, se utilizan principalmente para operaciones de ranurado (Figura 1.15, derecha), y las fresas de 4 a 6(8) aristas de corte, para operaciones de contorneado (Figura 1.15, izquierda).

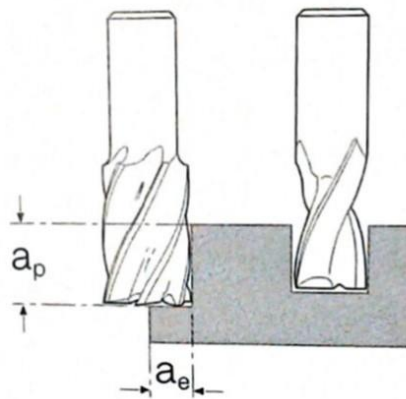


Figura 1.15. Operación de contorneado (izquierda) y ranurado (derecha). Fte.: (Sartorius 2008).

En las operaciones de contorneado con fresa de punta plana (Figura 1.15), en condiciones de fresado en alta velocidad, la profundidad de corte crítica y más limitada será la profundidad de corte radial a_e .

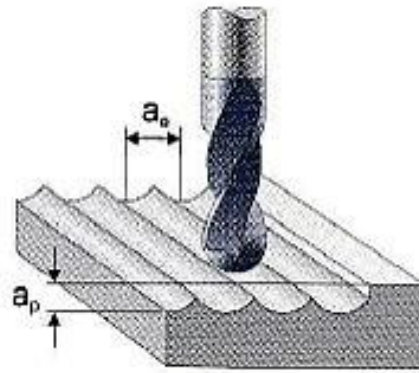


Figura 1.16. Contorneado con fresa de punta esférica. Fte.: (Hitachi 2003).

En las operaciones de contorneado, pero con fresa de punta esférica (Figura 1.16), en condiciones de fresado en alta velocidad, la profundidad de corte crítica será la profundidad de corte axial a_p . Todo ello debido a que un aumento no controlado o limitado de estas profundidades de corte críticas provocaría un aumento de la temperatura de proceso elevado, que puede llevar al desgaste prematuro de la herramienta (Utiltall 2002). Con herramienta de punta esférica, la operación de contorneado se realiza con fresas de 2 ó 4 aristas de corte.

Actualmente, algunos fabricantes de herramientas de corte, en sus catálogos de producto (Mitsubishi 2016), se han adaptado a la normativa ISO 13399, para la notación y definición más concreta de las características geométricas de las herramientas de corte (ISO 13399-2:2014). Por ejemplo, el diámetro de corte de la herramienta se identifica por DC , o la longitud de corte pasa a denominarse máxima profundidad de corte, con la notación $APMX$. Esta adaptación a la normativa de los fabricantes de herramienta de corte, permitirá obtener bibliotecas de herramientas con sus características bien definidas y transferirlas rápidamente a los programas de simulación o gestión de los procesos de mecanizado.

1.6. Selección de las condiciones de corte

Como punto de partida para establecer las condiciones de corte, es muy útil utilizar los catálogos de los principales fabricantes de herramientas de corte y comparar las distintas opciones y condiciones de corte, según la operación, material a mecanizar y herramienta de corte seleccionada (Kobelco 2002). En general las condiciones de corte limitadas en las operaciones de fresado son el avance por diente, f_z [mm/diente], la velocidad de corte, V_c [m/min] y las profundidades de corte axial y radial, ap [mm] y ae [mm] respectivamente. A partir de estos datos iniciales se extraen las condiciones de corte para la programación de la máquina, la velocidad de giro, S [min^{-1}] (Ec. 1.3) y la velocidad de avance lineal de la herramienta, F [mm/min] (Ec. 1.4).

$$S = \frac{V_c \cdot 1000}{\pi \cdot D} \quad \text{Ec. 1.3}$$

Donde D [mm] es el diámetro de herramienta de corte, del elemento en rotación.

$$F = z \cdot f_z \cdot S \quad \text{Ec. 1.4}$$

Donde z es el número de labios o aristas de corte de la herramienta, f_z [mm/diente] es el avance por diente, por arista de corte. El avance por revolución f [mm/rev] en las operaciones de fresado se calcula al multiplicar estas dos variables, z y f_z .

Es importante adaptar las condiciones de corte a la geometría de la pieza a mecanizar y cumplir con la calidad superficial exigida. Por otra parte la máquina-herramienta debe disponer de las suficientes prestaciones, en cuanto a velocidades máximas de giro y de avance lineal. Las condiciones de corte se limitarán en función del tipo concreto de herramienta, su diámetro de corte, operación de

mecanizado o del material de trabajo. Por ejemplo, se muestra a continuación la selección de las condiciones de corte a establecer para el fresado de acero endurecido (con dureza 45-55 HRC), en la operación de contorneado de superficies planas, al utilizar las siguientes herramientas integrales de metal duro, con recubrimiento, con diámetro de corte $D = 6$ mm, según el catálogo del fabricante (Mitsubishi 2014):

- VF-SD D6 (Herramienta de punta plana y con 6 aristas de corte): $ap \leq 1,5 \cdot D$, $ae = 0,3$ mm; $S = 16.000 \text{ min}^{-1}$, $F = 5.800 \text{ mm/min}$.
- VF-2SB R3 (Herramienta de punta esférica y con 2 aristas de corte): $ap < 0,25$ mm, $ae \leq 0,2 \cdot R$; $S = 21.000 \text{ min}^{-1}$, $F = 8.400 \text{ mm/min}$ (si $\alpha < 15^\circ$); ó $S = 13.000 \text{ min}^{-1}$, $F = 2.600 \text{ mm/min}$ (si $\alpha > 15^\circ$). Donde α es el ángulo de inclinación de la superficie respecto el eje horizontal.

Las condiciones de corte más elevadas para la herramienta de punta esférica VF-2SB, en superficies con un ángulo $\alpha < 15^\circ$, son debidas a la consideración de la velocidad de corte efectiva, en función del diámetro efectivo de corte real.

Para herramientas de punta esférica, en operaciones de mecanizado de superficies planas, se utiliza la Ec. 1.5 para obtener el diámetro efectivo de corte de la herramienta, De [mm], función de la profundidad de corte axial, ap [mm] y del diámetro de corte de la herramienta de punta esférica, D [mm].

$$De = 2 \cdot \sqrt{ap \cdot (D - ap)} \quad \text{Ec. 1.5}$$

Donde ap es la profundidad de corte axial y D el diámetro de la herramienta de punta esférica.

La Ec. 1.5 es útil cuando se plantean las condiciones de corte para una operación de mecanizado en concreto, pues las condiciones de trabajo deben hallarse dentro de unos límites, en función de las características del proceso de mecanizado, en especial, en función del tipo y dureza del material de la pieza a mecanizar y de la herramienta de corte. Para unas condiciones de mecanizado concretas, al considerar el diámetro efectivo, para una velocidad de corte limitada por el proceso, se puede calcular una velocidad de giro mayor y por lo tanto un avance lineal mayor.

Para este tipo de operaciones de mecanizado, y en especial en la fase de acabado, la profundidad de corte axial ap , siempre será inferior al radio de la herramienta y el diámetro efectivo De , inferior al diámetro de la herramienta, D , tal como puede apreciarse en la Figura 1.17 (Sartorius 2008). En el

caso de la herramienta de punta plana, el diámetro de la herramienta, siempre es igual al diámetro efectivo, para cualquier profundidad de corte axial.

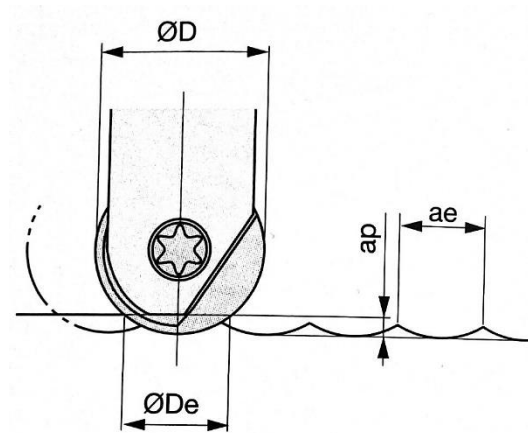


Figura 1.17. Diámetro efectivo D_e , función de a_p . Fte.: (Sartorius 2008)

Al establecer los valores de las profundidades de corte, por ejemplo, al definir el excedente de material para la fase de acabado, deben vigilarse los valores mínimos de estas profundidades de corte. En función de la geometría de la herramienta y el desgaste que se irá produciendo en el proceso de mecanizado, con unos valores muy pequeños de las profundidades de corte axial y radial, la herramienta no podrá cortar de forma óptima el material y simplemente se deslizará y friccionará sobre la pieza de trabajo. Este hecho elevará la temperatura del proceso y provocará esfuerzos residuales que influirá en el acabado y en la integridad superficial de la pieza (Kalpakjian 2008).

Por otra parte, en herramientas de punta esférica, para fresado en alta velocidad en la fase de acabado, Sandvik recomienda no superar unas profundidades de corte de 0,2 mm, para evitar excesiva flexión en la herramienta y mantener una elevada precisión geométrica a nivel de tolerancias, al mecanizar moldes y matrices (Sandvik 1999). También indica que en muchos casos, es favorable seleccionar una profundidad de corte radial igual al avance por diente, para obtener un acabado superficial más suave y uniforme en todas las direcciones y una textura superficial simétrica que permitirá un pulido posterior más fácil.

Por este motivo, en operaciones de fresado, en la fase de acabado, es interesante calcular el espesor medio de viruta, h_m . Una expresión aproximada utilizada, para las operaciones de fresado periférico (contorneado), tal como se muestra en la Ec. 1.6 (Sandvik 1994). Esta ecuación relaciona el avance por diente, f_z y la profundidad de corte radial, a_e , cuyos valores cuantitativos, en mecanizado en alta velocidad, suelen ser muy pequeños, por lo que dará unos resultados de espesor medio de viruta

también muy pequeño. Sandvik recomienda para fresado periférico valores de hm entre 0,04 – 0,20 mm, aunque este valor se debería concretar para un determinado diámetro de herramienta, a las características y dureza del material a mecanizar (Marín 1997).

$$hm = fz \cdot \sqrt{\frac{ae}{D}}$$

Ec. 1.6

Donde ae , es la profundidad de corte radial y D el diámetro de la herramienta de corte.

1.7. Estimación de la rugosidad en operaciones de fresado

En los procesos de fabricación mediante arranque de viruta, en concreto, en el proceso de mecanizado mediante fresado, para estimar el paso o profundidad de corte radial, Rd [mm] (ó ae [mm]), en función del acabado exigido es habitual trabajar con el parámetro geométrico que indica el acabado superficial teórico o altura de cresta, h [μm] (Figura 1.18). Parámetro que se equipara al parámetro de rugosidad Rt .



Figura 1.18. Acabado superficial teórico o altura de cresta, h . Fte.: (Hitachi 2003).

Cuando se utilizan como herramientas de corte, fresas de punta esférica, con diámetro de corte, D [mm], para evaluar la rugosidad superficial se formula la ecuación geométrica (Ec. 1.7) para fresado de superficies planas (Figura 1.18), en operaciones de copiado, tal como se muestra en la Figura 1.19.

$$h = \frac{D - \sqrt{D^2 - ae^2}}{2} \cdot 1000$$

Ec. 1.7

Donde ae [mm] es la profundidad de corte radial, D [mm] es el diámetro de corte de la herramienta.

Para la Ec. 1.7, el paso de herramienta o profundidad de corte radial Rd , siempre debe ser inferior al diámetro de la herramienta. En general, es habitual utilizar, en operaciones de acabado, un paso inferior al 5% del diámetro de corte de la herramienta.

Es interesante señalar en este punto que la fórmula teórica utilizada habitualmente para calcular la altura de cresta, h , en las operaciones de torneado (Ec. 1.8), puede emplearse también para operaciones de fresado, siempre que se realicen unos cambios básicos en las variables empleadas, para cada tipo de herramienta de corte.

Con herramientas de punta plana, el avance por revolución f debe tener en cuenta, el número de aristas de corte de la herramienta y R , será el radio de corte de la herramienta (a diferencia en las operaciones de torneado, donde R representa el radio de punta de la plaquita o inserto). En el caso de herramientas de punta esférica, para hallar la altura de cresta h es necesaria la sustitución de la variable, avance por revolución, f [mm/rev], por la profundidad de corte radial, ae [mm] (Ec. 1.9).

$$h = \frac{1000}{8} \cdot \frac{f^2}{R} \quad \text{Ec. 1.8}$$

Donde la variable R es el radio de corte de la plaquita o inserto en la operación de torneado, o es el radio de la herramienta de punta plana en la operación de fresado.

$$h = \frac{1000}{8} \cdot \frac{ae^2}{R} \quad \text{Ec. 1.9}$$

Donde la variable R es el radio de corte de la herramienta de punta esférica.

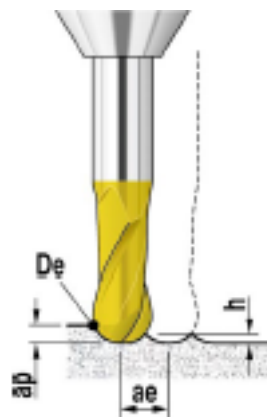


Figura 1.19. Altura de cresta, h sobre superficie plana. Fte.: (Uitall 2002).

De la Ec. 1.7, pueden extraerse unos resultados interesantes, al variar los parámetros de corte implicados. En general, para unos valores iniciales de paso o profundidad de corte radial ae y diámetro de herramienta D , si se dobla el paso, se multiplica aproximadamente por 4, el resultado de la altura de cresta inicial. En cambio si se dobla el diámetro de herramienta, sólo se disminuye a la mitad la altura de cresta, tal como se puede apreciar en la Figura 1.20 y como se muestra en la Tabla 1.3, con un ejemplo cuantitativo concreto.

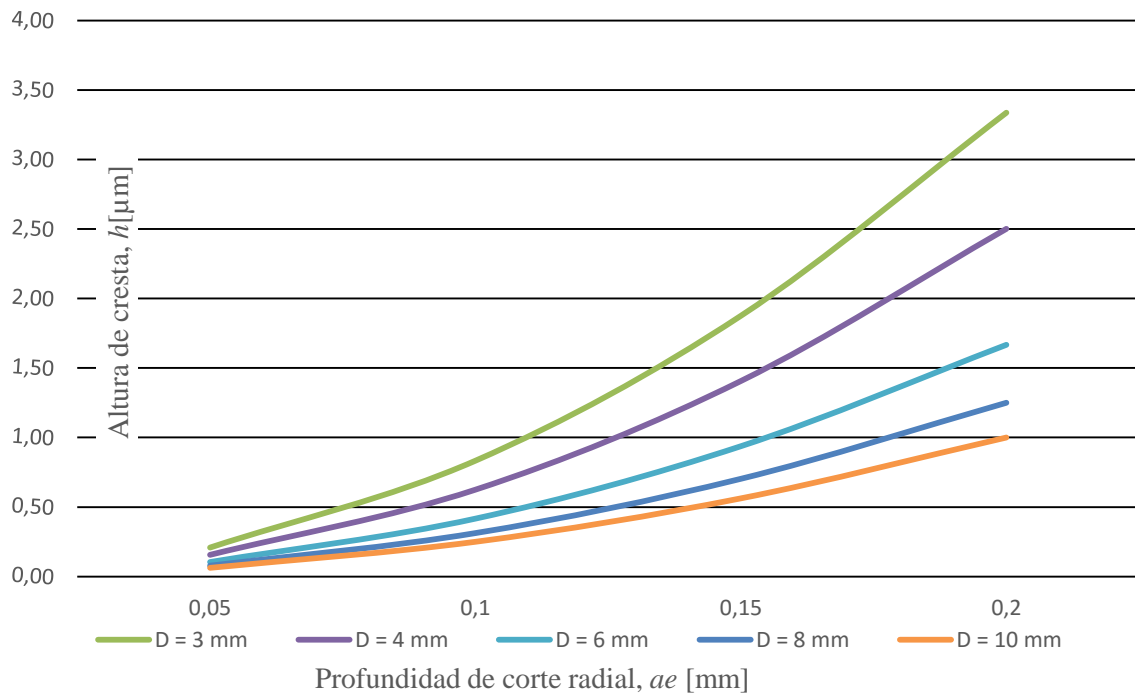


Figura 1.20. Altura de cresta, h , sobre superficie plana, en función de las variables D y ae .

También puede apreciarse en la Figura 1.20 que para valores bajos de la profundidad de corte radial, ae , la diferencia en los valores resultantes de la altura de cresta h (según Ec. 1.7), entre distintos diámetros de herramienta se reduce considerablemente.

Tabla 1.3. Relación de la altura de cresta, h , respecto las variables ae y D .

h [μm]	ae [mm]		
D [mm]	0,05	0,10	0,20
3	0,21	0,83	3,34
6	0,10	0,42	1,67

Al mecanizar superficies inclinadas con un ángulo α , para conocer la altura de cresta h en función de un paso constante o profundidad de corte radial ae , perpendicular a la superficie a mecanizar, también puede utilizarse la Ec. 1.9, tal como se muestra en la Figura 1.21. Si se considera un paso vertical, ae_v que tenga en cuenta el ángulo de inclinación α , debe realizarse el cambio de variables en la Ec. 1.9, mostrado en la Ec. 1.10.

$$ae = \frac{ae_v}{\cos\alpha} \quad \text{Ec. 1.10}$$

Donde ae_v es la profundidad de corte radial en sentido vertical y α el ángulo de inclinación de la superficie respecto el eje horizontal.

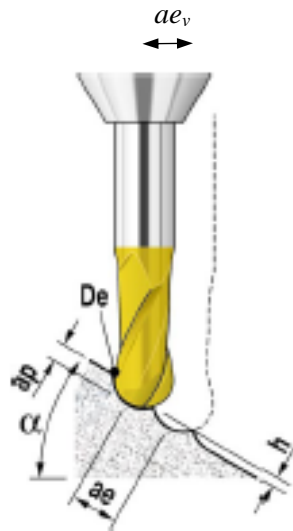


Figura 1.21. Altura de cresta, h en superficie inclinada. Fte.: (Uiltall 2002).

En superficies planas e inclinadas, para el cálculo de la altura de cresta geométrica, se puede emplear la Ec. 1.11, siempre que se considere el paso, ae , perpendicular a la superficie (como se representa en la Figura 1.21). En este caso la trayectoria de la herramienta sería horizontal.

$$h = R \left(1 - \cos \left(\frac{1}{\sin \left(\frac{ae}{2R} \right)} \right) \right) \quad \text{Ec. 1.11}$$

Donde R es el radio de la herramienta de corte.

También puede obtenerse la expresión trigonométrica del diámetro efectivo de la herramienta de corte (Ec. 1.12), sobre una superficie inclinada con un ángulo α , respecto el eje horizontal.

$$De = 2 \cdot \left(\left(\frac{ap}{\operatorname{tg} \alpha} + \sqrt{ap \cdot (D - ap)} + \frac{D}{2 \cdot \operatorname{tg}(90 - \alpha)} \right) \cdot \cos \alpha - \frac{ap}{\operatorname{sen} \alpha} \right) \quad \text{Ec. 1.12}$$

Donde D es el diámetro de corte de la herramienta y ap la profundidad de corte axial.

En una operación de copiado o contorneado plano, tal como se ha mostrado en la Figura 1.19, puede evitarse trabajar con la punta de la herramienta, si se inclina el eje de la herramienta respecto al eje vertical, un ángulo β (por ejemplo: $10^\circ - 15^\circ$, en Figura 1.22).

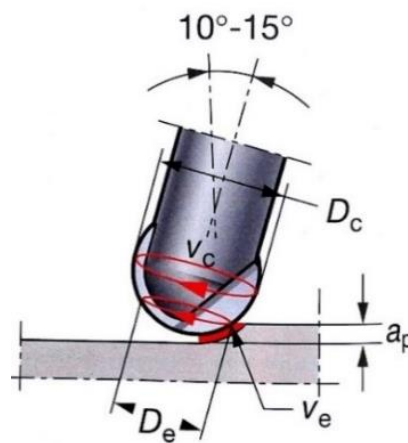


Figura 1.22. Inclinación de herramienta de corte. Fte: (Sandvik 1999).

De esta forma, se evita trabajar con un valor de velocidad de corte efectiva, V_{ce} (v_e en Figura 1.22) muy próximo a cero. Al considerar el ángulo de inclinación de la herramienta, respecto al eje vertical de la superficie a mecanizar, el diámetro efectivo de la herramienta De calculado según la Ec. 4, para superficie plana y eje vertical de la herramienta, pasa a redefinirse, según la Ec. 1.13:

$$De = D \cdot \sin \left[\beta \pm \arccos \left(\frac{D - 2 \cdot ap}{D} \right) \right] \quad \text{Ec. 1.13}$$

Donde D (ó D_c en la Figura 1.22) es el diámetro de corte de la fresa de punta esférica.

1.8. Moldes y matrices.

La palabra molde tiene muchas acepciones, por lo que es difícil precisar lo que se entiende por molde si no se detalla para una aplicación concreta. “Un molde es aquella pieza en la cual se hace en hueco la figura que en sólido quiere darse a la materia fundida que en él se vacía, como por ejemplo, cera, yeso, metal, etc” (Rein 1965).

Los distintos componentes de un molde o matriz se fabrican en la misma empresa y/o se subcontrata la fabricación de determinados componentes, en especial, los componentes normalizados o estandarizados, como casquillos, placas portamoldes o portamatrices, punzones, varillas extrusoras, etc (Hasco 2017).

De forma simplificada, en la Figura 1.23, Sandvik presenta todas las fases necesarias para la elaboración de moldes o matrices genéricas, desde la recepción de los materiales, hasta el envío del producto (Sandvik 2002).

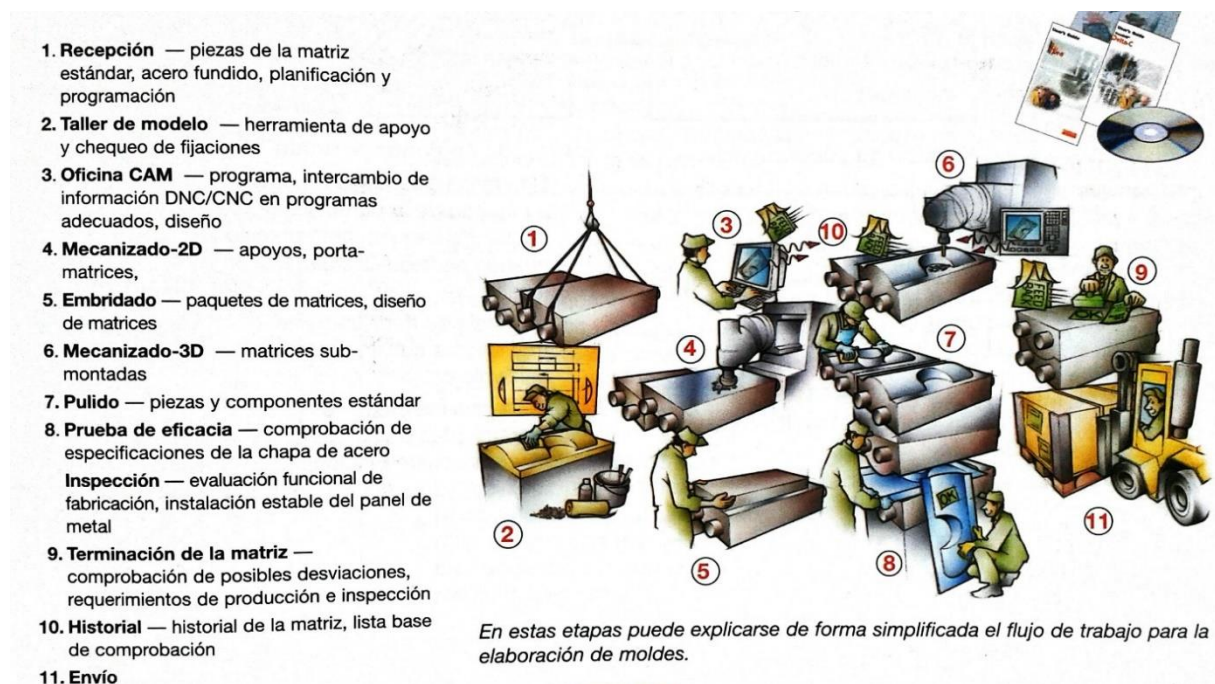


Figura 1.23. Fases para la fabricación de moldes o matrices. Fte.: (Sandvik 2002).

Como se aprecia en la Figura 1.23, la fabricación de moldes y matrices, se divide en multitud de fases que deben ser planificadas y ejecutadas en el orden correcto, para la realización de los componentes fabricados. La logística es compleja, pues intervienen diversas máquinas-herramienta y diferentes

operarios. Al final todos los componentes (fabricados y normalizados) deben ser ensamblados para obtener el producto definitivo (molde o matriz) con la calidad exigida, en el tiempo y coste requerido.

Existe una clasificación básica entre moldes no permanentes (de arena) y moldes permanentes (metálicos). Y respecto a los moldes metálicos, se diferencian los moldes con entrada del material fundido por gravedad (moldes coquilla), o inyectado a presión (alta o baja en función de la complejidad de la pieza).

En la Figura 1.24 puede observarse la complejidad de un molde metálico para inyección de plásticos, por la cantidad de componentes que deben ser ensamblados y ajustados, para aportar la calidad exigida en las piezas elaboradas. El diseño de este molde se ha realizado con el programa de dibujo 3D de SOLIDWORKS, a partir de su programa estándar que incluye el diseño de moldes y matrices (SOLIDWORKS 2017). Este programa ofrece todas las herramientas de dibujo necesarias para un diseño de moldes y matrices rápido y efectivo, tanto para la obtención de componentes plásticos como metálicos, así como la integración al programa de bases de moldes, de componentes normalizados de los principales proveedores de moldes. Además se complementa con el programa de simulación por elementos finitos, *SOLIDWORKS Plastics* que permite predecir y evitar defectos de fabricación en las primeras fases del diseño de moldes de inyección y piezas de plástico.



Figura 1.24. Ejemplo de molde de inyección de plásticos. Fte.: (SOLIDWORKS 2017).

El fabricante de elementos normalizados de moldes Hasco explica en un artículo que la principal tendencia del sector es el aumento en la fabricación de moldes complejos y de alta productividad, con elevados requerimientos de fiabilidad para la reducción de los costes de producción y mantenimiento (Gorriti 2017). Cualquier componente de un molde puede influir en estos aspectos, desde el sistema de inyección, la calidad de los aceros, sus recubrimientos, los expulsores, guiado, etc.

Por otra parte, las matrices son los dispositivos adecuados para el trabajo de corte de metales, estampado, embutido o forjado de los mismos. Con el empleo de matrices son varias las operaciones que pueden realizarse: curvado, arrollado o agrafado, estampado de forma, recalado, roblonado y aplanado. Al igual que un molde, una matriz se compone de multitud de componentes: matriz o base, punzón, macho o estampa, sujetadores y extractores (Valenciano 1966).

Un ejemplo de la sección de una matriz de embutición, con todos los elementos ensamblados que la componen, se muestra en la Figura 1.25, junto a la pieza básica a obtener a partir de una lámina de espesor limitado, considerada como disco de partida.

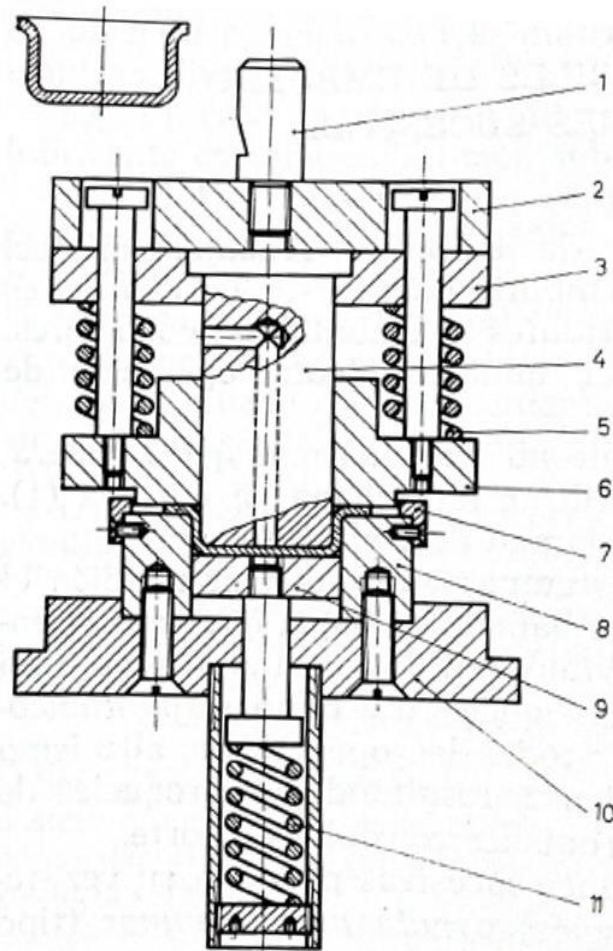


Fig. 6,01. — Estampa de embutición directa con prensachapa. *Parte superior:* 1, mango; 2, contraplaca; 3, placa portapunzones; 4, punzón; 5, muelles; 6, prensachapa. *Parte inferior:* 7, toques de posicionamiento de la chapa; 8, matriz; 9, expulsor; 10, base inferior; 11, muelle de accionamiento del expulsor.

Figura 1.25. Ejemplo de matriz de embutición. Fte.: (Valenciano 1966).

En un artículo reciente, Schulz daba algunos detalles en relación al estado de la industria de fabricación de moldes y matrices en 2017 (Schulz 2017). En Europa el sector es optimista por el aumento de las ventas y se incrementa la cooperación entre fabricantes para ser más competitivos. Es imparable la integración de la fabricación aditiva en distintos componentes y la aplicación de las bases de la Industria 4.0 para un mayor conocimiento y control de los procesos.

Los fabricantes de herramientas de corte crean programas específicos de herramientas para moldes y matrices, para todas las operaciones de mecanizado, ya sea en la fase desbaste o en la fase de acabado (Tungaloy 2011). Un ejemplo se muestra en la Figura 1.26, con la serie completa de herramientas de

corte TUNGMEISTER de TUNGALOY, para el mecanizado de moldes, con una gran variedad y versatilidad de herramientas de corte para todas las operaciones de fresado que sean requeridas para la fabricación de cualquier componente del molde.



Figura 1.26. Serie de herramientas de corte para moldes. Fte.: (Tungaloy 2011).

Los diseñadores de moldes y matrices pueden lograr mejores trabajos, mejoras en la calidad y un rendimiento del diseño del producto de larga durabilidad con el software de diseño adecuado que permite reducir los costes de desarrollo, fabricación y el tiempo total de salida al mercado del producto.

Gracias al software *AutoForm-StampingAdviser^{plus}* (AutoForm 2017), un programa específico de simulación por elementos finitos para la ingeniería de fabricación de piezas de chapa metálica a partir de las matrices diseñadas (Figura 1.27). Con este programa, se comprueba la fuerza de compresión a ejercer para obtener la geometría requerida y si pueden existir defectos en la chapa estampada como adelgazamientos excesivos, pliegues indebidos o roturas de la pieza.

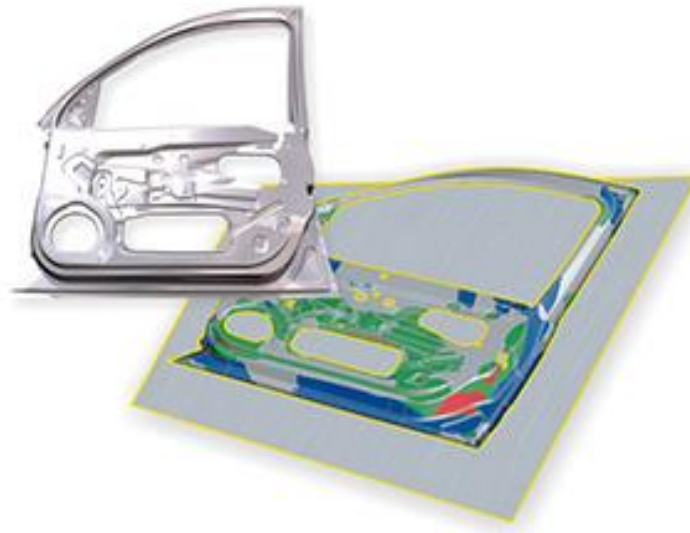


Figura 1.27. Simulación proceso de estampación. Fte.: (AutoForm 2017).

De igual manera existen diferentes programas de simulación del proceso de inyección de plásticos o metales en los moldes correspondientes. Con estos programas se comprueba la presión, velocidad de llenado y temperatura de material que fluye hacia el interior del molde. De esta forma, antes de la producción real de las piezas, es posible detectar defectos de pieza (porosidad, juntas frías, llenados incompletos). Por ejemplo, la compañía ESI Group ofrece un paquete de software completo, con el programa ProCAST&QuitCAST-Salsa 3D, para una simulación avanzada rápida y eficiente con una evaluación completa del proceso de fundición, con la predicción de distorsiones y tensiones residuales y con la simulación para el cálculo y dimensionado del sistema de alimentación (ESI Group 2017).



Figura 1.28. Ejemplo mallado componentes de un molde con programa QuitCAST. Fte.: (ESI Group 2017).

Arrazola [et al.] presentaron un estudio sobre el fresado a alta velocidad de aceros templados de moldes y matrices donde plantearon la tabla mostrada en la Figura 1.29 (Arrazola 1999). En la Figura 1.29 se muestra para distintos procesos de fabricación, los aceros característicos de los distintos tipos de moldes de inyección, matrices de forja, matrices de estampación, con los parámetros de rugosidad y tolerancias más utilizados en cada sector.

Sector	Tipo de material	Dureza HRC	Rugosidad Rt	Tolerancias	Radios de acuerdo
Forja	F1252 F528	42-60	5-10 μm	0,2 mm	1,5 mm mínimo
Inyección de plásticos	ORVARTM STAVAXTM THYROPLASTTM	48-50	1 μm (0,5 Ra) acabado a espejo	0,01 mm en zonas de ajuste	aristas vivas
Inyección de aluminio	ORVARTM	50-55	1-2 μm	0,05 mm	variados
Estampación	GG25 GGG70	220-270 HBN	20 μm	0,1 mm en zonas libres	pequeños

Figura 1.29. Ejemplo de parámetros de acabado superficial en función del sector de fabricación. Fte.: (Arrazola 1999).

2. ESTADO DEL ARTE.

En este apartado se presenta un resumen de la investigación del estado del arte realizado, relacionado con la temática de esta tesis, todo ello para obtener un mayor conocimiento de los distintos parámetros y/o variables más importantes que influyen en las operaciones de acabado en los procesos de mecanizado y en concreto, en los procesos de fresado en alta velocidad de moldes y matrices.

2.1. Mecanizado en Alta Velocidad.

Es difícil conocer a partir de qué momento surge el proceso de Mecanizado en Alta Velocidad, MAV (*High Speed Machining, HSM*) o con alta velocidad de corte (*High Speed Cutting, HSC*). El profesor H. Schulz del *Institute of Production Management, Technology and Machine Tools, (ITW, Darmstadt University of Technology, Germany)*, fija cronológicamente estos conceptos, en abril de 1931, a partir de la presentación de la patente alemana nº 523.594, referida al “*Method of machining metal or materials behaving similarly when being machined with cutting tools*”, donde se ponía de manifiesto como disminuye la temperatura del proceso a partir de cierto valor de la velocidad de corte, en función del tipo del material. 50 años más tarde, el instituto *ITW* fue el primer centro de investigación de Europa que empezó a investigar sobre alta velocidad de corte. Hoy en día es un centro de referencia de esta tecnología (Schulz 2004). En general, se considera mecanizado en alta velocidad frente el mecanizado convencional a partir de velocidades de corte elevadas (V_c [m/min]) entre 5-10 veces superiores a las velocidades de corte convencionales, en función del material, tal como se muestra en la Figura 2.1.

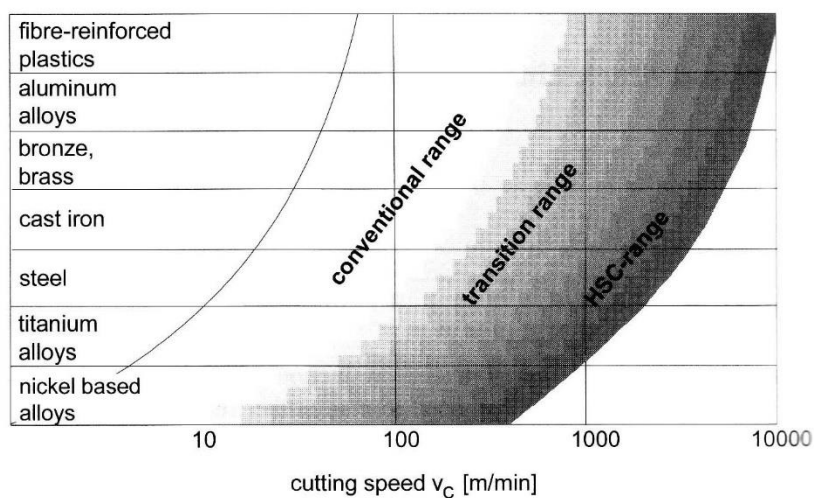


Figura 2.1. Velocidad de corte en función del material. Fte: (Dashchenko 2003).

Por ejemplo para una aleación de acero el rango de velocidades de corte elevadas estaría entre 500-1.500 m/min aproximadamente. Este intervalo es menor si se concreta la operación de mecanizado y la composición o dureza del material. Las ventajas principales que presenta este proceso de mecanizado son las siguientes (Schulz 2004):

- Disminución de las fuerzas de corte con el incremento de la velocidad de corte
- Eliminación del calor del proceso con la viruta
- Mejor calidad superficial
- Elevado volumen de corte.

Actualmente, el término de mecanizado en alta velocidad se ha complementado con los términos de mecanizado con alto rendimiento (*High Performance Machining, HPM*), más empleado en operaciones de desbaste (también fresado de alto avance, o en inglés: *High Feed Milling, HFM*) y mecanizado con alta precisión (*High Accuracy Machining, HAM*), más empleado en aquellas aplicaciones donde se exigen tolerancias dimensionales y/o geométricas muy precisas.

Byrne [et al.] presentaron un artículo interesante sobre tecnologías de corte avanzadas, donde mostraron un resumen de los avances en el diseño y los materiales de herramientas de corte, junto a ejemplos de rendimientos en distintas operaciones de mecanizado (Byrne 2003).

El uso de la tecnología de fabricación basada en el mecanizado en alta velocidad, se ha ampliado no sólo al sector de la fabricación automovilística o aeronáutica, sino a todos los sectores de la fabricación mediante procesos de mecanizado en los cuales se solicitan una calidad y precisión muy exigentes. En muchas empresas de estos sectores de fabricación, y especialmente en las empresas fabricantes del sector del molde y matriz, la tecnología MAV se entiende como un proceso de mecanizado con altas revoluciones y altos avances, para materiales templados y con el que se obtiene un buen acabado superficial (Echepare 1999).

Pero debe tenerse en cuenta que el concepto de alta velocidad y altos avances es relativo, depende del tipo de material de la pieza y del tipo de herramienta. La operación de mecanizado debe realizarse con unas condiciones de corte máximas para obtener un rendimiento óptimo del proceso. Con las nuevas herramientas de corte creadas por los fabricantes es posible obtener una gran eficiencia en el proceso de fresado de aceros templados, con la reducción de los tiempos de proceso y con la reducción o eliminación de operaciones de electroerosión (Kobelco 2001).



Figura 2.2. Postizo de un molde de inyección de plástico. Fte.: (Makino 2003).

Para obtener los beneficios que supone utilizar la tecnología MAV, es necesario ser consciente de todas las tecnologías implicadas en el proceso. Conocer los límites de cada tecnología supone conseguir la máxima fiabilidad y rentabilidad del proceso. Estas tecnologías deben encontrarse en equilibrio y bien engranadas entre sí, para obtener una producción en el mínimo tiempo y coste posible. Las tecnologías implicadas son las siguientes: la máquina-herramienta, el control numérico, el programa de mecanizado y sus estrategias, las herramientas de corte y sus condiciones de corte, el material de trabajo y su geometría (Figura 2.2), los sistemas de sujeción de pieza y herramientas. Estas tecnologías están evolucionando constantemente, pero de forma independiente, para dar unas mayores prestaciones al proceso de mecanizado.

Los programas de mecanizado en teoría permiten obtener un acabado superficial teórico determinado, pero en la práctica, su resultado no es siempre correcto, pues sólo contemplan parámetros geométricos entre la interacción herramienta-pieza, sin considerar otros aspectos que limitan el proceso de mecanizado, como el desgaste de la herramienta de corte, la dinámica de la máquina y las características propias o avanzadas del control numérico de la máquina.

Se ha observado una colaboración cada vez más estrecha para el desarrollo del MAV, por ejemplo, entre fabricantes de máquinas y herramientas. En 1993, la colaboración entre el fabricante de máquinas Matsuura y el fabricante de herramientas de corte Kobelco, logró mejorar las prestaciones de máquinas y herramientas para el mecanizado de aleaciones de titanio con condiciones de corte en alta velocidad para este material. También es necesaria la colaboración entre programas de mecanizado (*CAM, Computer Aided Manufacturing*) y los fabricantes de herramientas (PowerMill-Kobelco, en 2002) para mejorar las estrategias de mecanizado, con una mayor duración de las herramientas. Otra colaboración directa, fabricantes de máquinas y su control *CNC* (Deckel-Heidenhain en 2002) para controlar de forma más eficiente los parámetros dinámicos de la máquina.

Con este panorama, el fabricante de moldes y matrices, de manera aproximada, ajusta los parámetros de corte según un criterio subjetivo, en base a sus conocimientos y experiencia, con lo que los tiempos y costes de máquina o de operario reales para obtener el acabado final exigido son muy variables y pueden oscilar en un porcentaje de $\pm 20\%$ (Altan 2001).

La rugosidad superficial requerida para los distintos componentes de los moldes de inyección es aproximadamente $Ra = 0,01-0,10 \mu\text{m}$ y para matrices de estampación, $Ra = 0,60-1,20 \mu\text{m}$. Para el rango mayor de rugosidad, estas superficies son obtenidas directamente mediante operaciones de fresado o por electroerosión y para el rango menor con operaciones de rectificado (Nowicki 1993). El mecanizado abrasivo (rectificado automático o pulido manual) se utiliza usualmente para la eliminación de los trazos o rayado típico del fresado, para eliminar la capa blanca generada en la electroerosión y obtener al final la precisión del perfil de la pieza y la textura superficial deseada. El tiempo total de fabricación de una gran matriz de estampación representa entre 1.000-3.000 horas (valor muy variable en función del tamaño de la matriz). El tiempo de mecanizado para la fase de acabado puede representar hasta un 50% del tiempo total.

López de Lacalle [et al.] estiman hasta un 30%, la reducción de tiempos de fabricación de matrices, especialmente en la operación de acabado superficial obtenido mediante pulido manual (López de Lacalle 2002), frente a las operaciones más automatizadas mediante el uso de los centros de mecanizado. Un ejemplo real de tiempos de fabricación de una pequeña matriz de estampación se muestra en la Figura 2.3, donde se presenta una comparativa entre un proceso de fabricación convencional y un proceso utilizando la tecnología MAV.

Step	Hours	Total €
<i>Conventional machining</i>		
CAD/CAM	8	198
First machining (preparation of blank)	2	49
Machining	7	168
Polishing	7	359
Total	24	774
<i>High speed machining</i>		
CAD/CAM	12	290
First machining (preparation of blank)	2	49
Rough machining	4	96
Finishing machining HSM	1	60
Polishing	1	52
Total	20	547

Figura 2.3. Tiempos y costes de fabricación de una matriz. Fte.:(López de Lacalle 2002).

Existen algunos libros relacionados con el mecanizado en alta velocidad (López de Lacalle 1999), (Dudzinski 2001) y (Schulz 2001), donde se reúnen diversos artículos de investigación de diversos autores, presentados en diferentes congresos nacionales o internacionales, o donde se trata el tema desde el punto de vista del fabricante de máquina-herramienta (Arnone 1998). En la versión electrónica de la revista nacional, *MetalUnivers*, diversos investigadores del Centro de Aplicaciones del Mecanizado de Alta Velocidad de Tekniker, publicaron un documento sobre introducción al mecanizado de alta velocidad (Pérez 2001).

Existen diversos grupos de investigación y centros tecnológicos en España y a nivel internacional que están trabajando en temas relacionados con el mecanizado en alta velocidad desde distintos puntos de vista y en distintos aspectos referentes a las tecnologías implicadas: las máquinas o elementos de máquinas, operaciones concretas de mecanizado, fresado, estrategias de mecanizado, tipos de herramientas, teorías del corte adaptadas, estudio y monitorización de los efectos del proceso, mecanizado de materiales concretos, influencia de la lubricación, mecanizado de moldes y matrices o fresado con 3 y/o 5 ejes. El nombre de los investigadores, sus respectivos grupos de investigación y los artículos que han publicado relacionados con la temática de esta tesis doctoral, son referenciados en especial en este capítulo y el detalle bibliográfico de las publicaciones queda reflejado en el capítulo 8 y posteriores.

Existen conferencias Internacionales específicas sobre el mecanizado en alta velocidad, como por ejemplo la *International Conference on High Speed Machining*, realizada de manera cíclica, entre otros emplazamientos, en Darmstadt (Alemania) o Metz (Francia). Existen varias publicaciones que tratan este tema, entre ellas merece destacarse los volúmenes anuales del *CIRP (College International pour la Recherche en Productique)*, por el número de artículos publicados respecto a este tema, algunos de ellos citados a continuación en los siguientes apartados, por ejemplo: (Van Luttervelt 1998), (Schultz 2000), (Altan 2003).

Entre los grupos más cercanos que investigan, o han investigado, en temas relacionados con el mecanizado en alta velocidad pueden mencionarse los siguientes: Dpto. de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Girona, el Dpto. de Ingeniería Mecánica de la Escuela Superior de Ingeniería de Bilbao, el Dpto. de Mecánica de la Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial de San Sebastián (EUITISS), el Dpto. de Mecánica de la Escuela Politécnica Superior de Mondragón, la Fundación Tekniker, la fundación ASCAMM. A nivel internacional, la escuela *ENSAM* de Burdeos, la escuela *ENIM* de Metz, la *ENI* de Tarbes, el instituto *PTW* de la Universidad Tecnológica de Darmstadt, la *Faculty of Mechanical de Zenica* (Universidad de Sarajevo), entre otros.

A continuación se muestran algunos proyectos subvencionados por el Gobierno Central:

- PROFIT 2000. Aplicación del Mecanizado de Alta velocidad a la fabricación de moldes y matrices en 3 y 5 ejes.
- MINER-Atyca, DE, 1998. Mecanizado de Alta Velocidad MAV.
- Plan Nacional I+D, 2002. Herramientas para la modelización del mecanizado a alta velocidad.
- Plan Nacional I+D, 2002. Diseño óptimo de herramientas para el mecanizado a alta velocidad utilizando herramientas de simulación.

Algunos ejemplos de proyectos subvencionados por el Gobierno Vasco, GV:

- GV; Integrado E: Cooperación, 1997. Aplicación de los Procesos de Mecanizado a Alta Velocidad en la Fabricación de Moldes y Matrices. Desarrollo y Estrategias de Mecanizado. Proyecto ABIACOOOP.
- GV; Integrado B-O-D, 1997. Desarrollo de Procesos de Mecanizado de Alta Velocidad para materiales de Difícil Maquinabilidad. Proyecto ABIADURA.

Desde la fundación ASCAMM se desarrolló el proyecto MAVIM (Gómez 2002), para el estudio de la metodología necesaria para la implantación de la tecnología de mecanizado de alta velocidad para la fabricación de moldes y matrices, definido a partir de las necesidades reales de la empresa y personalizado para cada problemática en concreto. El alcance de la implantación abarca de la oficina técnica, al taller mecánico a la planificación de la producción.

2.2. Modelización del acabado superficial.

El objetivo de las operaciones de mecanizado en la fase de acabado, es obtener la calidad superficial exigida (en relación a la rugosidad superficial y tolerancia dimensional), con un desgaste mínimo de herramienta y con el mínimo tiempo posible, lo que repercute al final en la reducción de los costes de fabricación.

La rugosidad superficial es un parámetro muy utilizado en el sector industrial de la fabricación para evaluar la calidad final de una pieza. Groover además destaca la importancia del control del acabado superficial en las piezas, ya que influye en otros aspectos como la precisión dimensional, o la resistencia a la fatiga, a la corrosión, a la fricción, etc (Groover 2010).

Según la documentación analizada, la caracterización del acabado superficial es compleja por la multitud de variables que pueden intervenir en el proceso de mecanizado, pero los resultados pueden modelizarse a partir de distintos métodos: Método de Taguchi, Diseño de Experimentos (*DOE*), Regresión lineal y análisis de coeficientes de correlación, Análisis geométrico, Algoritmos Genéticos (AG), análisis por Redes Neuronales Artificiales (RNA) o análisis Fractal.

Cada vez más, se intenta adaptar la metodología de experimentación existente para modelizar, caracterizar o predecir el acabado superficial. En algunos casos, ello exige una experimentación de grandes dimensiones, inviable para aplicarlo en el control de un proceso industrial concreto. Es necesario reducir al máximo el número de factores que pueden intervenir, conocer sus limitaciones, y entonces aplicar un método tal que con un mínimo de experiencias permita obtener una predicción bastante ajustada de la respuesta del proceso a controlar. Mathia presentó un estudio sobre las tendencias en metrología superficial, para obtener los distintos parámetros de rugosidad que se requieren en las piezas mecanizadas (Mathia 2011). Poco a poco y según las necesidades, ya sea el sector industrial o los centros tecnológicos están combinando el uso de los rugosímetros electromecánicos convencionales, con palpador, de contacto, con el uso de microscópicos electrónicos adaptados para la medición y supervisión de la rugosidad, de superficies 2D y/o 3D, sin necesidad de tener contacto, gracias a diferentes tecnologías ópticas.

Las investigaciones iniciales sobre el tema se centraron en los factores que afectan a la rugosidad superficial. Boothroyd y Knight (Boothroyd 1989) dividieron el estudio de la rugosidad en dos tipos: la rugosidad ideal obtenida debido a la geometría de la herramienta y al avance; y la rugosidad natural obtenida a partir de irregularidades del proceso de mecanizado como el desgaste de herramienta o la aparición de vibraciones.

Benardos y Vosniakos hacen una revisión del estado del arte en fresado y torneado (Benardos 2003) y plantean dos de los problemas principales de la ingeniería de los procesos de fabricación o de las empresas de este sector. En primer lugar, determinar los valores de los parámetros del proceso que producen la calidad deseada del producto y en segundo lugar, maximizar la productividad del sistema de fabricación en función de los recursos disponibles. Los autores clasifican los factores del proceso según los parámetros de mecanizado, propiedades de la herramienta de corte, propiedades de la pieza y los fenómenos de corte.

Una referencia importante en cuanto al estado del arte de la modelización, es el estudio realizado por el grupo de trabajo del *CIRP* “*Modelling of Machining Operations*” (Van 1998). Este grupo tiene dos

objetivos principales: Promocionar el desarrollo de modelos de operaciones de arranque de viruta con el objetivo de predicción del rendimiento de esas operaciones y promover el uso de modelos de mecanizado en la industria. En referencia a los modelos predictivos de la precisión obtenida en las piezas mecanizadas, se hace énfasis en la gran complejidad de esta modelización, y se nombran 11 grupos de factores de influencia:

- Las especificaciones geométricas de las piezas,
- La geometría de la pieza antes de ser mecanizada,
- El material de la pieza,
- La máquina herramienta en las condiciones de trabajo,
- La posición de la pieza en la máquina herramienta,
- El sistema de fijación de la pieza,
- El método de mecanizado,
- La herramienta de corte,
- Las condiciones de corte,
- El líquido de corte y
- La localización de la interacción herramienta-pieza.

En cuanto a los modelos para la predicción del acabado superficial, en dicha referencia se afirma que el número de modelos es muy limitado, y que el mayor número de conocimientos acerca de la rugosidad superficial son de tipo empírico y basados en experimentos en laboratorios. Se dice que, hasta ahora, muy pocas relaciones en forma matemática entre parámetros de superficie y condiciones de corte son aprovechables. Se comenta que un modelo básico es el que da la rugosidad determinada por el perfil de la herramienta y la forma de los movimientos de ésta respecto a la pieza, y que actualmente, la rugosidad real obtenida puede ser cinco veces mayor debido a los errores de movimiento, a efectos de inestabilidades de crecimiento de arista y a cambios del perfil de la herramienta debido al desgaste, lo que explica la dificultad para la modelización de estos efectos.

En esta referencia también se afirma que existen intentos de modelos predictivos muy limitados, relaciones simplemente geométricas para la rugosidad superficial, y conocidas relaciones complejas entre rugosidad superficial y parámetros operacionales, materiales de trabajo y tipos de rotura de viruta. Y en cuanto a las direcciones futuras de investigación, se apunta el desarrollo de modelos predictivos y el establecimiento de interacciones entre herramienta-viruta con las condiciones de corte y el correspondiente comportamiento del flujo de material.

Alauddin [et al.] desarrollaron un modelo de rugosidad superficial para el proceso de fresado mediante la operación de contorneado en acabado basado en el diseño de experimentos (Alauddin 1995). Se evaluó el parámetro de rugosidad, Ra , a partir de los factores velocidad de corte, avance y profundidad de corte. La herramienta de corte fue una fresa de acero rápido, con diámetro de corte $D = 20$ mm, con una velocidad de corte muy limitada, entre 24 y 40 m/min. El material mecanizado fue un acero al carbono con dureza 190 HB. Una primera estimación del parámetro de rugosidad Ra [μm], se indica a partir de la Ec. 2.1, donde se relaciona el parámetro Ra con distintos parámetros de corte.

$$Ra = \frac{f_z^2}{32 \cdot (R \pm f / \pi)} \quad \text{Ec. 2.1}$$

Donde f_z [mm/diente] es el avance por diente, R [mm] es el radio de la herramienta, y f [mm/rev] es el avance por revolución.

Desde el departamento técnico de fabricación de moldes y matrices del fabricante de herramientas Sandvik (Sandvik 1999), se indica que, en muchos casos, en la operación de fresado con fresa de punta esférica, es favorable seleccionar un avance por diente igual a la profundidad de corte radial o paso de la herramienta, pues así se obtiene un acabado superficial suave en todas las direcciones, con tiempo de mecanizado corto y muy fácil pulido posterior debido a la simetría de la textura superficial. También recomiendan en las operaciones de acabado de aceros templados con altas velocidades de corte, que las profundidades de corte axial y radial no deberían exceder 0,2 mm, para evitar excesiva flexión de la herramienta y mantener altos niveles de precisión dimensional y acabado superficial.

Tsai desarrolló un sistema de predicción de la rugosidad superficial en operaciones de fresado con herramienta integral basado en la vibración y la rotación del husillo de la máquina (Tsai 1999), sobre un bloque de aleación de aluminio AA6061 T6, con fresa integral de *HSS*, de punta plana, con 4 labios. En primer lugar desarrolló un modelo de redes neuronales (*RNA*) con algoritmos de retropropagación, a partir de las siguientes variables de entrada: Velocidad de giro, Avance, Profundidad de corte y la vibración promedio por revolución (*VAPR*). En segundo lugar se evaluó el método de regresión lineal múltiple en comparación con la eficiencia de la red neuronal. Así, Tsai halló que ambos proporcionan una buena predicción del parámetro Ra , pero el modelo basado en *RNA* fue más preciso en un 5%.

Correa [et al.] analizaron los factores que afectan al acabado superficial de los procesos de mecanizado, con la mención de algunas de las técnicas de análisis y modelos predictivos elaborados por diversos grupos de investigación (Correa 2004). Finalmente, estos investigadores realizan la propuesta para un

modelo de predicción de acabado superficial que forma parte de un sistema supervisor inteligente multiobjetivo. Para el modelo de estimación de rugosidad superficial se propone utilizar métodos de regresión lineal a partir de modelos geométricos, métodos experimentales y/o técnicas de inteligencia artificial, como redes neuronales, lógica borrosa o sistemas neuroborrosos que podrían proporcionar mejores ajustes a salidas reales. Este modelo sería una propuesta innovadora para integrar aspectos de calidad superficial a un control en proceso que interactúe con controladores *CNC* de arquitectura abierta.

En un artículo publicado recientemente, Nguyen y Hsu presentaron un análisis experimental de la rugosidad superficial Ra obtenida en el fresado del acero templado *JIS SKD61*, mediante un diseño de experimentos desarrollado a partir del método Taguchi (Nguyen 2016). Este material es equivalente al acero según norma alemana W Nr. 1.2344, pero con notación según norma japonesa (*JIS, Japanese Industrial Standard*). En este estudio se utilizó una fresa integral, de metal duro, de punta plana de 4 labios, (con diámetro, $D = 10$ mm), con recubrimiento TiAlN, para realizar la operación de ranurado. Se analizó la influencia de distintas condiciones de corte establecidas a partir del diagrama de estabilidad de lóbulos, para reducir la aparición de vibraciones en la experimentación:

- Velocidad de corte : 25-50-75 m/min
- avance por diente: 0,01-0,02-0,03 mm/diente
- profundidad de corte axial: 0,2-0,4-0,6 mm y
- dureza del material: 40, 45, 50 HRC.

Dentro de estos intervalos de condiciones de trabajo, el menor valor de rugosidad Ra ($0,12 \mu\text{m}$), se obtiene (en el orden de mayor a menor influencia), con el menor avance por diente (0,01 mm/diente), con la menor profundidad de corte (0,2 mm), con la mayor velocidad de corte (75 m/min), y finalmente con el material de menor dureza (40 HRC).

Baek planteó la optimización del avance en fresado a partir del modelo de rugosidad superficial expresado por la Ec. 2.2 (Baek 2000). Para las condiciones de la experimentación fueron significativos los parámetros de velocidad de corte V_c y profundidad de corte axial A_d , con una gran influencia del avance por revolución f .

$$Ra = 39,48 \cdot A_d^{0,478} \cdot f^{0,743} \cdot V_c^{-0,397}$$

Ec. 2.2

Donde V_c [m/min] es la velocidad de corte, A_d [mm] es la profundidad de corte axial (equivalente al parámetro ap [mm]) y f [mm/rev] es el avance por revolución.

Este nuevo modelo se basó en el análisis de los efectos de los errores de alineación de plaquitas de corte de metal duro (Figura 2.4), sin recubrimiento, con radio fijo en la punta de la arista de corte de las plaquitas montadas sobre un soporte de fresa (con 6 plaquitas intercambiables o insertos de corte), para la operación de planeado. Se analizó también la variación de las fuerzas de corte y su influencia sobre la rugosidad superficial y la precisión dimensional. El material a mecanizar fue el acero según norma AISI 1041 (norma de *American Iron and Steel Institute*).

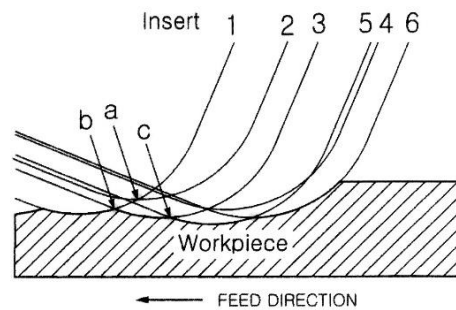


Figura 2.4. Errores de alineación de las plaquitas de corte. Fte.: (Baek 2000).

Sus resultados presentaron un aumento de no linealidad de la rugosidad superficial respecto al avance lineal debido principalmente a los errores de alineación (Figura 2.5) y un aumento de la rugosidad a mayor error de alineación para el mismo avance lineal. Máximo error de alineación o *run-out*.

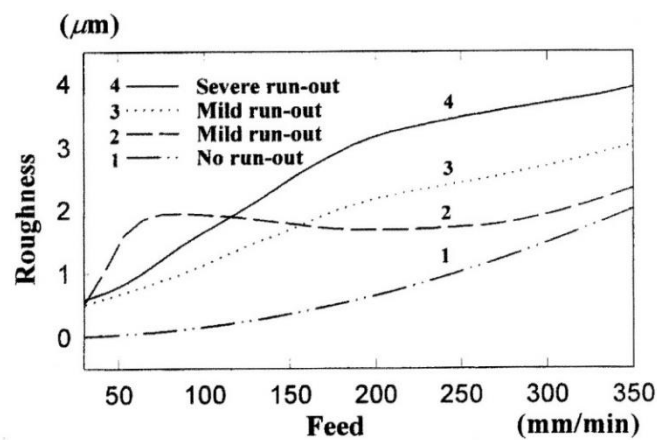


Figura 2.5. Rugosidad Ra , en función del avance y de los errores de alineación. Fte.: (Baek 2000).

Cuando no se tiene en cuenta la desalineación de las plaquitas de corte, el error por la tolerancia axial de los diferentes insertos, Tungaloy muestra en su documento técnico de referencia (Tungaloy 2014), la expresión del acabado superficial teórico $R_{th}[\mu\text{m}]$ (equivalente a la altura de cresta $h[\mu\text{m}]$). La Ec. 2.3 es una expresión similar a la Ec. 1.9, pero con el cambio de variable principal de la profundidad de corte radial, por el avance por diente. En el caso práctico que deba considerarse el error de alineación, sólo es necesario cambiar en la Ec. 2.3, la variable avance por diente f_z [mm/diente], por el avance por revolución f [mm/rev].

$$R_{th} = \frac{1000}{8} \cdot \frac{f_z^2}{r} \quad \text{Ec. 2.3}$$

Donde f_z [mm/diente] es el avance por diente y r [mm] el radio de la plaquita de corte.

Benardos estableció un modelo con *RNA* y un diseño de experimentos basado en el principio de Taguchi para la operación de planeado-fresado (Benardos 2002). Como variables de entrada consideró la velocidad y la profundidad de corte, el avance por diente, el desgaste de herramienta, el tipo de fluido y las fuerzas de corte. Los parámetros más significativos hallados fueron la profundidad de corte, el avance por diente y la fuerza de corte axial.

López de Lacalle [et al.] describen la problemática del acabado superficial obtenido mediante fresado en alta velocidad, de matrices de estampación (López de Lacalle 2002). Han realizado diversos ensayos experimentales con herramientas integrales de metal duro con recubrimiento TiAlN y herramientas con placas intercambiables de PCBN (Nitruro de Boro Cúbico Policristalino). Se mecanizaron dos tipos de materiales, fundición gris GG25 con dureza 200-230 HB y fundición dúctil GGG70L con dureza 220-270 HB, con distintas estrategias de corte (fresado en concordancia y en oposición, en sentido ascendente y en descendente). Se tomaron medidas del parámetro de rugosidad, R_a , de las fuerzas de corte, del desgaste de la herramienta en función de la longitud de mecanizado. Las conclusiones principales de este estudio fueron las siguientes:

- Para obtener buenos resultados, se limita la velocidad de corte a 140 m/min para la herramienta de metal duro y a 300 m/min para la herramienta de PCBN.
- En el caso que el excedente del material, en la operación de acabado, no sea constante, el proceso es más fiable con herramientas de metal duro, aunque el tiempo de mecanizado sea mayor.

- Una mayor flexión de herramienta se obtuvo con menor inclinación de la pieza y con el fresado en concordancia.
- Finalmente se concluye que el fresado en alta velocidad permite reducir tiempo entre 7-10% y la mejora de la calidad de las piezas mecanizadas.

Axinte y Dewes presentaron los resultados experimentales y los correspondientes modelos empíricos para evaluar la integridad superficial de una pieza de acero de herramientas para trabajo en caliente, según norma UNE F-5318 (W. Nr. 1.2344), templada entre 47-49 HRC (Axinte 2002). Se realizó la operación de fresado en alta velocidad, con herramienta integral de metal duro, de punta esférica (con diámetro, $D = 6$ mm), con recubrimiento TiAlN, con aire a presión como refrigeración y como método de corte, el fresado en concordancia. Las profundidades de corte radial y axial se fijaron en 0,2 mm. Se estudió la influencia de la velocidad de corte V_c (200 y 300 m/min), avance por diente f_z (0,05 y 0,10 mm/diente), ángulo de inclinación de la pieza α (0 y 60°) y longitud de corte mecanizada L (fijados 8 niveles a intervalos de 15 m). La integridad superficial (rugosidad superficial, microestructura, microdureza, tensiones residuales) fue estudiada mediante un diseño de experimentos factorial. El resultado del análisis de regresión múltiple es un modelo polinomial de rugosidad, R_a , expresado según la Ec. 2.4.

$$\begin{aligned}
 R_a = & 6,642 + 12,042 \cdot f_z + 0,008 \cdot V_c + 0,926 \cdot \alpha - 0,068 \cdot V_c \cdot f_z \\
 & - 0,009 \cdot V_c \cdot \alpha - 7,297 \cdot f_z \cdot \alpha + 0,061 \cdot V_c \cdot f_z \cdot \alpha + 1,422 \cdot L \\
 & - 5,239 \cdot L^{0,5} - 0,165 \cdot L^{1,5} + 0,007 \cdot L^2 - 6,01 \cdot 10^{-6} \cdot L^3
 \end{aligned}
 \tag{Ec. 2.4}$$

Donde f_z [mm/diente] es el avance por diente, V_c [m/min] es la velocidad de corte, α [°] es el ángulo de inclinación de la pieza y L [m] es la longitud de corte mecanizada.

Como conclusiones, no se observaron cambios en la microestructura y microdureza, ni la aparición de capa blanca o zonas afectadas por temperatura, dentro del rango de condiciones de corte aplicado. Según la inclinación de la pieza, a 60° los valores de rugosidad, R_a , son más estables y disminuyen con el aumento de la velocidad de corte y la disminución del avance por diente.

Guillemot presentó en su tesis doctoral un estudio sobre la influencia de las operaciones de fresado, en fase acabado, con herramientas de punta esférica, sobre la integridad superficial y duración de vida por fatiga de piezas, en aleaciones de acero no templadas, con alto límite elástico (Guillemot 2010). Considera las operaciones de fresado en alta velocidad sobre piezas de geometrías complejas. Guillemot obtuvo experimentalmente la caracterización de la integridad superficial, para diferentes

parámetros de corte y diferentes inclinaciones de la herramienta. Guillemot propuso una aproximación híbrida para preveer el estado mecánico de la pieza mecanizada mediante fresado.

En este punto es necesario destacar que en la teoría de fallas de componentes por fatiga mecánica, el cálculo del límite de resistencia a la fatiga, según la ecuación de Marín (Budynas 2008) es afectado por diferentes factores de corrección o de modificación, tal que consideren aspectos del componente, como la condición superficial, el tamaño, el tipo de carga, la temperatura, la confiabilidad, o efectos varios (por ejemplo: esfuerzos residuales, endurecimientos superficiales, corrosión). El factor de modificación según la condición superficial, depende del acabado superficial que se obtiene en distintos procesos de fabricación (rectificado, mecanizado o laminado en frío, laminado en caliente, forjado).

Toh realizó un análisis topográfico de la superficie inclinada a 75° de una pieza, obtenida a partir de la operación de acabado mediante fresado en alta velocidad, sobre acero de moldes AISI H13 (W. Nr. 1.2344), templado a 52 HRC (Toh 2004). Evaluó distintas orientaciones de las estrategias de corte, tal como se muestra en la Figura 2.6: el fresado en concordancia y en oposición (*down and up milling*), en sentido ascendente y en descendente (*upward and downward*), con paso horizontal o vertical.

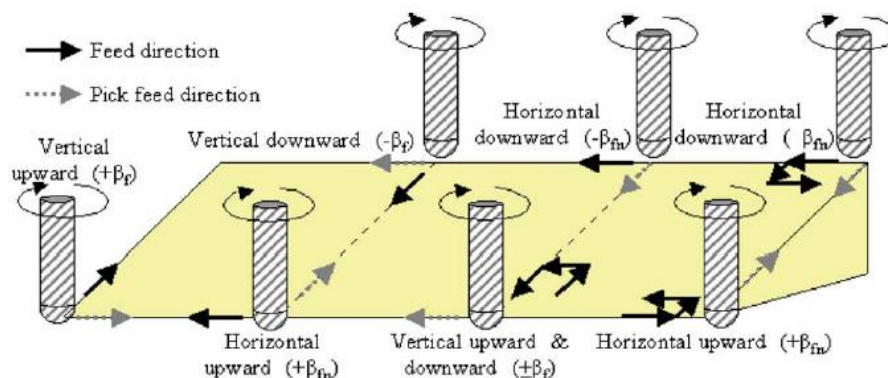


Figura 2.6. Orientaciones de las trayectorias de corte. Fte.: (Toh 2004).

Toh utilizó una herramienta integral de metal duro de punta esférica (con diámetro, $D = 10$ mm y 6 aristas de corte), con recubrimiento (Al, Ti)N, con aire a presión como refrigeración. Las condiciones de corte fueron constantes, con profundidades de corte radial y axial fijadas en 0,5 mm, velocidad de corte igual a 400 m/min y avance por diente igual 0,10 mm/diente. Se realizaron mediciones de la rugosidad superficial, R_a y de las fuerzas de corte presentes con el fresado con herramienta nueva con

un desgaste máximo inferior a 0,05 mm y con herramienta usada con un desgaste máximo de flanco de 0,30 mm.

Toh concluyó que la mejor textura superficial, se obtuvo con la orientación en una dirección (fresado en concordancia) con paso vertical y sentido ascendente (*Vertical upward, $+\beta_f$*). En este caso, la superficie presenta unas marcas bien definidas, incluso con la herramienta desgastada. Los peores resultados se han obtenido con la orientación en las dos direcciones (fresado en concordancia y oposición) con paso horizontal y sentido descendente o ascendente (*raster horizontal downward, $-\beta_{fn}$, and upward, $+\beta_{fn}$ orientation*). La superficie presenta marcas inestables con dominio de las marcas generadas por fresado en oposición.

En este punto es necesario destacar el límite geométrico de las herramientas de punta esférica con un número de aristas de corte, z superior a 2. Al centro y punta de la herramienta sólo llegan 2 aristas de corte, por lo que en función del fabricante de la herramienta, de la profundidad de corte y de la inclinación de la superficie a mecanizar, trabajarán 2, 3, 4 ó 6 aristas de corte. En general esta información no es proporcionada en los catálogos del fabricante de la herramienta de corte. Si no se tiene en cuenta, el avance por diente real, puede ser muy superior al programado, lo que provocaría acabados superficiales diferentes a lo esperado según la geometría de la superficie mecanizada y/o desgaste o rotura prematura de la herramienta.

Toh también presentó un artículo relacionado con el diseño, evaluación y optimización de estrategias de corte con mecanizado en alta velocidad de materiales templados para moldes y matrices para reducir los tiempos de mecanizado y mejorar la rugosidad superficial (Toh 2005). Como conclusiones, destacó que en la operación de acabado deben tomarse en cuenta las características específicas del molde o matriz respecto su forma, tamaño y curvaturas locales, la geometría de la herramienta y la profundidad de corte radial. Por otra parte, el uso de un mecanizado adaptativo, es decir el cambio adecuado de velocidad de giro y avance para mantener las fuerzas de corte constantes, permite obtener como beneficios principales una buena calidad superficial, aumentar la vida de la herramienta y reducir el tiempo de mecanizado.

Diferentes fabricantes de herramientas de corte, consideran desfavorable el fresado en sentido descendente, en la fase de acabado, con herramientas de punta esférica, pues se reduce la velocidad de corte efectiva notablemente (Sandvik 1999). Especialmente en el centro de la punta de la herramienta, pues la velocidad de corte es cero, en este punto. A este hecho se le añade una difícil evacuación de la viruta generada, en esta zona y en función de la geometría concreta de la herramienta.

En operaciones de copiado en superficies con inclinación, o en superficies planas, se recomienda inclinar la herramienta 10-15°, tal como se mostraba en la Figura 1.22, para evitar mecanizar con la punta de la herramienta. Pero en muchas ocasiones, en función de la complejidad de la pieza, o las limitaciones de la máquina-herramienta, esta inclinación no es posible.

Aspinwall et al, investigaron el efecto de la inclinación de la superficie sobre la velocidad de corte, para distintos métodos de corte y dirección de avance de una herramienta semiesférica, para profundidades de corte similares (Aspinwall 2007), tal como se muestra en la Figura 2.7. Puede observarse claramente cuál es la velocidad de corte efectiva de la herramienta, señalada en el punto rojo, según la estrategia de mecanizado utilizada, en superficie inclinada (con trayectoria en sentido ascendente-subida o descendente-bajada) y en superficie plana-horizontal.

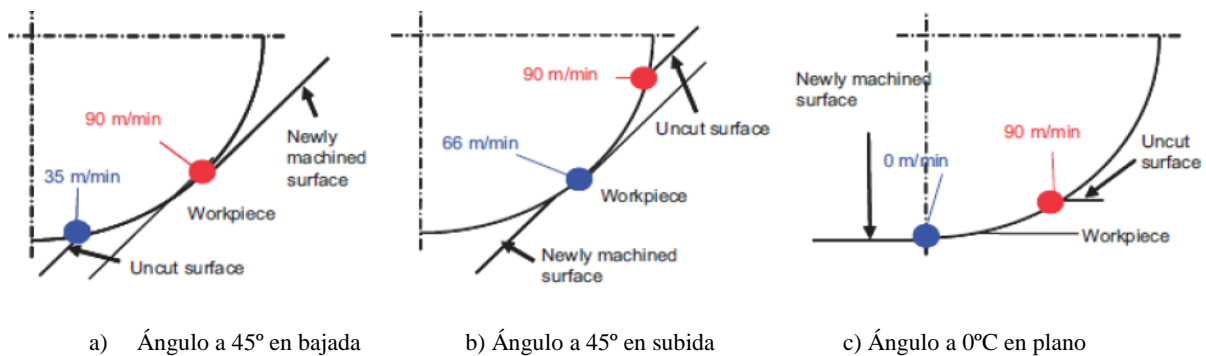


Figura 2.7. Velocidad de corte efectiva, en función del sentido de avance, en superficie inclinada.

Fte.: (Aspinwall, 2007).

Mizugaki presentó un nuevo método para la estimación geométrica de una superficie esférica mecanizada por una fresa de punta esférica (Mizugaki 2001). Realizó un análisis teórico y formuló las ecuaciones fundamentales para identificar el punto de corte, limitado a la inclinación variable del eje de la herramienta respecto el eje Z. Posteriormente, planteó un método para la estimación teórica de las alturas de cresta de la superficie de la pieza, resultado del proceso de mecanizado (Mizugaki 2003).

Es interesante observar también, los estudios aportados en las operaciones de torneado referente al acabado superficial. Por ejemplo, Aboulatta estableció un modelo de regresión lineal para la predicción de la rugosidad superficial basado en vibraciones de la máquina-herramienta en operaciones de torneado y los siguientes parámetros de corte (Aboulatta 2001): Velocidad de giro y avance lineal, profundidad de corte, radio de punta, ángulo de posición y la relación entre longitud y diámetro de pieza. Los parámetros de rugosidad evaluados fueron Ra , $R_{m\acute{a}x}$ (Rt), a partir de la

regresión lineal y análisis de los coeficientes de correlación. Como conclusión principal que su modelo dependiente de los parámetros de corte y vibraciones fue más exacto que el modelo sin considerar las vibraciones.

Penalva [et al.] estudiaron la influencia del desgaste de la herramienta de Nitruro de Boro Cúbico (CBN) sobre la rugosidad en probetas de acero UNE F-5210, templado a 62 HRC en la operación de refrentado en torno (Penalva 2002). Obtuvieron distintos perfiles de rugosidad del parámetro R_t , a distintas longitudes de mecanizado. Los resultados demostraron que existe una buena réplica de filo sobre la superficie generada.

Pelaez [et al.] investigaron en operaciones de torneado, la relación entre rugosidad y los parámetros de corte sobre dos materiales, aluminio L-1100 y acero UNE F-1120 (Pelaez 2002). Se tomaron medidas de los parámetros R_a , R_t y R_z . Se realizó un análisis de regresión lineal simple y múltiple a partir de la ecuación generalizada de Taylor dependiente de la profundidad de corte, A_d , velocidad de corte, V_c y del avance por revolución, f . El modelo propuesto del parámetro R_a , con el análisis múltiple sobre el acero se muestra en la Ec. 2.5.

$$R_a = 385,78 \cdot A_d^{0,056} \cdot f^{0,33} \cdot V_c^{-1,04} \quad \text{Ec. 2.5}$$

Como conclusiones, Pelaez expone que el modelo propuesto puede extrapolarse a otras situaciones de torneado en acabado. La influencia de la profundidad de corte depende de la rigidez de la máquina y de la presencia de filo recrecido. En términos generales la rugosidad disminuye con el aumento de la velocidad de corte y con la disminución del avance. Han hallado que el coeficiente de rozamiento depende directamente de la relación entre avance y profundidad de corte. Un mayor rozamiento implica la aparición de filo recrecido.

Feng estudió un modelo empírico para la predicción de la rugosidad superficial en operaciones de torneado (Feng 2003), donde comparó un modelo de regresión lineal con un modelo de RNA , con iguales variables de entrada y salida, a partir del modelo predictivo desarrollado por Boothroyd (Boothroyd 1989). Como parámetros de corte de entrada consideró la velocidad y la profundidad de corte, el avance, el radio de punta y la dureza del material. Por un lado, obtuvo como parámetros no significativos la profundidad de corte y la dureza del material. Por otro lado, el modelo de análisis de regresión ofrece mayor información y una mejor visión del proceso que el modelo con RNA . Sin embargo cuando los datos están dispersos y/o no generados por diseños experimentales, el análisis de regresión no es capaz de producir un modelo mejor que con RNA . Ambos modelos tienen un comportamiento estadísticamente satisfactorio desde el punto de vista del modelado.

Cabe destacar en este punto la tesis realizada por Quintana sobre la monitorización de la rugosidad superficial e identificación de los diagramas de los lóbulos de estabilidad en los procesos de fresado (Quintana 2009). En este estudio, Quintana realizó una experimentación basada en el diseño de experimentos, utilizando una herramienta de punta esférica con distintos diámetros de corte, para la operación de fresado en superficie plana sobre un material de trabajo clásico, el acero de moldes, según norma W. Nr. 1.2344, templado a 52 HRC. Con los datos obtenidos en la experimentación y el análisis posterior, permitía obtener unos diagramas que identificaban las zonas estables-inestables (con o sin vibración) en la operación de fresado concreta, y de paso evaluar la rugosidad superficial obtenida.

En un artículo sobre la planificación del proceso de fresado, Teixidor [et al.] describían el estudio realizado sobre la influencia de las características geométricas del fresado con herramientas de punta esférica (Teixidor 2011). En este artículo, aportaban algunas expresiones aproximadas, para el cálculo de la altura de cresta en este tipo de operaciones de fresado, en acero endurecido AISI H13 (dureza 52-54 HRC) en superficie plana, o superficie inclinada. También presentaban unos gráficos interesantes sobre la altura de cresta, o la rugosidad superficial, R_a , en función del ratio ae/R , entre la profundidad de corte radial, ae y el radio, R , de la herramienta de punta esférica.

Rodríguez et al presentaron un artículo sobre el acabado de superficies de útiles de moldeo y conformado mediante una técnica diferente y complementaria a los procesos de mecanizado previos, la técnica de bruñido (Rodríguez 2016). El bruñido por deformación se basa en generar pequeñas deformaciones plásticas en la superficie de la pieza. Los efectos son la mejora de la rugosidad final (rugosidades R_a entre 0,05-0,50 μm), el aumento de la dureza superficial (entre 3-10 HRC) y la introducción de tensiones residuales de compresión. Ello implica una mejora de las propiedades mecánicas del componente, en cuanto a la resistencia a la fatiga y al desgaste. Estas mejoras obtenidas en el componente depende de múltiples factores: calidad del equipo de bruñido, la rugosidad previa al proceso de bruñido, el nivel de dureza del material, los ajustes correctos de las condiciones de trabajo. Para analizar estos factores se realizaron pruebas experimentales, con un equipo de bruñido hidrostático, en las siguientes condiciones:

- Material de trabajo: acero aleado (AISI P20), dureza 31-37 HRC; fundición GGG70, con dureza 60-62 HRC; acero W. Nr. 1.2379 a 64 HRC.
- Condiciones de bruñido: Velocidad, 15 m/min; paso transversal, 0,05-0,10-0,20 mm; presión, 10-15-20 MPa.
- Medición de los parámetros de rugosidad R_a y R_z .

Los resultados muestran que la mejora de los parámetros de rugosidad es aproximadamente de un 50%, en materiales de baja dureza. En los materiales de elevada dureza, los resultados son más moderados y se requerirían equipos de mayor presión (hasta 50 MPa) para obtener mejores resultados. Por otra parte, un problema grave que puede presentarse en las superficies bruñidas (en especial en algunas fundiciones, es la presencia de poros, o fracturas, que provoquen un agrietamiento de la superficie acabada.

Para analizar la calidad e integridad de superficies fresadas endurecidas Neslusan [et al.] presentaron un estudio sobre la monitorización de estas superficies mediante la técnica de ruido de Barkhausen (Neslusan 2015). Se realizó un estudio experimental en una operación de fresado sobre un acero aleado endurecido a 45 HRC, con herramientas de metal duro (plaquitas intercambiables), en condiciones de corte convencionales ($F = 112$ mm/min, $S = 500$ min⁻¹, $ap = 0,25$ mm). Se midió el desgaste de las herramientas VB , dentro del intervalo 0,05 mm – 0,8 mm y se relacionó con los valores del ruido de Barkhausen. Los resultados de este estudio indican que la anisotropía magnética y la aparición de la envolvente de ruido de Barkhausen podrían emplearse para la monitorización de superficies duras fresadas vinculadas con la detección del espesor de la capa blanca que puede producirse en las operaciones de mecanizado de aceros templados.

A pesar de todos los modelos del acabado superficial que se puedan aplicar en un proceso de mecanizado, en la inspección final de las piezas, siempre existirán superficies que no cumplan con las especificaciones previas de rugosidad. Volver a introducir las piezas en máquina y programar ésta, para obtener la superficie requerida, implica un alto coste económico y consumo de tiempos productivos (Protolabs 2017). Por este motivo, se recurre en muchas ocasiones, a operaciones manuales, de ajuste de las tolerancias dimensionales, geométricas y de la rugosidad (Figura 2.8).



Figura 2.8. Ajuste manual del acabado superficial. Fte.: (Protolabs 2017).

Para estas operaciones de ajuste manual, se utilizan distintas herramientas abrasivas (Figura 2.9) como limas de diamante, piedras de cerámica o pasta de diamante, con distinto tamaño de grano, que permiten el pulido en áreas profundas y ranuras estrechas, lo cual ayuda a reducir los tiempos y obtener el acabado exigido (Rúa 2016).



Figura 2.9. Herramientas y accesorios para pulido final de moldes. Fte.: (Rúa 2016).

2.3. Máquina-herramienta.

En la actualidad, existen muchos fabricantes de máquina-herramienta que disponen de máquinas o centros de mecanizado a alta velocidad. La dificultad actual radica en conocer cuáles son los parámetros principales que pueden permitir seleccionar una máquina en función de la calidad superficial exigida en los procesos de fabricación (Mitsubishi 2001). Será necesario evaluar la información suministrada por el fabricante sobre la máquina (revoluciones y avances máximos, potencia y par motor máximos, precisión de posicionamiento y repetibilidad, rigidez, estabilidad térmica) mediante pruebas de ensayo (Arnone 2000) para obtener información respecto a las limitaciones de la máquina para obtener el acabado superficial exigido. Una práctica habitual en las empresas que deben realizar la compra de una máquina, de un centro de mecanizado, consiste en plantear el mecanizado de una pieza de prueba a los distintos fabricantes de las máquinas, para evaluar los acabados superficiales y los tiempos de mecanizado obtenidos.

Algunos fabricantes de centros de mecanizado en alta velocidad con accionamientos lineales (Gildemeister 2004), ofrecen un programa adicional que permite seleccionar entre tres opciones básicas de mecanizado, para adaptar el proceso de mecanizado estándar a un proceso de alto rendimiento, mecanizado de alta velocidad o mecanizado de alta precisión.

La evolución de las máquinas es constante, tomando como base la mejora de la precisión y la reducción de tiempos de producción (Echepare 2002). La dinámica de la máquina se mejora con un aumento de las aceleraciones/deceleraciones máximas, alcanzando valores superiores a 1 G. En todos los fabricantes existen modelos equipados con guías y motores lineales que permiten estas aceleraciones y altas velocidades de giro y avance (60-120 m/min), con un mínimo calentamiento de los elementos, montados sobre estructura rígida, termosimétrica, de tipo pórtico (Figura 2.10). Los husillos actuales son del tipo electrohusillos o husillos con motor integrado, con rodamientos cerámicos, con velocidades de giro estándares hasta 40.000 min^{-1} , o especiales hasta 80.000 min^{-1} .

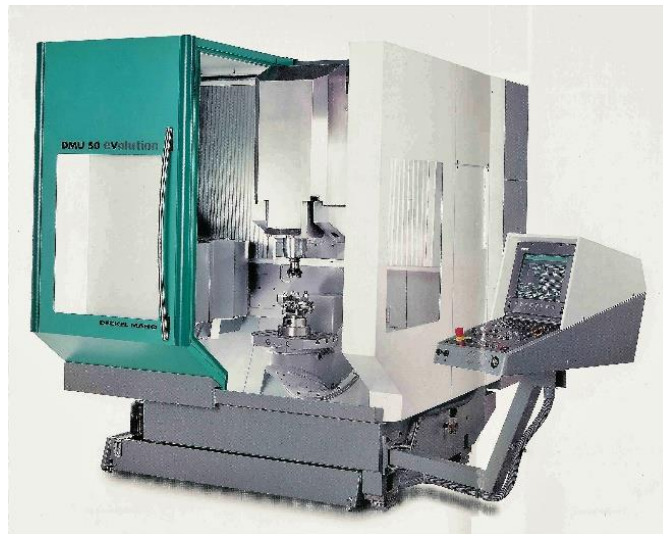


Figura 2.10. Centro de Mecanizado Vertical. Fte.: (Gildemeister 2004).

Algunos fabricantes de máquinas ofrecen soluciones propias para mejorar la calidad del acabado superficial, la precisión, tiempos de mecanizado y la vida de la herramienta. Por ejemplo, el fabricante Mori Seiki ha presentado el concepto innovador *DCGTM* (Guiado desde el Centro de Gravedad), con el que se consigue alta calidad, a alta velocidad, al reducir en gran medida las vibraciones presentes en los ejes de la máquina, durante las fases de aceleración/desaceleración (Mori 2004).

En la tesis doctoral presentada por Albertí se propone una metodología para la selección de un centro de mecanizado en función de las variables tecnológicas que intervienen en el proceso, así como los aspectos económicos a considerar, a partir de aplicaciones concretas, en piezas de aluminio (Albertí 2010). Albertí aplica la metodología de las redes neurales a la modelización del proceso de mecanizado y realiza un trabajo experimental en base a la precisión dimensional obtenida en función

de las condiciones de trabajo seleccionadas, al tipo de interpolación usada en la definición de las trayectorias de la herramienta de corte y al tipo de sistema de sujeción de la herramienta.

Iglesias, investigador de la línea de investigación dinámica y control del centro tecnológico IK4-Ideko explica las bondades del proyecto de investigación POPJIM, donde estudiaron y desarrollaron diferentes prototipos para el aumento de la capacidad de corte y la reducción de los problemas de vibraciones de los procesos de mecanizado (Iglesias 2015). En los procesos de fresado, las vibraciones generadas plantean uno de los problemas principales del proceso, pues afecta a la calidad de la superficie de la pieza, a la vida de las herramientas de corte y de los componentes mecánicos de la máquina. En concreto se desarrollaron dos tipos de módulos en función de las dimensiones de las máquinas o utillajes, para poder ajustar las características dinámicas de las mismas al proceso de mecanizado a realizar. Para máquinas de pequeño tamaño, se desarrolló un módulo mecatrónico activo, autoconfigurable y optimizable (*JIM, Joint Interface Module*). Para máquinas de mayor tamaño se desarrolló un módulo adicional de amortiguación (*AIM, Added Interface Module*). Los dos módulos se comunican con un dispositivo a través de red inalámbrica. Con el uso de estos módulos integrados en las máquinas o utillajes, se ha demostrado una mejora de la productividad y la calidad de las superficies mecanizadas.

Para una mayor precisión dimensional y un buen acabado superficial es necesaria una mayor refrigeración y control de la temperatura de todo el conjunto de la máquina, lo que evita errores de trayectoria por dilatación de los ejes. Menores errores de posicionamiento, de circularidad y repetibilidad, y en función del control numérico, que puedan ser ajustados en tiempo real, alcanzándose errores inferiores a 0,001 mm, con altas velocidades de giro (Arnone 2000).

En abril de 2013, se celebró la jornada *¿Qué y cómo se va a mecanizar en 2025?*, organizada por la revista IMHE. En el siguiente mes se presentó un resumen amplio sobre esta jornada en la revista IMHE (IMHE 2013), donde se destacaron las innovaciones tecnológicas en los procesos de mecanizado presentes y futuros, principalmente en las máquinas-herramienta. Olazabal (Dpto. Técnico del fabricante de rodamientos NSK) destacaba que la innovación tecnológica para el MAV se ha producido gracias a la demanda de los usuarios, de menores tiempos productivos, calidades superiores, menor índice de averías y mantenimiento y menor contaminación medioambiental. Para este fin, NSK presentaba los rodamientos de la serie *Robust Shot*, especialmente diseñados para los procesos en alta velocidad, tal que permiten garantizar la correcta lubricación interna de los mismos (con suministro radial de aceite), y evitar así niveles de rumorosidad/vibraciones anormales o defectos en las precisiones de las piezas a obtener. También la incorporación de nuevos diseños de tuercas de

husillos a bolas y guías de rodillos en las máquinas-herramienta de última generación, permiten garantizar una mayor precisión en las fases de posicionamiento o mecanizado.

Actualmente existe una revolución con la fabricación de componentes plásticos o metálicos, mediante las técnicas de prototipado con la conocida impresión 3D. A nivel doméstico, se ha empezado a popularizar la impresión 3D de componentes plásticos, que emplea la técnica de fusión de un hilo plástico o deposición de material fundido (*FDM, Fused Deposition Modeled*). El hilo fundido se deposita capa a capa, según el programa de dibujo creado previamente. A nivel industrial, se obtienen también piezas metálicas, por prototipado, mediante diferentes tecnologías (como el sinterizado selectivo por láser), con máquinas de mayor precisión y mayor coste. Estas técnicas de prototipado ofrecen unas calidades superficiales y tolerancias dimensionales limitadas, según la tecnología de prototipado utilizada (Ciurana 2008).

Para mejorar la calidad superficial de los productos obtenidos por prototipado, diferentes fabricantes de centros de mecanizado han integrado en la misma máquina, la tecnología del fresado en alta velocidad y una de las tecnologías de prototipado con la fabricación por adicción de material (*Additive Manufacturing-AM*). Por ejemplo, el fabricante Mazak, con el centro de mecanizado multitarea, de 5 ejes, Integrex i400-AM (Figura 2.11), puede imprimir material capa a capa, mediante la técnica de impresión 3D, de la sinterización metálica directa por láser (*DMLS, Direct Metal Laser Sintering*), en combinación con el fresado en alta velocidad, en las superficies donde sea necesario (Brooks, 2014). Este es un proceso híbrido, donde se combinan ambas tecnologías de fabricación, para obtener, el acabado superficial requerido, en el mínimo tiempo posible.



Figura 2.11. Centro de mecanizado Mazak Integrex i400-AM. Fte.: (Brooks, 2014).

En una de las ferias industriales más importantes del sector de fabricación, *IMTS (International Manufacturing Technology Show)* realizada en Chicago (Estados Unidos), en septiembre de 2016, se presentaron nuevas máquinas-herramientas que incorporaban el proceso de fabricación híbrido, comentado anteriormente. También se destacaban novedades del sector, en cuanto a la mejora de la automatización de los procesos con robots colaborativos (Figura 2.12), la precisión y la mejora de la conectividad entre máquinas, con una mayor sensorización o monitorización en los distintos procesos donde intervienen máquinas y robots colaborativos (Brooks 2016). Gracias a ello, estos robots podrán convertirse en compañeros del operario humano, realizando fases de fabricación repetitivas, de manipulación y montaje, con un extraordinario control y supervisión de su entorno, con la máxima seguridad. Estas novedades tecnológicas se integran actualmente bajo el concepto de Fábrica 4.0 o Fábrica inteligente (*Smart Factory*), en la denominada 4ª revolución industrial. (Interempresas 2016).



Figura 2.12. Ejemplo de robot colaborativo en procesos de medición. Fte.: (Brooks 2016).

López de Lacalle explicaba en un artículo las diferentes piezas normalizadas con geometría variables y complejas que se emplean para ensayos de fresado en alta velocidad (López de Lacalle 1999). Son piezas test, o piezas tipo que sirven de prueba de recepción entre fabricante de la máquina y el cliente comprador. También sirve de prueba válida para un sector industrial concreto, o como ensayo de puesta a punto de la máquina, una vez instalada en la empresa. En las siguientes figuras se muestran tres piezas test clásicas, donde se realiza la operación de fresado en alta velocidad, en la fase de acabado. Las tres piezas tienen en común diferentes parámetros de mecanizado:

- el material a mecanizar (aleación de aluminio AA5083),
- la herramienta de corte (Fresa de punta esférica de $D = 12$ mm),
- condiciones de corte: $S = 24.000$ min⁻¹, $F = 10.000$ mm/min, $ap = 0,2$ mm y $ae = 0,2$ mm

La pieza test Mercedes fue desarrollada para el sector de la automoción (Figura 2.13). En esta pieza se recrean zonas problemáticas en geometrías características del sector.

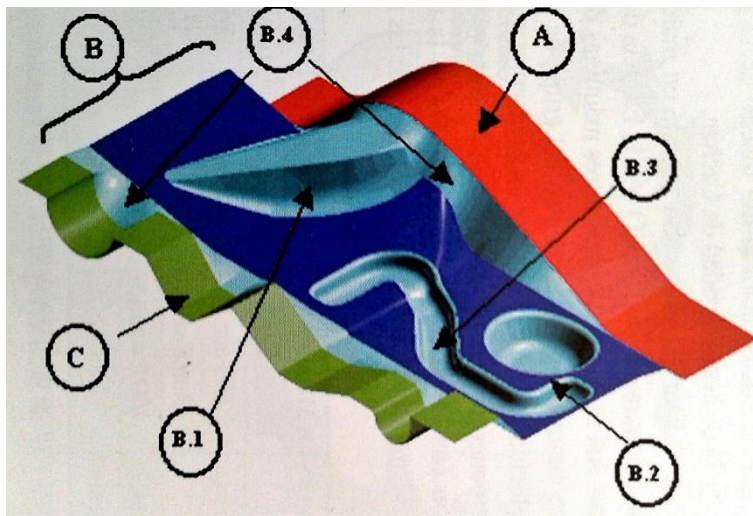


Figura 2.13. Pieza test Mercedes. Fte.: (López de Lacalle 1999).

La Pieza test Cachan permite evaluar distintos aspectos para el control de los procesos de mecanizado, desde la adecuación del programa de simulación CAM, hasta los problemas de flexión de la herramienta (Figura 2.14).

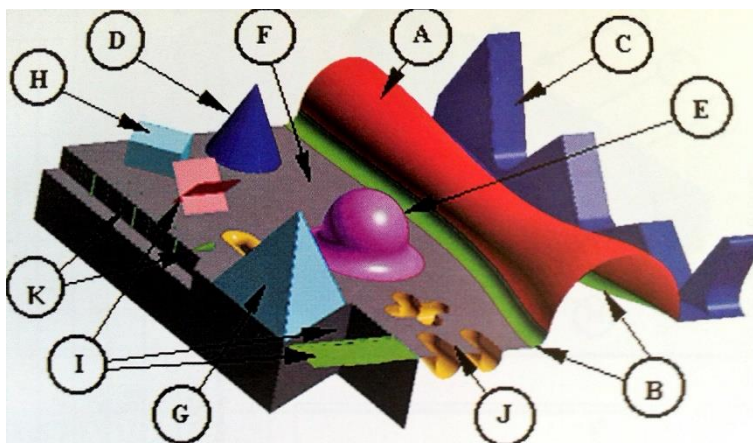


Figura 2.14. Pieza test Cachan. Fte.: (López de Lacalle 1999).

La pieza NCG (Figura 2.15) de la asociación de Control Numérico Alemana está especialmente diseñada para el control posicional de los diferentes ejes de la máquina para componentes del sector del molde.



Figura 2.15. Pieza test NCG. Fte.: (López de Lacalle 1999).

2.4. Controles Numéricos.

La comunicación fiable y rápida entre la máquina-herramienta, su control numérico computerizado (*CNC, Computer Numerical Control*) y el programa de mecanizado, permitirá obtener los resultados esperados en el mínimo tiempo posible (Figura 2.16).

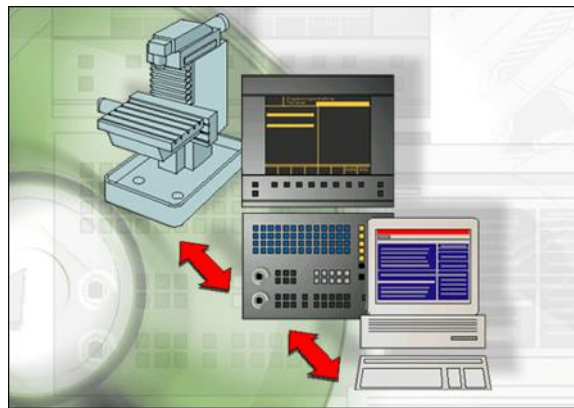


Figura 2.16. Comunicación entre programa CNC y máquina-herramienta. Fte.: (Heidenhain 2003).

El control *CNC* traduce la información suministrada por el programa *CAD (Computer Aided Design)* o *CAM (Computer Aided Manufacturing)* en un código interno que permitirá el accionamiento de los elementos de la máquina para obtener la geometría final de la pieza. El mecanizado a alta velocidad requiere una lectura de información y procesado muy rápido y fiable. Pero la velocidad de transmisión

de datos está limitada y la corrección de errores en tiempo real, también. Por ejemplo, errores de dilatación de ejes de máquina, error en el seguimiento de las trayectorias (Iriondo 2000), diferencias importantes entre el avance programado y el avance real, etc.

Es importante conocer las funciones avanzadas del control numérico a utilizar, por ejemplo, a través del catálogo técnico del fabricante del control numérico (Heidenhain 2007). A menudo se utilizan funciones avanzadas que permiten disponer de tiempo de proceso de bloque de programa muy pequeños (se alcanzan ya valores por debajo de 0,1 ms), con control de avance (*Feed-Forward*) y lectura por adelantado de un número elevado de bloques (*Look-Ahead*), como referencia para medir la eficacia de un control (Aranceta 1999), para reducir de forma significativa los errores de seguimiento de la trayectoria y mejorar el acabado superficial (Dreoni 1997).

Fagor presentó su nuevo software CNC 8060 para centros de mecanizado de alta velocidad, para la fabricación de moldes de precisión, para industrias como la automoción o la aeroespacial (Fagor 2015). Con este nuevo control pueden aplicarse nuevos algoritmos *HSC* que permiten conseguir mejores acabados y alargar la vida de la máquina, pues al reducir vibraciones en máquina, las precisiones son mayores y los tiempos de mecanizado mejores. Este control aporta un nuevo sistema de mecanizado *HSSA* (*High Speed Surface Accuracy*) y una nueva funcionalidad (*Dynamic Override*), exclusivos de Fagor. Esta funcionalidad modifica el comportamiento dinámico de la máquina, respeta la velocidad de mecanizado y controla las aceleraciones, lo que afecta a la calidad superficial obtenida. El modo de programación *HSC*, se divide en tres modos distintos para adaptarse mejor a las necesidades de la máquina o pieza o mecanizar:

- *HSC SURFACE*, para obtener la mejor calidad superficial
- *HSC FAST*, para obtener el tiempo mínimo de mecanizado
- *HSC CONTERROR*, para obtener la máxima precisión.

En operaciones de acabado, en función de la tolerancia cordal (Figura 2.17), el número de interpolaciones necesarias es mayor. Por tanto, para tener un buen acabado superficial, o se reduce el avance programado, o se aumenta el tiempo de ejecución de bloque (López de Lacalle 1999).

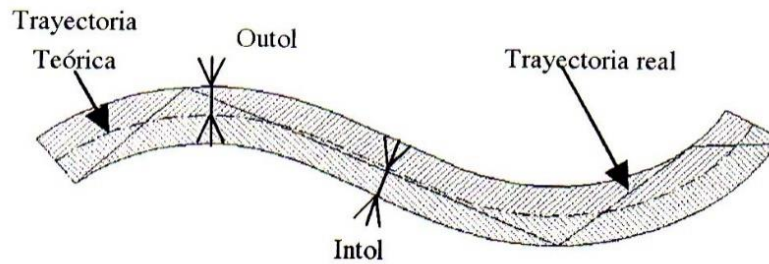


Figura 2.17. Tolerancia cordal exterior e interior. Fte.: (López de Lacalle 1999).

Un ejemplo de la evolución de los controles numéricos y en especial, del control Heidenhain iTNC530, es la incorporación del ciclo 32, de tolerancia (Heidenhain 2004). Este ciclo permite establecer una diferenciación entre una operación de desbaste, con un mayor avance lineal y una operación de acabado, con menor tolerancia cordal (Figura 2.18). Con este ciclo se puede modificar el valor de tolerancia cordal establecido, inicialmente, por el fabricante de la máquina. Con el cambio, el control suaviza automáticamente el contorno, y en caso necesario reduce el avance programado. De esta forma, la calidad de la superficie aumenta y al final se obtiene una menor rugosidad superficial.

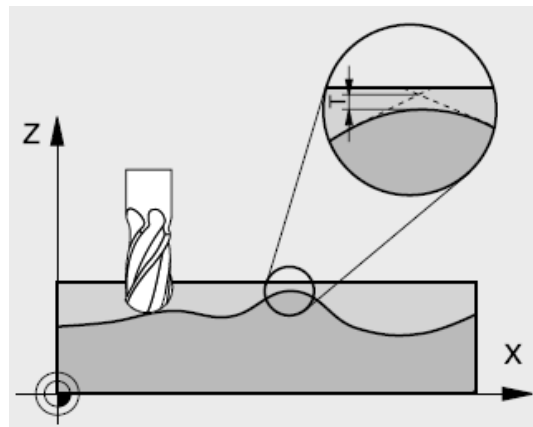


Figura 2.18. Tolerancia cordal del ciclo 32. Fte.: (Heidenhain 2004).

El conocimiento de las prestaciones de los modernos controles numéricos, permite establecer un equilibrio entre el tiempo de mecanizado, calidad superficial y precisión geométrica, siempre que el programador u operario de máquina pueda cambiar algunos parámetros estándar de máquina, para ajustarse a la operación de mecanizado en concreto (Heidenhain 2007). La Figura 2.19 y Figura 2.20, presentan un ejemplo claro sobre este tema, con la diferencia del acabado superficial en un proceso de copiado de un molde, con fresa integral de punta esférica, con tolerancia cordal de 0,1 mm y un avance de 10.000 mm/min. La Figura 2.16 presenta un acabado superficial inaceptable, por la presencia de defectos en la superficie mecanizada. Con la optimización del movimiento por el control

iTNC530 (Figura 2.20), la superficie presenta un mejor acabado, más homogéneo y sin defectos apreciables.

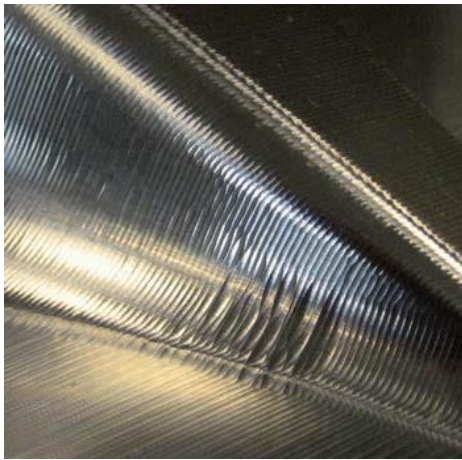


Figura 2.19. Acabado sin optimización del Control. Fte.: (Heidenhain 2007).



Figura 2.20. Acabado con optimización del Control. Fte.: (Heidenhain 2007).

La vibración presente en las máquinas es uno de los factores que empeoran el rendimiento de las operaciones de mecanizado, ya que se obtendrán acabados superficiales inaceptables, o roturas de herramientas. En la Figura 2.22 se muestra como el control Heidenhain iTNC530 permite suavizar la variación de aceleraciones (*Jerk*) sobre los ejes en movimiento de la máquina. De esta forma, se reducen los problemas de acabado superficial, causados, especialmente, por la vibración del eje Z, que provoca la aparición de entallas, de defectos muy visibles (Figura 2.18).

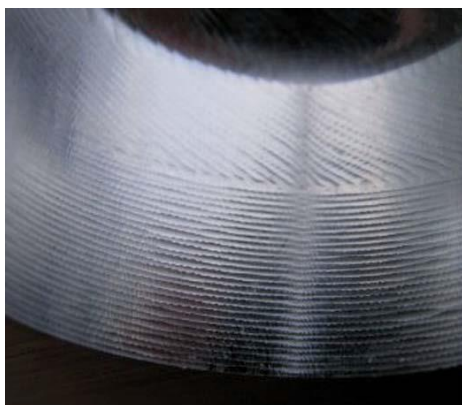


Figura 2.21. Acabado con afectación de la vibración, sin optimización del Control. Fte.: (Heidenhain 2007).

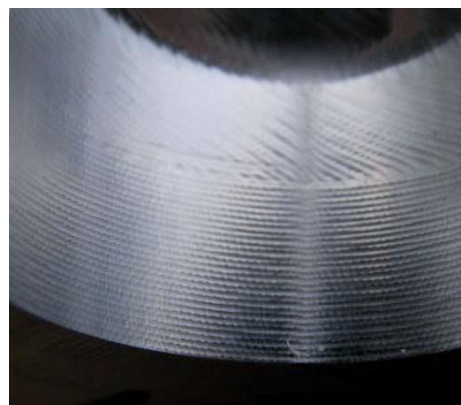


Figura 2.22. Acabado con menor afectación de la vibración, con optimización del Control. Fte.: (Heidenhain 2007).

Los controles numéricos Heidenhain iTNC530 pueden complementarse con el paquete funcional *Dynamic Efficiency* que contiene la opción *AFC (Adaptive Feed Control)*, la opción *ACC (Active Chatter Control)* y el ciclo de fresado trocoidal (Heidenhain 2017). La opción *AFC* adapta automáticamente el avance de la máquina al volumen de arranque de material, de esta forma, alcanzará los máximos avances posibles en función de la potencia de corte consumida. La opción *ACC* es una función de regulación eficaz para la reducción de las vibraciones en máquina. Con este paquete aplicado en los procesos de fresado se consigue reducir los tiempos de mecanizado y aumentar la vida útil de las herramientas.

En la actualidad, la tendencia es la conexión plena de las máquinas con su entorno, con el acceso completo, pero restringido, a los datos y software propios de la empresa. Con el paquete funcional *Connected Machining* y la opción *Remote Desktop Manager*, en los controles Heidenhain se puede acceder a las aplicaciones Windows, al navegador de internet Mozilla Firefox, a visualizadores de programas CAD, a visualizadores de documentos o visores de imágenes (Heidenhain 2017). La programación del control numérico es posible desde un ordenador portátil externo, una Tableta-PC o un teléfono móvil de última generación (*Smartphone*).

Es necesaria una gestión inteligente del control numérico, para realizar aplicaciones multitareas o híbridas en la misma máquina-herramienta, como son la fabricación por arranque de viruta y la fabricación aditiva, tal como se comentaba en el apartado 2.3. El control numérico del fabricante de máquinas Mazak, CN MAZATROL SMOOTHX permite realizar estas dos funcionalidades con eficiencia, además de gestionar otras funciones, como el mecanizado de precisión en 5 ejes (Mazak 2017). También tiene la posibilidad de introducir modelos predictivos del acabado superficial, para actuar en consecuencia, ajustando los parámetros de corte seleccionados dentro de un intervalo establecido.

2.5. Programas de mecanizado.

Con la complejidad geométrica de las piezas a mecanizar, se hace inevitable el uso de software específico para la simulación y control de los procesos de mecanizado. Son programas informáticos para la fabricación asistida por ordenador (*CAM: Computer Assisted Manufacturing*). En estos programas se introducen todos los parámetros de control necesarios del proceso de mecanizado (dimensiones pieza y herramientas de corte, estrategias y operaciones de mecanizado, condiciones de corte, etc.). Con toda esta información se genera posteriormente el programa de control numérico que se adaptará a la máquina-herramienta en uso.

Según Etxebarria [et al.], en toda estrategia de mecanizado, siempre que sea posible, deben contemplarse los siguientes aspectos (Etxebarria 2000):

- Evitar cambios bruscos de trayectoria;
- transición mediante radios amplios o lazos fuera de pieza;
- macros de entrada y salida de herramienta circulares, tangenciales o helicoidales;
- o carga constante sobre la herramienta mediante corte trocoide.

Actualmente, la mayoría de los programas de simulación de los procesos de mecanizado (programas *CAM*), contemplan estos aspectos y ofrecen funciones directas o indirectas que permiten optimizar el proceso MAV, tanto en las operaciones previas de desbaste, como en las operaciones finales de acabado.

Por ejemplo, el programa de mecanizado *MASTERCAM*, en sus inicios, insertó una opción de MAV, en el programa, cuya función era eliminar los cantos vivos en los cambios de trayectoria y aplicar un radio de curvatura a la misma, un lazo circular, para suavizar el movimiento de la herramienta y mantener los avances altos en las trayectorias curvas. Posteriormente otros programas, como *Siemens NX CAM* (Siemens 2011), siguieron el ejemplo, tal como se muestra en la Figura 2.23.

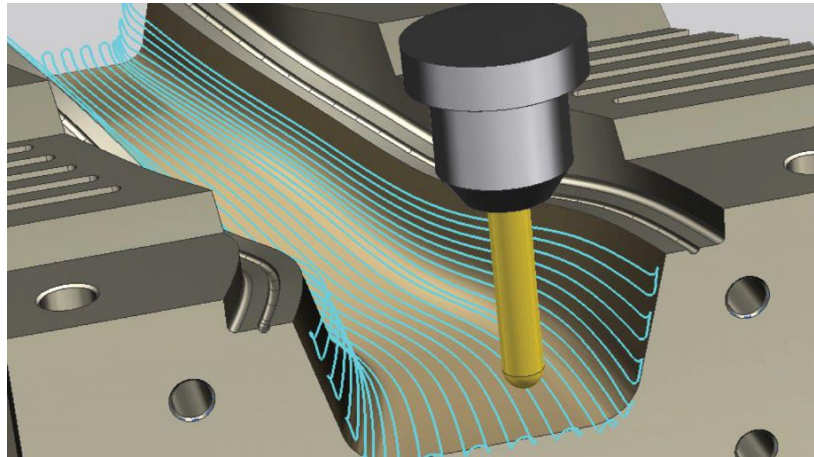


Figura 2.23. Cambios de trayectoria con lazo. Fte.: (Siemens 2011).

La complejidad de las operaciones de mecanizado para obtener una determinada pieza, puede reducirse si se realiza un estudio previo y se descompone en operaciones básicas, especialmente adaptadas para el mecanizado a alta velocidad: taladrado helicoidal, contorneado lateral y corte trocoidal (Uiltall 1999).

En la Figura 2.24, se muestra la operación de corte trocoidal de trayectoria lineal (con la profundidad de corte radial ae limitada), que sustituiría de forma más eficiente, a una operación de ranurado convencional (profundidad de corte radial igual al diámetro de corte de la herramienta), en las fases de desbaste o acabado de la pieza.

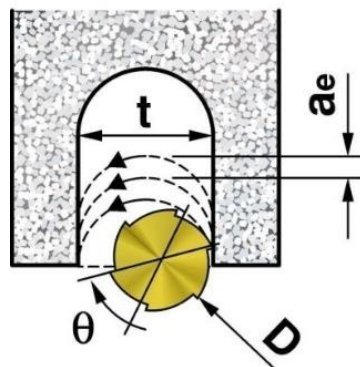


Figura 2.24. Operación de corte trocoidal. Fte: (Uiltall 1999).

Como en todo proceso, los parámetros presentados en la Figura 2.24, tienen unas limitaciones que deberían ser conocidas por el programador, para obtener una operación de gran rendimiento. Por ejemplo, existe una relación a cumplir, entre el diámetro de corte de la herramienta, D [mm] y el ancho de la ranura, t [mm], tal que: $1,3 \cdot D < t < 1,7 \cdot D$.

Otra condición a cumplir en las operaciones de corte trocoidal (y por similitud en las operaciones de contorneado) es que la sección de corte, representada por el ángulo de corte, θ , no supere el valor de 40° . Este valor, condiciona la selección de la profundidad de corte radial, ae . Especialmente, cuando se mecaniza materiales templados, debe vigilarse que el programa pueda limitar el valor máximo del parámetro ae , si no es así, la herramienta sufrirá un desgaste excesivo, por el aumento rápido de la temperatura del proceso y finalmente una rotura prematura (Gómez 2006).

Inicialmente, programas de *CAM*, como Hypermill o Cimatron, incorporaron la estrategia de corte trocoide, como operación de desbaste, para la realización de ranuras de trayectoria recta 2D (sobre el plano *XY*). Posteriormente esta estrategia ha evolucionado, para la realización de trayectorias lineales o curvas, en 2D ó 3D (con movimiento simultáneo de los 3 ejes *X, Y, Z*), siguiendo un contorno programado previamente. Hoy en día, la mayoría de los programas *CAM*, han incorporado esta estrategia MAV en las operaciones de desbaste, para obtener un equilibrio óptimo entre el desgaste de herramienta y las posibilidades de alto avance de las máquinas (Fidia 2001). Un ejemplo de la aplicación de esta estrategia, utilizada también en operaciones de acabado, con el programa Hypermill, se muestra en la Figura 2.25.

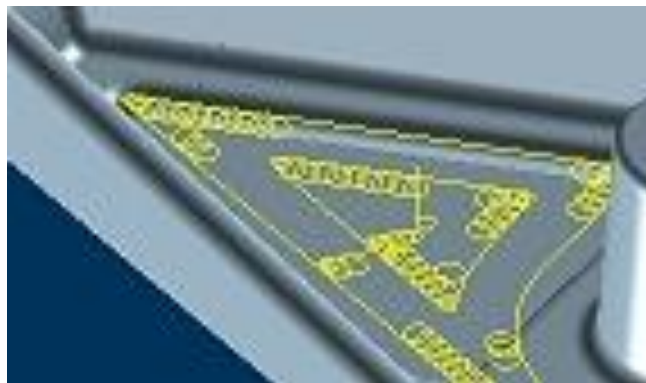


Figura 2.25. Estrategia de corte trocoide en fase de acabado. Fte.: (SAMEC 2003).

El control numérico Heidenhain iTNC530 incorporó un nuevo ciclo de mecanizado de contornos variables, con esta estrategia de corte trocoide (Heidenhain 2009), para realizar una ranura 2D, con una trayectoria predeterminada.

Para mejorar el acabado superficial, pueden generarse estrategias localizadas en distintas superficies, con distinta inclinación, de tal forma que puedan programarse distintas condiciones de corte, con mayor o menor avance o paso, en función del acabado exigido (Uitall 1998).

Costa presentó un estudio experimental sobre la rugosidad superficial obtenida en el proceso de fresado en alta velocidad de una superficie convexa del acero de matrices AISI D6, templado a 60 HRC, con una herramienta de punta esférica, de metal duro con recubrimiento TiAlN de diámetro de corte 12 mm (Costa 2016). Los ensayos experimentales se desarrollaron con distintas estrategias de corte (trayectoria en sentido ascendente o descendente), con distinta inclinación de la herramienta de corte en relación al eje vertical (ángulo positivo $+16^\circ$, 0° , ángulo negativo -16°). Por los resultados obtenidos, Costa concluyó que la estrategia en sentido ascendente, con inclinación positiva de la herramienta debe ser evitada, pues en estas condiciones obtuvo los valores de rugosidad mayores y los valores más elevados de la vibración presente en el proceso.

Una estrategia de mecanizado de 5 ejes adaptada recientemente por el programa Hypermill, con el módulo de acabado *HyperMILL MAXX Machining* (OPEN MIND 2015) permite realizar el mecanizado tangencial a planos verticales, horizontales o con una inclinación concreta. Con esta estrategia de alto rendimiento, si se utiliza un nuevo tipo de fresas de barril (con radios de corte muy elevados en la punta de la herramienta, por ejemplo, $R = 500$ mm), se obtiene un elevado ahorro de tiempo de mecanizado y altas calidades de superficie (Figura 2.26).

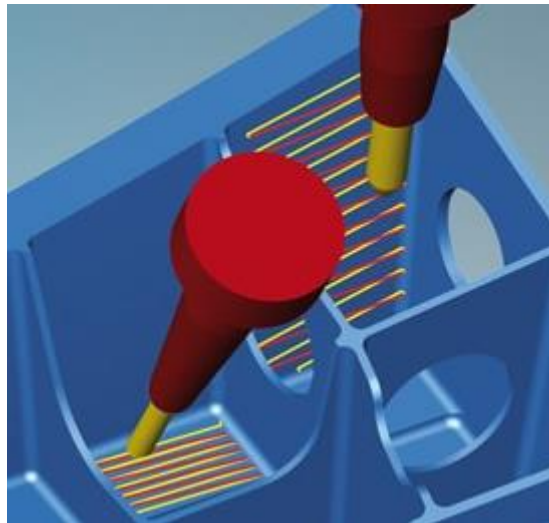


Figura 2.26. Estrategia de mecanizado tangencial. Fte.: (OPEN MIND 2015).

Otra estrategia de mecanizado 3D interesante, es el acabado de planos 3D (Figura 2.27). Dicha estrategia limita la pasada descendente máxima (la profundidad de corte axial, ap) para una mayor seguridad del proceso y evitar así la ruptura de herramientas. (OPEN MIND 2016).

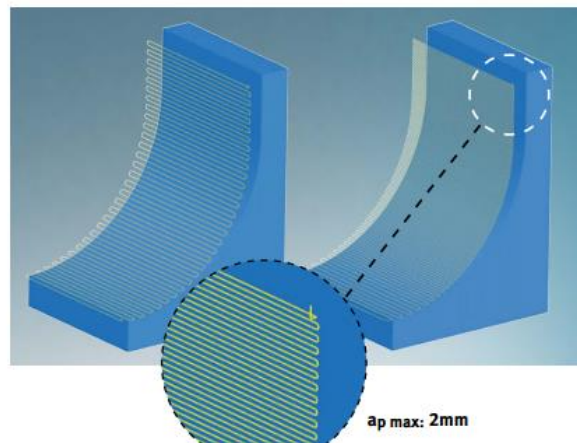


Figura 2.27. Estrategia de Acabado de planos 3D. Fte.: (OPEN MIND 2016).

También existen programas externos a los programas *CAM* que pueden integrarse como módulos adicionales de mecanizado, por ejemplo, el programa *VERICUT*^(c) (CGTech 2016). Este programa realiza una simulación del proceso de mecanizado (Figura 2.28) y permite realizar ajustes en el control numérico de la máquina, para un mejor control de colisiones de herramienta, para el ajuste de la velocidad de avance real de la máquina. De esta forma se reduce o se evita la rotura de la herramienta, se disminuye el tiempo de mecanizado, se mejora el acabado superficial y la tolerancia dimensional.

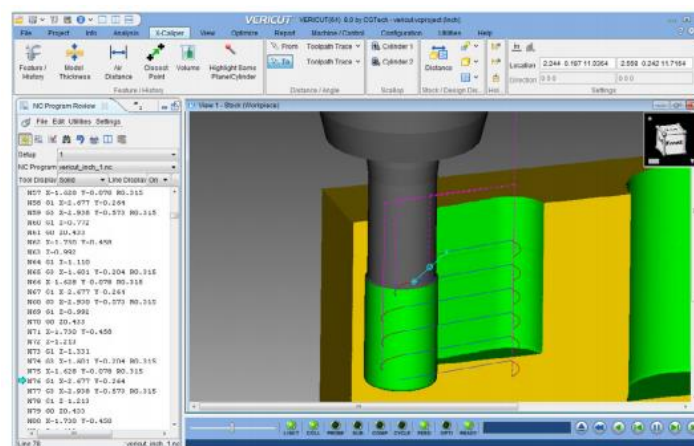


Figura 2.28. Software VERICUT 8. Fte.: (CGTech 2016).

El software *ATC* (*Application Tuning Cycle*) que aporta el fabricante de máquinas-herramienta *DMG* (*Deckel Maho Gildemeister*), permite un sencillo sincronizado de los accionamientos de avance de la máquina para el ajuste óptimo de tres aspectos (precisión, superficie, velocidad), que pueden seleccionarse dentro del programa de control numérico de la pieza (DMG 2004) en aplicaciones de mecanizado en alta velocidad (Figura 2.29).

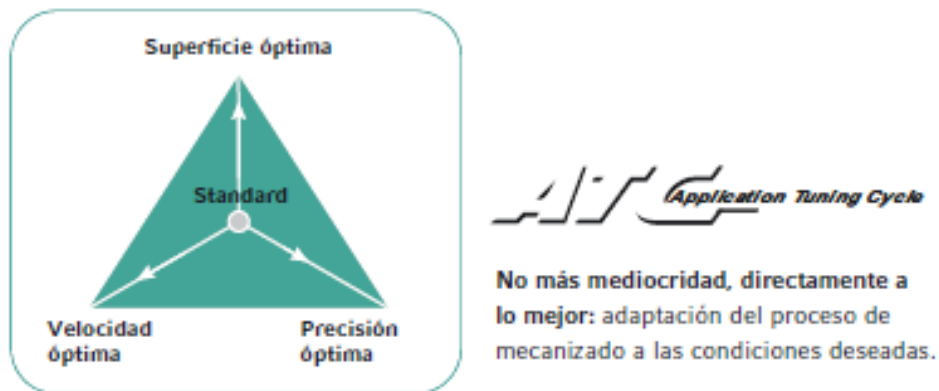


Figura 2.29. Software ATC. Fte.: (DMG 2004).

Según Mateo, consultor de Tebis Iberia, las necesidades de los usuarios dan paso a las nuevas versiones de software de diseño y producción. Por ejemplo, una demanda importante era la medición automática y directa en la fresadora, del desgaste de la herramienta, durante el mecanizado de superficies. Medición del desgaste y/o reducción del diámetro y longitud de corte de la herramienta, para poder compensarlo, en tiempo real, mediante la corrección del radio o de la longitud de la herramienta de referencia. Y medición de la rugosidad recién obtenida, para mantener y controlar la calidad superficial requerida en todo momento (Mateo 2015).

2.6. Herramientas de corte.

La herramienta de corte queda definida por el tipo de geometría, sustrato y recubrimiento (Figura 2.30). Según diversos estudios (Sandvik 2002) y por experiencia propia, entre las herramientas de corte que ofrecen mayor calidad, durabilidad, fiabilidad y precisión, para todo tipo de materiales y especialmente para los materiales utilizados en la fase de acabado de moldes y matrices, resultan ser las herramientas integrales de metal duro micrograno con recubrimiento TiAlN (Yamada 1996).

Si la calidad superficial no es muy exigente y especialmente en matrices de gran tamaño, también en la operación de acabado se utilizan herramientas con material base de acero rápido (*HSS, High Speed Steel*) con recubrimiento o metal duro según la relación entre la longitud y diámetro de la herramienta, o con placas intercambiables de metal duro con recubrimiento TiAlN (López de Lacalle 1999).

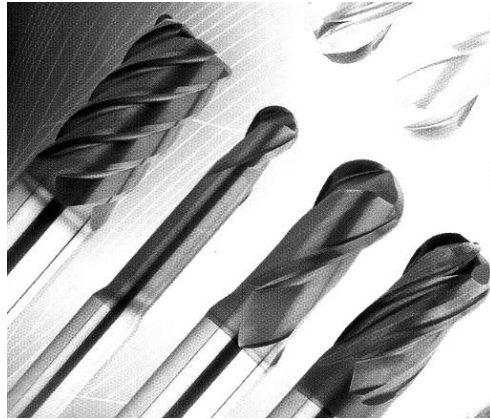
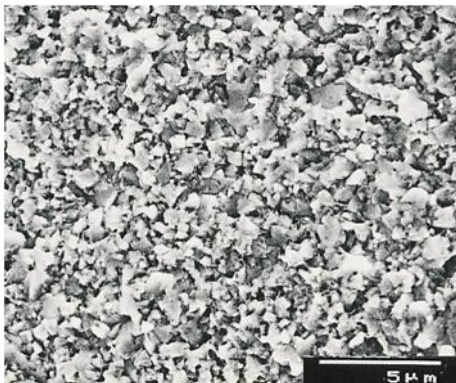


Figura 2.30. Fresas integrales de MAV. Fte.: (Kobelco 2002).

En toda la experimentación realizada en esta tesis, se han empleado herramientas del fabricante *MMC Kobelco*. El sustrato especial de estas herramientas de metal duro submicrograno de la serie *Miracle*, con un tamaño de grano, del orden de $0,3 \mu\text{m}$, posee una estructura más uniforme en comparación al metal duro micrograno convencional (Figura 2.31), con un tamaño de grano del orden de $0,8 \mu\text{m}$, aspecto que le confiere unas propiedades mecánicas más elevadas (mayor resistencia al desgaste y a la rotura). Según el fabricante de la herramienta de corte, la elevada dureza de este material de 92 HRA, se encuentra en equilibrio con una elevada tenacidad de $3,5 \text{ GPa}$, valor cercano a la tenacidad de los aceros rápidos (Kobelco 2001).



(a) Submicrograno Miracle



(b) Micrograno convencional.

Figura 2.31. Sustrato de metal duro. Fte.: (Kobelco 2002).

Al recubrimiento se le exige una elevada resistencia térmica y elevada dureza en equilibrio con una buena tenacidad y adhesión con el sustrato, especialmente cuando se mecanizan materiales templados. Para este fin, el fabricante de recubrimientos Oerlikon, en su política de evolución y mejora de las propiedades y aplicaciones de sus recubrimientos, creó el recubrimiento **BALINIT® ALDURA**,

para un mecanizado de alto rendimiento y fiable de aceros templados entre 45-65 HRC (Oerlikon 2014). Es un recubrimiento base AlCrN, con una dureza de 3.300 HV, puede trabajar a temperaturas hasta 1.100 °C. A continuación se muestra un ejemplo de aplicación, en operación de fresado en alta velocidad del acero de moldes, W. Nr. 12344 templado a 52 HRC:

- Herramienta integral de punta esférica, de metal duro, con recubrimiento BALINIT® ALDURA, diámetro de corte, $D = 10$ mm, $z = 2$ aristas de corte.
- Parámetros de corte: $V_c = 320$ m/min, $f_z = 0,12$ mm/diente, $ap = 0,3$ mm, $ae = 0,3$ mm.
- Criterio de desgaste máximo, $VB = 0,12$ mm.
- Mecanizado sin lubricación.

En estas condiciones el rendimiento de la herramienta fue superior al 50%, respecto los resultados de la competencia, con una vida de herramienta de 850 m.

Para la operación de acabado, especialmente en superficies curvas, la geometría de la herramienta integral (Figura 2.30) más utilizada es la fresa con punta esférica de dos labios (seguida a distancia de herramientas con 4 labios), de herramientas con punta tórica (planas con radio en la esquina) de 4 ó 6 labios. La selección equilibrada entre geometría, recubrimiento y substrato de la herramienta de corte, adaptada al proceso de mecanizado concreto a ejecutar, es vital para garantizar la fiabilidad del proceso.

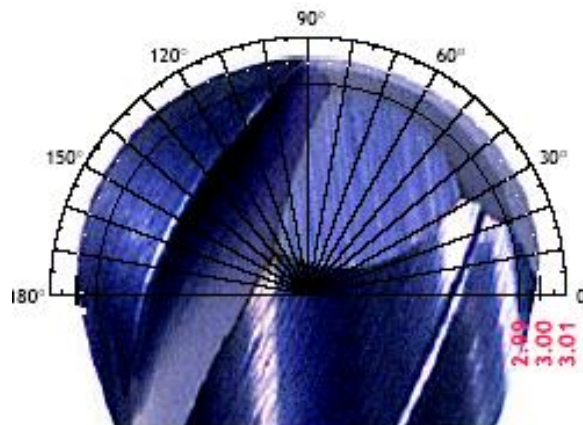


Figura 2.32. Fresa VC2PSB con tolerancias de corte de precisión. Fte.: (Kobelco 2003).

Los principales fabricantes de herramientas han comercializado nuevas geometrías de herramienta con tolerancias de corte más precisas, con longitudes de corte menores o con una relación longitud total/diámetro más elevada, para mejorar el acabado superficial, reducir la flexión de la herramienta y reducir el uso de otros procesos de mecanizado como el rectificado o la electroerosión,

respectivamente (Matsumoto 2003). Por ejemplo, las herramientas integrales de metal duro micrograno serie Miracle Nova, del fabricante *MMC Kobelco* (Kobelco 2003), con tolerancias del radio de corte nominal de $\pm 0,005$ mm (Figura 2.32), según el fabricante cumplen los requisitos antes mencionados.

En la Figura 2.33 se muestra el acabado superficial obtenido con fresa de punta esférica con distinta tolerancia de radio. En la Figura 2.33(a), con tolerancia estándar $\pm 0,01$ mm, y en la Figura 2.33(b) con tolerancia de radio de precisión $\pm 0,005$ mm. La superficie de la izquierda, Figura 2.33(a) no es uniforme, presenta restos de material o viruta soldados a la pieza. Aunque en este caso se obtuviera un parámetro de rugosidad, Ra menor, el proceso de pulido posterior (manual o automático) consumiría mayor tiempo, especialmente si se trabaja con material templado, que el necesario para eliminar las crestas presentes en la superficie de la derecha, Figura 2.33(b).

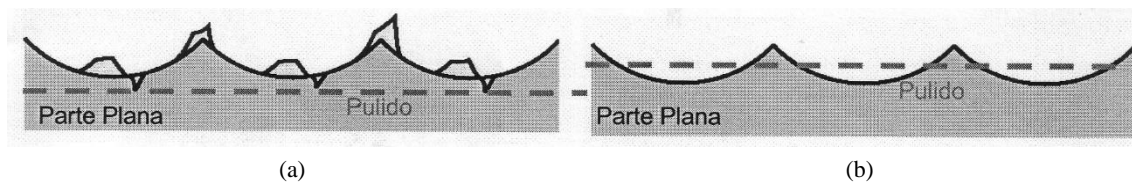


Figura 2.33. Acabado con fresa convencional (a) y fresa de precisión (b). Fte.: (Kobelco 2003).

La evolución de las herramientas de corte es continua para ayudar a la mejora de los procesos de mecanizado. En 2014, Mitsubishi presentaba una evolución de sus herramientas de alta gama, con la serie MIRACLE SIGMA (Mitsubishi 2014). Este nuevo tipo de herramientas, mejoran la precisión geométrica, el acabado superficial del filo de corte y las características de sus recubrimientos (nuevo recubrimiento PVD con base (Al, Ti, Cr)N, respecto a las series anteriores. Esto permite aumentar la precisión y fiabilidad del proceso.

A inicios del 2017, Mitsubishi lanzó al mercado unas “revolucionarias” fresas de acabado de la nueva serie IMPACT MIRACLE REVOLUTION, para el mecanizado de aceros templados. En estas nuevas herramientas se establece una mejora de la vida de la herramienta y un mejor acabado superficial, según los resultados que exponen en su catálogo (Mitsubishi 2017), a partir de los siguientes cambios:

- Mejora del recubrimiento: nueva combinación de dos recubrimientos PVD: (Al, Ti, Si)N y (Al, Cr, Si)N.
- Mejora de la geometría de las aristas de corte (Figura 2.34): ángulo de desprendimiento negativo, menor ángulo de hélice, punta de la herramienta y arista de corte con nueva

tecnología de recubrimiento *ZERO- μ Surface*, que reduce el valor de rugosidad de las superficies de corte de la herramienta (Figura 2.35) y por lo tanto, su réplica en las superficies mecanizadas.

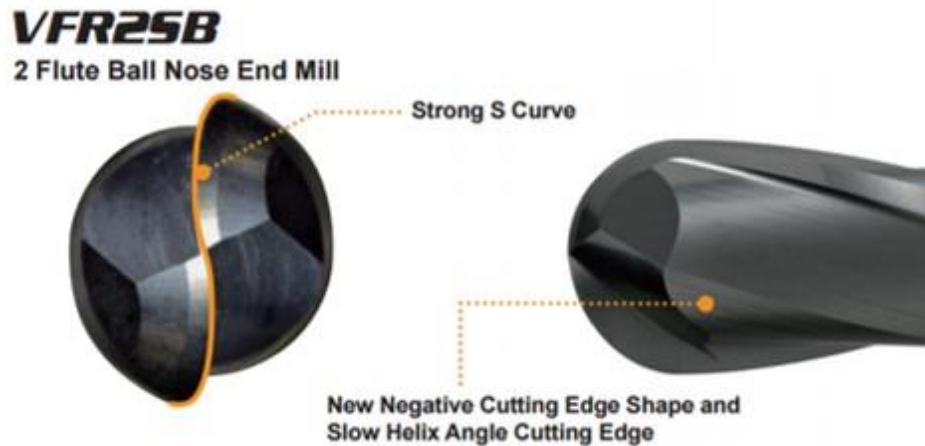


Figura 2.34. Nueva fresa IMPACT MIRACLE REVOLUTION. Fte.: (Mitsubishi 2017).

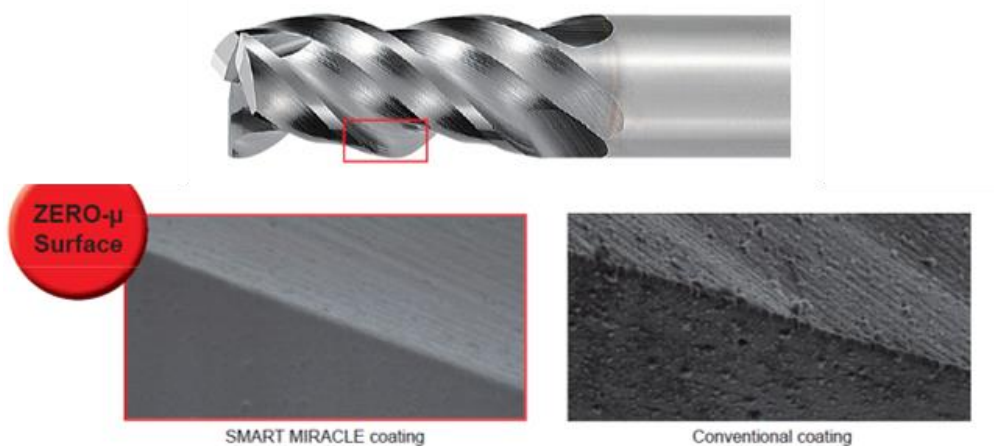


Figura 2.35. Nueva tecnología de recubrimiento de la serie IMPACT MIRACLE. Fte.: (Mitsubishi 2017).

El fabricante de herramientas *LMT Fette*, presentó en la feria industrial AMB 2016 (Thomas 2016), sus nuevas herramientas de corte de punta esférica para mecanizado en alta velocidad (*HSC line Super finish 4*), con 4 aristas de corte de alta precisión (tolerancia en radio $\pm 0,005$ mm), que permiten aumentar la productividad del proceso de mecanizado en un 40%, en comparación con herramientas equivalentes, pero de 2 aristas de corte. Por su material de corte (con tamaño submicrograno del sustrato) y su recubrimiento específico (*TiAlN PVD AL2 plus*), es una herramienta ideal para la fase de acabado de aceros templados de matrices hasta 65 HRC, o para el fresado de moldes de inyección, con durezas alrededor de 50 HRC.

Las condiciones de corte de la herramienta se seleccionan en función del tipo de operación de mecanizado, del material de la pieza, de las características de la herramienta utilizada y de las especificaciones del acabado superficial a obtener. Esta información, básicamente se recoge de la experiencia propia, de los catálogos de las herramientas (Kobelco 2002) y de las recomendaciones de los técnicos de los fabricantes de herramientas (Mitsubishi 2014). Estas recomendaciones sirven como dato de partida, pero después, es trabajo del operario acabar de afinar dichas condiciones de corte, adaptándolas a su caso particular, en función de la máquina-herramienta disponible.

Las condiciones de corte establecidas deben evitar o reducir al máximo una de las causas principales de roturas de herramientas o acabados superficiales no aceptables, las vibraciones en el mecanizado. Sandvik dispone de una guía de aplicación básica (Sandvik 1998) para reducir las vibraciones en los diferentes procesos de mecanizado (fresado, taladrado y torneado). En la medida de lo posible, estas recomendaciones, y la información al respecto que ofrece el fabricante de la herramienta de corte (Kobelco 2002), se han tenido en cuenta en la selección de todos los parámetros tecnológicos implicados en la experimentación realizada en esta tesis.

Para garantizar un mecanizado estable, con la reducción máxima de vibraciones, distintos fabricantes de herramientas sacaron al mercado herramientas con geometrías especiales, de hélice de corte variable, para un mayor control de la vibración respecto a las herramientas estándar, con ángulo de hélice fijo (en general de 30°). Herramientas especialmente indicadas para el fresado de materiales difíciles (aceros inoxidables austenítico, aceros termorresistentes), con grandes voladizos de herramienta. Por ejemplo, Mitsubishi lanzó al mercado una serie de fresas integrales IMPACT MIRACLE de punta plana y/o tórica, con 2-4-6-8 labios (Mitsubishi 2014).

El fabricante de herramientas de corte Tungaloy, en un documento técnico de referencia (Tungaloy 2014) detalla los diferentes problemas que pueden aparecer en el proceso de acabado con herramientas integrales de metal duro (*Solid Carbide Endmills*). Entre otros, se destaca los problemas de pobre acabado superficial o tolerancia dimensional, donde se enumeran una serie de posibles causas y se aportan diferentes contramedidas para reducir o eliminar estos problemas. Contramedidas que afectan a las condiciones de corte seleccionadas, a la geometría de corte de la herramienta, al método de corte o al uso de lubricante.

Uno de los parámetros de control de las operaciones de fresado son las fuerzas de corte aplicadas, para unas condiciones de corte establecidas, ya que tienen una relación directa con la flexión de la herramienta, así como con su desgaste y con la rugosidad de la pieza mecanizada. Lamikiz [et al.]

presentaron un método para obtener los coeficientes específicos para su aplicación en un modelo semi-empírico de fuerzas de corte válido para fresas esféricas (Lamikiz 2008). Se aplicó el método de cálculo propuesto en un estudio experimental, para su validación sobre dos materiales: una aleación de aluminio AA 7075-T6 (AA: *Aluminium Alloy*) y el acero para trabajo en caliente ORVAR Supreme a 52 HRC (norma W. Nr. 1.2344). Para los ensayos se utilizó una fresa esférica de metal duro con recubrimiento TiAlN, para realizar la operación de ranurado horizontal, con distintas condiciones de corte (profundidad de corte y avance por diente) en función del material:

- Condiciones para AA7075-T6: $ap = 0,5-3,5$ mm; $fz = 0,02 - 0,17$ mm/diente; $Vc = 76$ m/min
- Condiciones para ORVAR: $ap = 0,5-3,2$ mm; $fz = 0,013 - 0,04$ mm/diente; $Vc = 100$ m/min

Para demostrar la validez de los coeficientes calculados se realizaron también ensayos con distintas estrategias de mecanizado (ascendente, descendente y transversal), en superficie con pendiente (15°, 30°, 45°). En la mayoría de los casos se han obtenido resultados con errores inferiores al 10%.

La nanotecnología se ha incorporado también en el material y en los recubrimientos de corte, lo que ha provocado una mejora de las propiedades físicas, especialmente en dureza o resistencia al desgaste por abrasión, en equilibrio con una mayor resistencia a la rotura y mayor temperatura de oxidación (Oerlikon Balzers 2011).

2.6.1. Estudios de desgaste de herramientas de corte.

En función de la operación concreta de mecanizado, se exige una duración de vida de herramienta de corte determinada por el desgaste máximo admisible. Existen diferentes mecanismos de desgaste que pueden presentar las herramientas de corte empleadas en operaciones de fresado (Sandvik 2000): Abrasión, astillamiento/fractura, fatiga y adhesión. El más común es el desgaste por abrasión y suele medirse en la superficie de incidencia de la herramienta (VB), tal como marca la norma ISO8688-2:1989, para los ensayos de vida de herramienta en operaciones de fresado, en la fase de acabado (ISO8688-2 1989). Según esta norma en los ensayos para evaluar la vida de la herramienta de corte en las operaciones de fresado, si no se indica lo contrario, el desgaste a controlar en la superficie de incidencia de la herramienta debe ser $VB = 0,30$ mm.

Panosso [et al.] realizaron un estudio del desgaste de herramientas esféricas (con radio, $R = 3$ mm y número de aristas, $z = 2$), de metal duro calidad P10, con recubrimiento TiAlN (Panosso 2005). Se estableció un criterio de vida de herramienta, con un desgaste máximo, $VB_{m\acute{a}x} = 0,20$ mm. Las condiciones de corte planteadas para la fase de acabado, en la operación de contorneado del acero AISI H13 templado a 52-54 HRC, fueron las siguientes: $V_c = 326$ m/min, $f_z = 0,15$ mm/diente, $ap = 0,15$ mm y $ae = 0,20$ mm. Bajo estas condiciones de alta velocidad, la duración de la herramienta fue de 150 min, con presencia de desgaste por abrasión y astillamiento en la superficie de incidencia de la arista de corte de la herramienta. Inicialmente en los primeros 30 min el desgaste es elevado, debido a la acomodación de la arista de corte. A medida que aumentaba el desgaste, también aumentó el valor de rugosidad, Ra . Por ejemplo a los 90 min, $Ra = 0,66$ μm y a los 150 min, la rugosidad final fue $Ra = 1,65$ μm .

En general, según la experiencia práctica, a partir de un cierto desgaste, en la herramienta aparecen microfracturas que se ampliarán rápidamente, en cualquier momento y de forma aleatoria, lo que perjudica a la superficie mecanizada de la pieza y al rendimiento de la operación. En un estudio de desgaste de herramientas, Toh consideraba una herramienta como nueva si no había sufrido un desgaste superior a 0,05 mm, en la cara de incidencia de la arista de corte (Toh 2004).

Por otra parte, las herramientas para MAV tienen un alto coste y pueden ser reafiladas hasta 3 veces si no existen roturas de las aristas de corte, o no se ha superado un cierto desgaste en la superficie de incidencia. Con el proceso de reafilado y un nuevo recubrimiento original del fabricante, el rendimiento de las herramientas es equivalente a la herramienta nueva, con un coste de herramienta inferior a un 60%. También cabe destacar el ahorro en residuos, y en especial, los residuos de las herramientas de corte, por la dificultad del reciclaje del metal duro con recubrimiento.

Arizmendi [et al.] analizaron la influencia del desgaste de la herramienta sobre la geometría del perfil de rugosidad de la pieza y la toma de decisión automática del reemplazo de la herramienta en el fresado de alta velocidad de aleaciones de aluminio AA7075 en componentes del sector aeronáutico (Arizmendi 2002). Se concluye que la geometría del perfil básico de rugosidad puede reflejar con fidelidad el nivel de desgaste de la herramienta. En concreto, algunos parámetros de rugosidad, el espectro y el coeficiente de autocorrelación de los perfiles muestran variación con el desgaste de la herramienta. Esta variación está causada por la vibración generada entre pieza-herramienta debido al desgaste de la misma. También se demuestra que el espectro de la señal de intensidad de los motores lineales de avance es sensible al desgaste de la herramienta en un determinado rango de frecuencia.

En relación al proceso de fresado de alta velocidad de aceros de moldes y matrices templados, Wang [et al.] presentaron un estudio experimental donde investigaron los mecanismos de desgaste y las fuerzas de corte presentes sobre la herramienta de corte, en función del recubrimiento de la herramienta de metal duro (TiAlN y TiSiN), del ángulo de inclinación, del diámetro de corte y del voladizo de la herramienta ensayado (Wang 2015). Los aceros ensayados fueron el acero de moldes S136 (templado a 51 HRC) y el acero de matrices SKD11 (templado a 62 HRC). Por los resultados obtenidos, comprobaron como se reduce la calidad superficial y aumentan las fuerzas de corte al aumentar el voladizo de la herramienta. Los mecanismos de desgaste presentes en la experimentación con las condiciones de corte ensayadas fueron el desgaste abrasivo, pelado del recubrimiento, desgaste por oxidación. La vida de la herramienta fue 4 veces superior con el recubrimiento TiSiN, respecto al recubrimiento TiAlN.

El aumento de la eficiencia de los procesos de mecanizado debe ir acompañado de estrategias de fabricación con el mínimo impacto medioambiental. El control del desgaste de herramientas de corte permite la reutilización de herramientas, la reducción de residuos (tanto de piezas defectuosas, como herramientas de herramientas usadas) y la reducción de los consumos energéticos de las máquinas empleadas. En este sentido, Vila presentó un estudio de diferentes estrategias de corte para un mecanizado sostenible de aceros templados a 60 HRC (Vila 2015). En concreto presentó un estudio teórico y experimental, donde se relacionaba el consumo de energía en la operación de planeado (fase de acabado), la rugosidad superficial obtenida con diferentes condiciones de corte (velocidad de corte y avance por diente variables, profundidades de corte constantes) y diferentes estrategias de corte (mecanizados unidireccionales o bidireccionales sobre el eje *X*, o sobre el eje *Y*), con aplicación de la metodología estadística del diseño de experimentos.

2.7. Sistemas de fijación de las herramientas.

Los sistemas de fijación de las herramientas a la máquina (portapinzas) cumplen una labor esencial para obtener piezas con la calidad exigida. Estos sistemas deben cumplir los siguientes requisitos: Precisión, rigidez, montaje-desmontaje rápido de la herramienta y de la máquina.

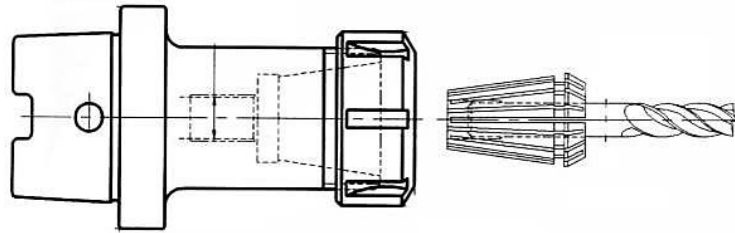


Figura 2.36. Ejemplo de portapinzas de fijación mecánica. Fte.: (Lamikiz 2002).

Existen distintas tecnologías fijación de los portapinzas: fijación mecánica (Figura 2.36), fijación hidráulica (Figura 2.37) o fijación térmica (Figura 2.40).

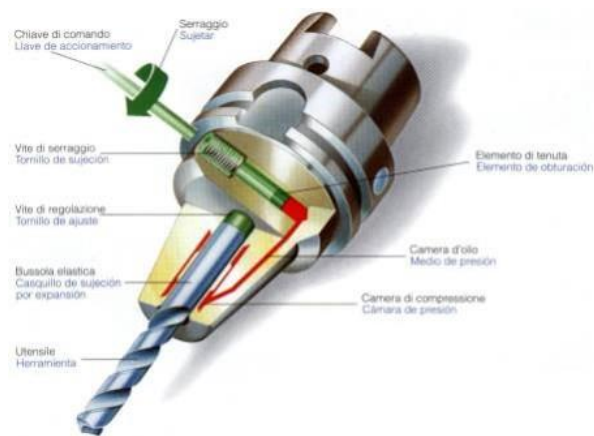


Figura 2.37. Ejemplo de portapinzas de fijación hidráulica. Fte.: (Lamikiz 2002).

Por otra parte, cada máquina monta un tipo de cono específico (con distinta geometría y tamaño) sobre su husillo de rotación: conos ISO, del tipo BT (MAS403) o tipo CAT, según DIN69871 (Figura 2.38); conos HSK-A, según DIN69893 (Figura 2.39).

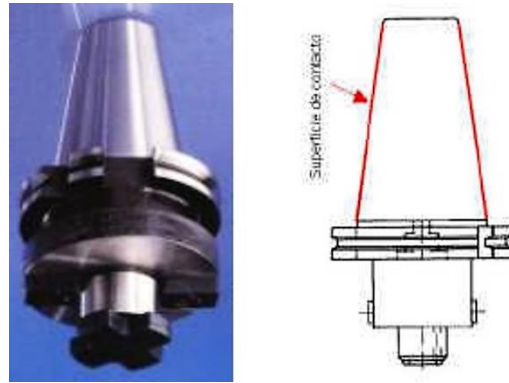


Figura 2.38. Ejemplo cono ISO, tipo CAT y superficies de contacto con husillo. Fte.: (Lamikiz 2002).

Los conos tipo ISO quedan fijados al husillo de la máquina, a partir de un actuador hidráulico que actúa sobre un tirante, colocando éste en su posición, a través de un contacto superficial radial, respecto al husillo. En condiciones de alta velocidad de giro, debido a las fuerzas centrífugas aplicadas sobre el sistema de amarre del husillo, éste puede expandirse y crear imprecisión en el proceso de mecanizado, como consecuencia del desplazamiento de la herramienta y de su sistema de fijación.

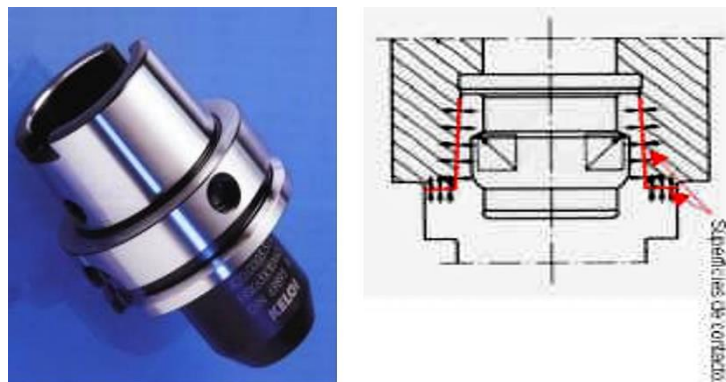


Figura 2.39. Ejemplo cono HSK A63 y superficies de contacto con husillo. Fte.: (Lamikiz 2002).

En los conos tipo HSK, el sistema de amarre permite un contacto superficial con el husillo de la máquina, en el sentido radial y axial (Figura 2.39), lo que aporta mayor rigidez y precisión en condiciones de mecanizado de alta velocidad (Lamikiz 2002).

Un parámetro fundamental a controlar en condiciones de mecanizado en alta velocidad de giro es el grado de equilibrado del conjunto de elementos en rotación: portapinzas, herramienta de corte y el husillo de la máquina. En los procesos de mecanizado de alta velocidad se utilizarán portapinzas con excentricidades máximas entre 0,003-0,006 mm. De esta forma se evitará la aparición del efecto de

las vibraciones que afectarían notablemente al acabado superficial. Existe una relación indirecta entre vida de herramienta y su excentricidad (Sandvik 1999), es decir, mayor excentricidad de la herramienta, menor durabilidad de la misma.

En muchas aplicaciones, especialmente cuando la relación entre longitud y diámetro de herramienta es elevada, se ha impuesto la fijación térmica (Figura 2.40), pues es un sistema con elevada rigidez, precisión (excentricidad inferior a 0,005 mm, medido con comparador en la punta de la herramienta) y con un mejor equilibrado, por una menor presencia de elementos mecánicos (MST 2004b).



Figura 2.40. Fijación térmica de la herramienta, con cono ISO tipo BT. Fte.: (MST 2004).

La evolución de estos sistemas de fijación térmica se ha producido por una parte en el aumento de tipos disponibles en cuanto a la variedad de dimensiones y características geométricas. Por otra parte ha surgido un sistema especial de fijación que integra pinza y portapinzas en un sólo elemento (*Mono series System*), lo que representa un aumento de la precisión, o reducción de la excentricidad, por debajo de 0,003 mm (MST 2015). La máxima precisión se ha obtenido con el sistema integral de la serie UNO de MST Slimline, con una excentricidad máxima de 0,001 mm. Sistema especialmente indicado para procesos de micromecanizado, de elevada precisión (Figura 2.41). Para conseguir esta precisión se exigen unas tolerancias específicas en la herramienta de corte: Tolerancia diámetro de mango, h4; tolerancia de redondez, 0,3 μm ; tolerancia de cilindridad, 0,5 μm .



Figura 2.41. Sistema de fijación térmica integral. Serie UNO. Fte.: (MST 2015).

Los beneficios que aporta este tipo de fijación pueden verse reducidos si no se realiza la gestión adecuada del mantenimiento del equipamiento, del control del voladizo de herramientas y pinzas, o de la longitud de amarre de las herramientas.

En general, los fabricantes de sistemas de fijación rotativos aportan como dato el grado de equilibrado G , del sistema de sujeción, para unas revoluciones dadas, (p. ej.: portapinzas equilibrado $G2,5$ para 20.000 min^{-1}), tal como indica la norma ISO 1940-1 (ISO 1940-1: 2003). Este dato, por sí solo, no es suficiente, pues sería necesario conocer el grado de equilibrado del sistema completo.

Con la aplicación de la Ec. 2.6 puede calcularse el grado de equilibrado total exigido o necesario si se conocen la suma de las masas y los desequilibrios residuales del sistema, del conjunto de los elementos en rotación en el proceso de mecanizado (husillo de la máquina, portapinzas y herramienta de corte).

$$U = \frac{9.553 \cdot m \cdot G}{S}$$

Ec. 2.6

Donde U [g·mm] es el desequilibrio residual del elemento en rotación, S [min^{-1}] velocidad de giro del husillo, m [kg] masa del sistema en rotación y G [mm/s] la clase o grado de equilibrado según norma ISO1940-1. La excentricidad e , en [mm] ó [g·mm/kg] del sistema puede calcularse también como la relación U/m .

2.8. Sistemas de sujeción de las piezas.

En el mercado existen los sistemas con sujeción mecánica (Figura 2.42), hidráulica, magnética y neumática, respecto a la fijación de la pieza en la máquina. Para piezas de grandes dimensiones, la fijación se realiza mediante tornillos o bridas especiales.



Figura 2.42. Mordaza mecánica y accesorios modulares. Fte.: (Gerardi 2003).

La gran fuerza de amarre de la fijación hidráulica puede proporcionar mayor deformación de la fijación y/o pieza (Gerardi 2003). En las operaciones de acabado puede aparecer una deformación de la pieza en superficies con paredes delgadas, lo que genera una falta de precisión dimensional de la pieza.

Cantano [et al.] presentaron un estudio teórico-experimental en relación al uso de fijaciones magnéticas en procesos de fresado (Cantano 2015). El objetivo de este estudio fue obtener una metodología para el uso eficiente de este tipo de fijaciones y obtener una mejora en la productividad del proceso. La limitación de estos sistemas viene dada por la necesidad de una superficie mínima de pieza, con una rugosidad y tolerancias mínimas, con unas condiciones de corte máximas, tal que se garantice la fuerza sujeción adecuada.

Para piezas de dimensiones medias, los fabricantes han adoptado la fijación magnética para un menor número de estacadas, aunque presenta el problema de las virutas pegadas al material, especialmente al mecanizar material templado, virutas que pueden crear micro-roturas en la arista de corte. Cada tipo de fijación tiene su campo de aplicación, en función de las operaciones a realizar y de la geometría específica de la pieza. La precisión en el apriete garantiza la repetibilidad del proceso.

2.9. Materiales de las piezas.

Los materiales de las piezas a fabricar es otro de los aspectos clave a estudiar. La tendencia actual es la utilización de materiales de difícil maquinabilidad o mecanizado de materiales templados, pero que permiten un rendimiento óptimo de los moldes y matrices en sus distintas aplicaciones según el proceso de fabricación (Arrazola 1999). Según las dimensiones y geometría del molde o matriz, también la tendencia es realizar todas las operaciones de mecanizado sobre material templado con la pieza en bruto (Uiltall 1999), o bien las últimas operaciones de semi-acabado y acabado con la superficie templada (Altan 2001).

En las operaciones de mecanizado para la correcta selección de las condiciones de corte, existe una clasificación básica de los materiales de las herramientas de corte, según la normativa ISO 513:2012 (ISO 513:2012), dónde se aplica un dígito y un color a cada tipo de material (Figura 2.43). En los catálogos de los fabricantes de las herramientas de corte, aparece esta notación específica en la designación de cada tipo de herramienta, con su grado de aplicabilidad para un determinado material y su dureza (Mitsubishi 2014).



Figura 2.43. Designación por colores de los materiales de trabajo. Fte.: (ISO 513:2012).

De esta forma puede conocerse su idoneidad para mecanizar un material u otro. En el caso de los aceros templados, (el dígito es la H y el color gris), para una recomendación más precisa, en función de su dureza se establecen distintos intervalos según el fabricante (por ejemplo: 45-55 HRC, 55-60 HRC, > 60 HRC). En el apartado técnico del catálogo, donde se muestran las recomendaciones de las condiciones de corte, éstas se concretan a partir de los siguientes parámetros: herramienta de corte y su diámetro de corte, operación de mecanizado, tipo de material y su dureza.

Schmidt explica en un artículo algunas de las ventajas del fresado de material templado (Schmidt 2015). Ventajas, como la reducción del 50% del tiempo de proceso (con la reducción del uso del proceso de electroerosión), 100% de reproducibilidad entre las distintas piezas de una serie, mejora de la calidad superficial comparada con la calidad obtenida mediante el proceso de electroerosión.

Esto implica un conocimiento más profundo de las características más significativas de estos materiales. Por este motivo, aparte de conocer el grupo de materiales específico, al cual pertenece un material (p. ej.: aceros inoxidable austeníticos), es imprescindible conocer como mínimo su dureza y su conductividad térmica.

La Fundación ASCAMM publicó un excelente documento guía para la elección de aceros en la fabricación de moldes y matrices (ASCAMM 2000), con información completa sobre las propiedades de estos materiales, documento elaborado con la colaboración de empresas fabricantes de moldes y matrices y supervisado por los centros técnicos de las principales empresas fabricantes de aceros (Böhler, Thyssen Ibérica y Uddeholm). En este documento, se muestra la clasificación básica de los aceros utilizados en el sector del molde y matriz, según su aplicación:

- Aceros para herramientas de trabajo en frío. Son aceros para la transformación de materiales metálicos, cuya temperatura de trabajo es inferior a los 200 °C. Sus características generales son: elevada resistencia mecánica, al desgaste; elevada dureza, tenacidad y estabilidad dimensional (UNE 36018-2:1994).
- Aceros para herramientas de trabajo en caliente: Son aceros para la transformación de materiales metálicos, cuya temperatura de trabajo es superior a los 200 °C. Sus características generales son: elevada resistencia al desgaste y tenacidad en caliente; estabilidad dimensional y resistencia a la corrosión (UNE 36018-3:1994).
- Aceros para moldes de transformación de plástico: Son aceros para la transformación de materiales plástico. Sus características generales son: elevada resistencia al desgaste; estabilidad dimensional, resistencia a la corrosión y buena aptitud al pulido. Aceros clasificados según normativa UNE 36018-3:1994.

Según el campo de aplicación y la clasificación anterior existen multitud de aceros a utilizar según sean las propiedades exigidas para su trabajo productivo. En concreto, para una empresa fabricante del sector molde o matriz, esta cantidad de aceros debe reducirse a un número mínimo de tipos de aceros que tengan una cobertura del 100% en las aplicaciones convencionales, tal como se señala en el documento guía comentado anteriormente (ASCAMM 2000). La normativa ISO4957 también aporta información a tener en cuenta, para el uso correcto de los aceros de herramientas para trabajos en frío o en caliente (ISO4957:1999). Información como los procesos de fabricación necesarios para

su obtención, la composición química y propiedades mecánicas, o los procedimientos de ensayo e inspección para garantizar su calidad.

Uno de los materiales con una cobertura amplia para la fabricación de moldes para la transformación de plásticos y muy utilizado como acero para herramientas de trabajo en caliente, es el acero aleado, según norma W. Nr. 1.2344. Por otra parte, el material clásico para la fabricación de matrices es el acero para herramientas de trabajo en frío, según norma W. Nr. 1.2379. La composición química de ambos materiales, con el intervalo del porcentaje de sus principales elementos de aleación se presenta en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Composición química en porcentaje en peso de aceros básicos. Fte.: (ASCAMM 2000).

W. Nr.	C[%]	Si[%]	Mn[%]	Cr[%]	Mo[%]	V[%]
1.2344	0,37-0,47	0,90-1,20	0,30-0,50	4,80-5,50	1,20-1,50	0,90-1,10
1.2379	1,50-1,60	0,10-0,40	0,15-0,45	11,0-12,0	0,60-0,80	0,90-1,10

En este punto es importante una aclaración en relación a la notación empleada para la designación de los aceros que se nombran en esta tesis. En la mayoría de los casos se empleará la nomenclatura según la norma alemana DIN, en forma numérica, en función del número del material W. Nr. (*Werkstoff Nummer*) y las normas españolas UNE antiguas (UNE 36071:1975 ó UNE 36072:1975). Estas normas a pesar de no estar vigentes, se han utilizado y se siguen utilizando ampliamente en el sector industrial y académico.

Actualmente, la norma española vigente UNE-EN para la designación de los aceros de forma simbólica se realiza de acuerdo a la norma UNE-EN 10027-1:2006 (EN 10027-1:2005). Para la designación de los aceros de forma numérica se realiza de acuerdo a la norma UNE-EN 10027-2:2016 (EN 10027-2:2015). Estas normas son similares a las normas alemanas DIN-EN 10027-1 y DIN-EN 10027-2, respectivamente.

A continuación en la Tabla 2.2, se muestra las equivalencias entre las distintas normas de materiales empleadas en distintos países, para los aceros de la Tabla 2.1. En la Tabla 2.2 también se muestra la designación de los aceros según norma americana *AISI* (*American Iron and Steel Institute*) y norma japonesa *JIS* (*Japanese Industrial Standard*) por ser conocida y utilizada en el sector industrial.

Tabla 2.2. Tabla de equivalencias entre distintas normas de materiales.

W. Nr.	UNE-EN (actual)	UNE (antigua)	AISI	JIS
1.2344	X40CrMoSiV5	F-5318	H13	SKD 61
1.2379	X160CrMoV12	F-5211	D2	SKD 11

Actualmente los fabricantes de aceros para el sector del molde y matriz están innovando sus materiales para obtener características isotrópicas que permiten un comportamiento más uniforme y mejorado en los procesos de fabricación que intervengan. Como argumento de venta, también indican la mejora en el acabado superficial que esta innovación supone (Böhler 1997). Por ejemplo, para aceros de trabajo en caliente, Böhler presentó el acero inoxidable M333 (AISI 420), destacando que la producción de moldes con acabado brillante ya no suponía ningún riesgo para el fabricante de moldes, pues se trata de un acero inoxidable al temple para moldes de altas prestaciones que requieren un pulido espejo, alta tenacidad, buena dureza y buena disipación de calor (Böhler 2002).

Para aceros de trabajo en frío, Böhler aconseja el uso de otros aceros, cuyo rendimiento es mayor al acero W. Nr. 1.2379, especialmente en aplicaciones donde se requiere alta tenacidad y dureza, por ejemplo, para la estampación de aceros de alta resistencia utilizados en el sector de la automoción. Así, un acero posible, sustituto del W. Nr.1.2379, sería el acero K340 de Böhler. También, cuando las especificaciones de la matriz exigen un material con propiedades homogéneas en todas las direcciones, con propiedades isotrópicas, los fabricantes de aceros presentan aceros pulvimetalúrgicos, como el acero K390 de Böhler (Böhler 2002).

Existen algunos estudios concretos sobre el mecanizado de materiales templados para moldes y matrices que consideran la integridad superficial como factor a controlar (Elbestawi 1997) y (Dewes 1997). Elbestawi [et al.] presentaron una investigación experimental sobre el fresado en alta velocidad con acero de moldes, según norma AISI H13 (W. Nr. 1.2344) con una dureza entre 45 y 55 HRC. Para la experimentación se utilizaron fresas de punta esférica de diámetro 12,7 mm y con una placa de dos calidades diferentes de PCBN (Nitruro de Boro Cúbico Policristalino), con 3 formas de aristas de corte. También se determinó el efecto de lubricante (en seco / con lubricante) sobre la vida de herramienta. Los parámetros de corte se fijaron en dos niveles: velocidad de corte, V_c entre 220-1.320 m/min; avance por diente, f_z entre 0,025-0,100 mm/diente; profundidad de corte axial entre 0,63-2,00 mm y radial de 0,25 mm. El eje de herramienta se giró 10°, para evitar el efecto de la velocidad de corte nula en la punta de la herramienta. En este estudio se midieron las componentes de las fuerzas

de corte, el desgaste de herramienta (VB) y la rugosidad. También se tomaron muestras de las virutas generadas durante el mecanizado. Como conclusiones más interesantes, se destacan las siguientes:

- La calidad de placa con alto contenido en CBN (Nitruro de Boro Cúbico) y arista de corte afilada, ofrece el mejor rendimiento de la herramienta, sin refrigeración. Con refrigeración, el rendimiento empeora notablemente debido a la pobre resistencia al choque térmico del material CBN.
- El rango de rugosidad, Ra varió de $0,20\ \mu\text{m}$ con herramienta nueva, a $0,60\ \mu\text{m}$ con herramienta gastada con las condiciones de corte: $V_c = 400\ \text{m/min}$, ($V_{ce} = 174\ \text{m/min}$), $f_z = 0,025\ \text{mm/diente}$ y $Ad = 0,64\ \text{mm}$. Se obtiene una rugosidad menor con el aumento de la dureza. Con velocidad de corte mayor, $V_c = 2.393\ \text{m/min}$ ($V_{ce} = 1.044\ \text{m/min}$) la rugosidad es mayor debido a la aparición de vibraciones.

Un molde se compone de multitud de elementos (placas de fijación, placas intermedias, placas figura, casquillos, columnas guías, etc.) compuestos por diversos materiales (por ejemplo, para las placas: aceros según norma W. Nr. 1.1730, W. Nr. 1.2085 ó W. Nr. 1.2312; para los casquillos o columnas: aceros de cementación). Estos elementos suelen ser normalizados y existen fabricantes especializados en estos elementos (Hasco 2017). La empresa moldista o matricera, salvo casos especiales, subcontrata la mayor parte de la fabricación de estos elementos normalizados. En general, estas placas se suministran calibradas, con unas tolerancias dimensionales y acabados superficiales iniciales, variables, en función de las dimensiones de estos elementos. Como ejemplo, para una placa postizo del fabricante Vap, referencia PZ/60 x 106 x 36 x 1.2344, se suministra con una rugosidad, Rz de $10\ \mu\text{m}$, y con tolerancias dimensionales de $\pm 0,1\ \text{mm}$ (Vap 1998).

Con las visitas a las empresas realizadas, se confirma que el material más utilizado para la fabricación de moldes es el acero para trabajo en caliente, W. Nr. 1.2344 y para la fabricación de matrices el acero para trabajo en frío, W. Nr. 1.2379. En aplicaciones especiales, o según el sector industrial, se exige un material diferente. Por ejemplo, los moldes para el sector de alimentación deben tener unas propiedades elevadas anticorrosión, por lo tanto, se emplean aceros inoxidable como el acero W. Nr. 1.2083. También se utilizan aceros que no requieren un tratamiento térmico posterior de templado, pero que poseen gran dureza, como los aceros W. Nr. 1.2311 ó W. Nr. 1.2312 (mejor maquinabilidad y pulido), o el acero W. Nr. 1.2711 y W. Nr. 1.2738.

2.10. Sistemas de lubricación.

Para reducir el impacto ambiental y el coste de mecanizado, la tendencia es reducir al máximo el uso de lubricantes y/o refrigerantes, especialmente en las operaciones de fresado. Esto es posible gracias al avance tecnológico de las herramientas de corte ya comentado anteriormente. La sustentabilidad de los procesos, el concepto ECO₂ (ECOLógico y ECONómico), la fabricación verde o limpia (“*green or clean manufacturing*”), son objetivos a tener en cuenta en los procesos industriales, y por supuesto, en la fabricación por mecanizado de arranque de viruta (Pereira 2016).

En mecanizado convencional normalmente se mecaniza con taladrina (emulsión acuosa) o con emulsiones de aceite, según el material o la operación de corte. En mecanizado de alta velocidad según sea el material y su dureza se requiere aire a presión convencional (6 bar), aire a alta presión (40 bar) o microlubricación (mínima cantidad de lubricante con aire a presión y pulverización de microgotas de aceite de corte), mediante dispositivos similares al mostrado en la Figura 2.44.

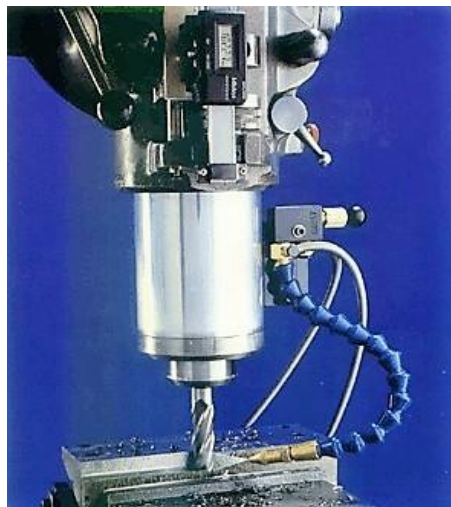


Figura 2.44. Sistema de microlubricación. Fte.: (Noga 2002).

En principio, según los fabricantes de estos sistemas de microlubricación, su uso permite mejorar el rendimiento de las herramientas de corte, reducir el impacto mediambiental y aumentar la seguridad e higiene de los operarios y su entorno. La función básica del lubricante, en este caso, es disminuir la posible adhesión de material a la herramienta de corte.

El uso de aceites de cortes especiales para microlubricación, no tóxicos, biodegradables y con baja viscosidad ayudan a tal efecto. El caudal empleado de aceite de corte depende de la aplicación y del

material a mecanizar. Debe vigilarse la aparición de microneblina en el ambiente alrededor de la máquina-herramienta, en función de este caudal y del tipo de aceite, pues puede ocasionar molestias a los operarios.

Durante los procesos de mecanizado se genera una considerable cantidad de calor, debido a la deformación plástica del material a mecanizar originada en la zona de cizalladura, por la fricción de la viruta con la superficie de desprendimiento y a la fricción de la superficie mecanizada de la pieza con la superficie de incidencia de las aristas de corte de la herramienta. Estas condiciones de fricción y temperatura causan un desgaste de la herramienta, dando como resultado un pobre acabado superficial y un trabajo impreciso si no se controla el proceso (Celaya 2002). Celaya [et al.] realizaron un análisis teórico y experimental del efecto del lubricante micropulverizado (*MQL*, *Minimum Quantity of Lubricant*), en el fresado a alta velocidad de aleaciones de aluminio. Se hace un repaso de los mecanismos de desgaste presentes y se evalúa el tipo de herramienta más adecuado según diferentes composiciones de este material. Se realizaron pruebas con dos tipos de lubricantes: emulsión de aceite en agua al 95% (taladrina) y aceite para *MQL*. Se ensaya una operación de contorneado, mediante corte en concordancia, con herramienta de acero rápido al 8% de Cobalto. En resumen, en los ensayos realizados se produce un proceso de difusión/adhesión de aluminio sobre la geometría de la herramienta en función de unas condiciones de trabajo concretas ($V_c = 942$ m/min, $f_z = 0,1$ mm/diente, $Ad = 3$ mm y $Rd = 3$ mm), de la disposición de las boquillas del lubricante (a 45° y a 135°) y del caudal del sistema *MQL* ($0,04 - 0,06$ cm³/min). En conclusión se obtiene un mejor rendimiento de la herramienta con *MQL* con inclinación a 135° y una reducción del 95% en cuanto a consumo de lubricante.

Kitaura observó que con la lubricación adecuada se reduce el choque térmico en el proceso de corte y el proceso de mecanizado es más estable y fiable, al obtener un mayor rendimiento de la herramienta (Kitaura 1999). Kitaura presentó un estudio de fresado con alta velocidad de corte, sobre dos tipos de materiales, acero al Carbono a 190 HB y acero de moldes, W. Nr. 1.2344 a 52 HRC y 33 HRC, usando fresas de acabado de metal duro, recubiertas con (Al, Ti)N de 6 labios y diámetro $D = 10$ mm. La velocidad de corte, V_c varió entre 157 - 628 m/min, el avance por diente, $f_z = 0,1$ mm/diente y la profundidad de corte radial, $Rd = 0,5$ mm y axial $Ad = 10$ mm. Se usaron diferentes tipos de refrigerante: emulsión, aire a presión y en seco. Para el mecanizado de acero de moldes templado, con aire a presión se obtuvo el mínimo desgaste y un proceso más estable. En seco y con emulsión, la vida de herramienta disminuyó cuando la velocidad de corte excedía 314 m/min, en cambio, con aire a presión la vida de herramienta tendía a disminuir a partir de 471 m/min. Con el mismo material a menor dureza, la influencia del sistema de refrigeración fue menor.

En un estudio más reciente, Su [et al.], investigaron la influencia del lubricante en cuanto al desgaste de herramienta y acabado superficial, para el mecanizado de materiales difíciles como el acero de herramientas AISI D2 (W. Nr. 1.2379) endurecido a 62 HRC (Su 2007). En las pruebas experimentales realizadas, en la operación de fresado en alta velocidad, se utilizaron fresas integrales, de metal duro (calidad K30), recubiertas con TiAlN, con diámetro de corte $D = 8$ mm, con 4 aristas de corte y ángulo de hélice 55° . Las condiciones de corte de la experimentación fueron las siguientes: corte en concordancia, velocidad de corte, $V_c = 175$ m/min; avance por diente, $f_z = 0,08$ mm/diente y la profundidad de corte radial, $R_d = 0,4$ mm y axial $A_d = 4$ mm. Se usaron diferentes condiciones o tipos de refrigerante: corte en seco, con microlubricación (presión 0,6 MPa, consumo de aceite 0,5 cm³/min), con aire frío (caudal 120 l/min, temperatura de suministro -20°C) y en seco. Con estas condiciones, se marcó como criterio de vida de herramienta, no superar un desgaste en la cara de incidencia de la arista de corte de 0,2 mm. Se obtuvo el mejor resultado, un mayor tiempo de corte, con aire frío (194 s), frente la microlubricación (177 s) y con diferencia respecto al corte en seco (80 s). En cambio la menor rugosidad ($R_a = 0,25$ μm) y la menor variabilidad de la misma, a lo largo de la experimentación, se obtuvo con la microlubricación, seguido de la refrigeración con aire frío ($R_a = 0,28$ μm). A destacar que el mayor valor de rugosidad se obtuvo al inicio de la experimentación, con corte en seco ($R_a = 0,36$ μm).

Rubio [et al.] realizaban una revisión de los sistemas de refrigeración basados en aire comprimido frío para aplicaciones en procesos de mecanizado (Rubio 2015). En resumen, por los estudios analizados para distintos materiales y operaciones de mecanizado, Rubio concluye que estos sistemas de refrigeración reducen la temperatura y la fricción en la zona de corte, se reducen las fuerzas de corte, mejora el acabado superficial y la productividad del proceso.

Pereira [et al.] presentaron un interesante estudio sobre el uso de la refrigeración criogénica para operaciones de mecanizado de distintos materiales (Pereira 2016). En este estudio se recogen los avances obtenidos por la Universidad Politécnica del País Vasco (UPV) y el centro tecnológico Tecnalía. Avances en cuanto a los sistemas de regulación e inyección de los fluidos criogénicos en operaciones de mecanizado comunes (fresado, torneado y taladrado). El empleo de fluidos criogénicos, como el nitrógeno líquido (LN₂) o el dióxido de carbono líquido (CO₂), reducen la temperatura en la zona de corte y aumenta el rendimiento de la operación, con un menor desgaste de la herramienta. En los estudios experimentales de aplicación de esta tecnología de lubricación, en el caso de la operación de fresado-contorneado, de un acero templado a 45 HRC, se comparó el rendimiento del proceso, del desgaste de la herramienta, con distintos sistemas de lubricación. A continuación se presentan las condiciones experimentales básicas:

- Sistemas de lubricación: mecanizado en seco; microlubricación (*MQL*) con caudal de aceite de 100 ml/h y combinación híbrida de lubricación criogénica con CO₂ – *MQL*, con presión de 10 bar y temperatura -78°C.
- Herramienta de corte: Fresa frontal de metal duro de 3 labios, diámetro 20 mm, de refrigeración interna.
- Condiciones de corte: Velocidad de corte 90 m/min; avance por diente 0,075 mm/diente; profundidad de corte axial 1 mm y profundidad de corte radial 18 mm.

En estas condiciones de trabajo, el menor desgaste de la herramienta, se produce cuando se utiliza la lubricación criogénica con CO₂ – *MQL* ($VB_{máx} = 0,17$ mm), la mitad de desgaste respecto a la aplicación sólo con *MQL* ($VB_{máx} = 0,35$ mm). Con mecanizado en seco el desgaste es casi el triple ($VB_{máx} = 0,48$ mm). Finalmente, es necesario comentar, aunque los resultados experimentales han sido satisfactorios con el uso de la refrigeración criogénica en las distintas operaciones, se debe tener en cuenta que su aplicación requiere de un gasto adicional inicial de preparación y ajuste de máquina, así como un gasto de fluido criogénico, por lo que es posible que las mejoras obtenidas no compense su aplicación.

Con altas velocidades de giro del husillo de la máquina, si la refrigeración no es interna, o si la refrigeración externa no dispone de la presión suficiente, debido a las fuerzas centrífugas, existirá una gran dispersión del lubricante y no se alcanzará plenamente la zona de corte (Sandvik 1999), lo que implicará también una dispersión en el rendimiento de la herramienta y en definitiva de la operación de mecanizado.

En este apartado es necesario comentar un estudio inicial realizado por el doctorando (Ortíz 2004), en una operación de mecanizado convencional, en relación a la evolución del desgaste de herramientas de acero rápido, con geometría de corte de punta esférica, en la operación de fresado-contorneado, del acero de moldes W. Nr. 1.2344 (con dureza máxima de 229 HB). En este estudio se realizó un diseño de experimentos básico, 2². Los factores principales fueron el avance por diente, f_z (0,04-0,08 mm/diente) y la velocidad de corte, V_c (8-31 m/min). Las profundidades de corte axial y radial se mantuvieron constantes, $ap = 2$ mm y $ae = 0,3$ mm. Se estudió la influencia del método de corte (en concordancia y en oposición) y del uso de microlubricación o mecanizado en seco. Con esta experimentación se obtuvo una expresión analítica de los metros mecanizados, para un desgaste controlado de 0,05 mm y de 0,10 mm.

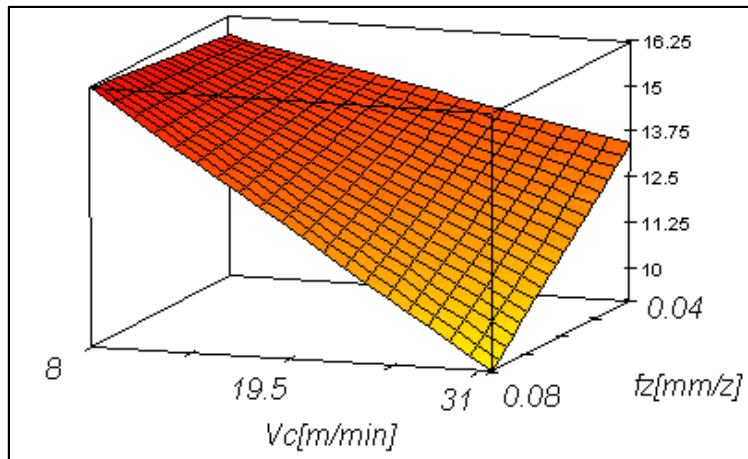


Figura 2.45. Superficie respuesta de metros mecanizados para desgaste $VB = 0,10$ mm. Fte.: (Ortiz 2004).

En la Figura 2.45 puede observarse la superficie de respuesta para la longitud de mecanizado, de la experimentación para un desgaste, $VB = 0,10$ mm, con empleo de microlubricación (caudal de aceite 0,06 ml/min) y corte en concordancia. Para el valor mayor de f_z y menor de V_c , la longitud mecanizada es la mayor posible (16,25 m), para el desgaste fijado. Existe una pequeña diferencia de rendimiento, de la longitud mecanizada entre los dos niveles de f_z , para la V_c mínima. En cambio, la diferencia de rendimiento es muy importante para V_c máxima. También se comprobó que el desgaste de la herramienta y la rugosidad, Ra obtenida fueron mayores, con el método de corte en oposición y sin lubricación. En cambio al utilizar microlubricación y el método de corte en concordancia, se redujo el valor de rugosidad y el desgaste de la herramienta.

2.11. Investigación de mercado.

Destacar en este punto, la realización de una investigación de mercado básica del sector de fabricantes de moldes y matrices para contrastar y ampliar información de tipo práctica. Se trató de complementar toda la información técnica posible y de manera actualizada de las tecnologías implicadas mediante el contacto directo con los fabricantes del sector. Esta tarea ayudó a concretar el estudio a la hora de planificar la experimentación. En especial, esta investigación básica permitió conocer con más detalle, las máquinas-herramientas presentes, las operaciones básicas de mecanizado más utilizadas, las herramientas de corte y los materiales de los componentes más empleados.

Por otra parte es importante señalar que esta información es importante, necesaria y complementaria a los conocimientos previos, ya que inicialmente, en esta tesis ya se proponían unas operaciones, estrategias, herramientas y materiales de trabajo, fruto de anteriores contactos con el sector y de la experiencia industrial del doctorando en esta temática.

A nivel práctico, se realizaron visitas y encuestas a empresas para conocer los conocimientos reales que hay en ellas sobre la tecnología de Mecanizado en Alta Velocidad y su implicación en el acabado superficial. Se elaboró una encuesta, que se presentó inicialmente a 20 empresas de Cataluña dentro del sector de moldes y matrices. Eran empresas pequeñas, medianas y grandes, representativas del sector en Cataluña. Actualmente, algunas de estas empresas han desaparecido, debido, entre otros motivos, a la competencia agresiva de los países de bajo coste.

A continuación se muestra una relación de algunas de las empresas visitadas, de las que se obtuvo información importante referente al sector: Coutal, F.G. Moldes, IMP, Irva Moldes, Matrimol, Mecánica Morell, Micran, Moldinter, Molmarsan, Molmat, Molmatri, Molpen, Molprex, Molter, Plásticos Castellà, Protecmo, Centro tecnológico ASCAMM, Royas Moldes, Solé C.M., Tauvi.

El objetivo de esta encuesta fue conocer de primera mano, los detalles básicos de las operaciones de mecanizado de los moldes y matrices que fabrican diariamente. De esta forma, se obtuvo información de los materiales habituales en la fabricación de los distintos componentes, de la maquinaria utilizada y de las operaciones de mecanizado. A continuación un resumen de los resultados obtenidos en las encuestas:

- Sector industrial: En general sector de la automoción, pero también sector médico o sector de la alimentación o el sector cosmético. Tamaños pequeños, medios de los moldes y matrices.
- Materiales de trabajo: En relación al sector y el componente a mecanizar, los materiales más usuales son los siguientes:
 - Para moldes: acero W. Nr. 1.2344 (50-52 HRC). Otros aceros utilizados son: W. Nr. 1.2311, W. Nr. 1.2083 o el acero W. Nr. 1.2738.
 - Para matrices: acero W. Nr. 1.2379 (60-62 HRC). Otros materiales presentes para componentes de gran tamaño, son las fundiciones GG30, o GGG70.
- Centros de mecanizado de alta velocidad: La marca con mayor presencia, es el fabricante alemán Deckel, con las series DMC 100V ó 70V. Otros fabricantes presentes, son marcas

japonesas (Makino, Mori Seiki, Kitamura) y marcas españolas (Kondia, N. Correa). La velocidad de giro más usual se encuentra entre las 8.000-20.000 min^{-1} .

- Programas *CAD/CAM*: Los programas de simulación y preparación del proceso de mecanizado más utilizados son: MasterCAM, Power-mill, Unigraphics, Cimatron, Hypermill.
- Herramientas de corte, para fases de acabado:
 - Herramientas integrales de metal duro recubiertas con diámetros inferiores a 10-12 mm. En general herramientas de gama alta de los principales fabricantes japoneses de las marcas MMC Kobelco e Hitachi. También de la marca OSG.
 - Herramientas con geometría de punta esférica, de 2 labios, para operaciones de copiado. Para operaciones de contorneado, herramientas de punta plana de 6 labios y herramientas tóricas (de punta plana con radios en las esquinas).
- Sistema de sujeción de las herramientas: En general sistemas mecánicos de gran precisión y preequilibrados para las revoluciones máximas de las máquinas. Poco a poco se van incorporando los sistemas de fijación térmica, para mayor precisión, como los portapinzas de la serie Slimline del fabricante MST.
- Control de la calidad superficial. El parámetro de rugosidad más utilizado para evaluar la calidad superficial, es la rugosidad Ra , además cuando se trabaja para el sector de automoción, se utiliza también el parámetro Rz . Para la medición de cotas y verificación de tolerancias dimensionales y geométricas se utilizan las máquinas de medición por coordenadas (MMC).
- Formación del personal. Los operarios que se encargan de fabricación, no han recibido una formación específica sobre temas o tecnologías MAV. O se forman de manera autodidacta a través de las distintas publicaciones existentes, a través de la asistencia a seminarios realizados por los diferentes centros tecnológicos, o por la asistencia técnica de los suministros industriales proveedores de las herramientas de corte.

También se contactó con los técnicos de los fabricantes o distribuidores directos de los elementos que intervienen en la tecnología MAV, mediante visitas personales o en la feria industrial del sector, MAQUITEC. En los catálogos de estos fabricantes también se dispone de información muy interesante, para observar la tendencia en la evolución de estos productos:

- Sistemas de sujeción pieza-máquina (Gerardi, Arnold).
- Sistemas de sujeción herramienta-máquina (MST, Schunk, Big).
- Recubrimientos superficiales (T.T. Carreras, Oerlikon Balzers).

- Control Numérico, CNC (Heidenhain, Fagor, Siemens, Fanuc).
- Máquinas-Herramienta (Deckel, Hermle, Kitamura, Matsuura, Makino).
- Herramientas de corte (MMC Kobelco, Hitachi, OSG).

La tecnología del Mecanizado en Alta Velocidad se encuentra en constante evolución. Por este motivo, respecto al estudio del estado del arte, es necesario realizar un seguimiento continuo, ya sea a través de nuevos estudios de investigación, visitas a empresas fabricantes del sector de moldes o matrices, visitas a proveedores de los distintos elementos que intervienen (máquinas, programas de control numérico, herramientas de corte, etc.) o prestar atención a las novedades presentadas en ferias industriales del sector.

Por ejemplo, Güell en un artículo reciente en la revista *Industria Metalmeccánica* nos detalla los medios productivos y características principales e información interesante de la empresa Nicomold para el diseño, fabricación y reparación de moldes de inyección (Güell 2016b).

En la revista digital *MoldMaking Technology*, Kustush presentó un resumen del seminario anual sobre tendencias en el sector de molde y matriz, organizado por el fabricante de herramientas de corte *Ingersoll Cutting Tools* (Kustush 2017). Seminario donde se mostraron nuevas herramientas de corte, estrategias de mecanizado y nuevos aceros de herramientas adaptados a las exigencias del sector. Nuevas herramientas de corte modulares, de cambio rápido, para una mayor flexibilidad y adaptación a cada una de las fases de mecanizado. El fabricante de aceros Bohler-Uddeholm presentó un nuevo acero de moldes (Uddeholm Formvar) más tenaz y con mayor resistencia al desgaste que el clásico H13 (W. Nr. 1.2344). Los sistemas CAM, de simulación del proceso de mecanizado presentaron mejora de la eficiencia de los algoritmos para un mayor control de la profundidad de corte radial y del volumen de arranque de viruta. Todo ello, como exigencia del mercado de compra de máquinas-herramienta. Máquinas cada vez más pequeñas, más rápidas, más precisas, pero menos rígidas.

2.12. Estudios de investigación sobre moldes y piezas reales.

Algunas de las imperfecciones en el acabado superficial que se comentaban en el apartado 1.4, para distintos procesos de fabricación, pueden aparecer también en las operaciones de fresado en alta velocidad.

Loftus mostraba un interesante artículo en relación a este tema (Loftus 2002), donde se presentaba una investigación sobre el estudio de las irregularidades presentes en el fresado en alta velocidad de un molde, con el uso de distintos centros de mecanizado, controles numéricos, sistemas de sujeción y distintas estrategias de corte con la programación CAM.

El objetivo de esta investigación fue mecanizar una pieza tipo, un molde real, en acero de herramienta AISI P20, tal que no se necesitará operaciones de acabado posterior. En la Figura 2.46 se muestra una de las placas postizo que componen el molde de inyección para la obtención de las carcasas de plástico de teléfonos móviles.

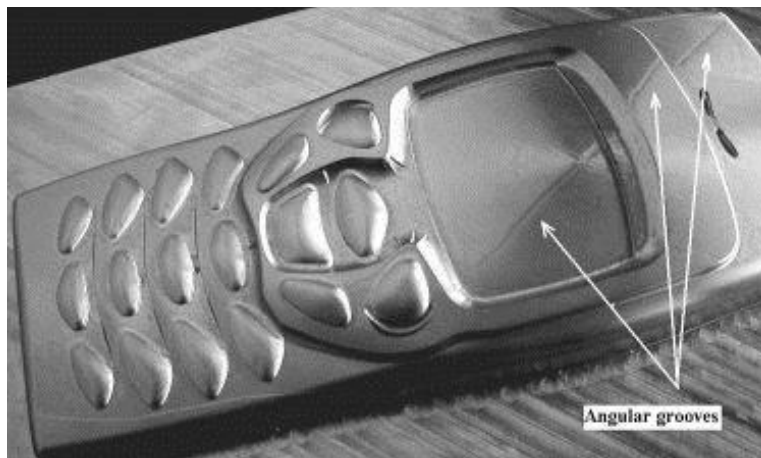


Figura 2.46. Molde de teléfono. Fte.: (Loftus 2002).

Para todas las piezas mecanizadas, se utilizó el mismo programa de mecanizado CAM (Powermill) y las mismas herramientas de corte (herramientas de metal duro del fabricante Mitsubishi, de la serie KOBELCO MIRACLE, con recubrimiento (Al, Ti)N).

Se compararon los resultados obtenidos al mecanizar 5 moldes, con 3 centros de mecanizados diferentes (y con 3 controles numéricos diferentes). Se observaron múltiples irregularidades en las piezas, según el centro de mecanizado usado: marcas periódicas, ranuras (Figura 2.47), facetado.

Las diferentes prestaciones de los centros de mecanizado, en concordancia con su control numérico y el ajuste estándar de sus parámetros de control internos da lugar a la aparición de algunas de estas irregularidades.

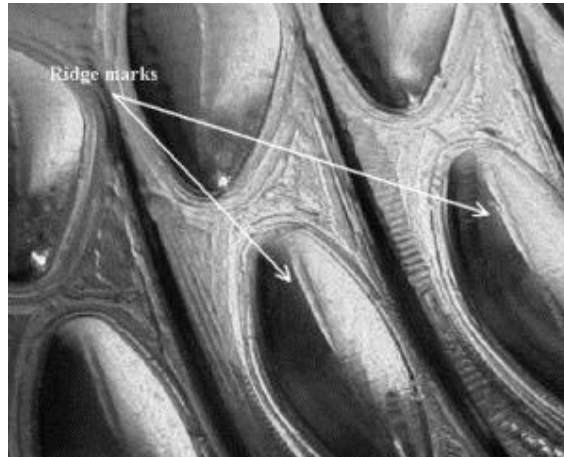


Figura 2.47. Ranuras en la superficie superior de los botones del molde. Fte.: (Loftus 2002).

Otro proyecto de investigación de interés, es el proyecto CIMEC (Eurecat 2018): “Nueva generación de sistemas ciber-físicos para el aumento de productividad en sectores del alto valor añadido”. Según el jefe del proyecto por parte del centro tecnológico Eurecat, el investigador Castanyer, “las innovaciones del proyecto CIMEC permitirán a las empresas eliminar rechazos por falta de calidad superficial y reducir sobrecostes por reprocesados, de esta manera, se optimizarán los parámetros de proceso para aumentar las ratios de arranque de material y se evitarán inestabilidades de proceso, como el chatter o la aparición de vibraciones auto-excitadas, que conllevan faltas de calidad en piezas en proceso de mecanización y aceleran el deterioro de elementos mecánicos”. En definitiva, con el proyecto CIMEC se pretende incorporar sistemas a los centros de mecanizado que ayuden a obtener las prestaciones dinámicas, monitorización y de garantía de calidad necesarias en piezas mecanizadas en las operaciones de fresado, por ejemplo, carcasas de compresor de turbinas de gas, del sector energético.

3. CONCEPTOS DE ESTADISTICA.

Los métodos de modelización empleados y presentados en los distintos artículos de investigación del apartado 2.2 han sido los siguientes:

- Algoritmos Genéticos
- Análisis Fractal
- Análisis Geométrico de la zona de corte
- Método de Taguchi
- Diseño de Experimentos
- Análisis por Redes Neuronales Artificiales (RNA)
- Regresión lineal y análisis de coeficientes de correlación

La mayoría de los métodos de modelización anteriores se emplean básicamente en estudios de investigación en condiciones de trabajo muy controladas para la reducción de la dispersión excesiva de los resultados (Berlinches 1999).

En este capítulo se explicarán las herramientas estadísticas básicas utilizadas en la presente tesis. Por una parte se muestran las expresiones clásicas para el control y conocimiento de la variabilidad de las medidas obtenidas en los distintos ensayos experimentales. Por otra parte se explica brevemente el método estadístico del diseño de experimentos, para el desarrollo de la experimentación necesaria para obtener modelos predictivos del proceso de fabricación en estudio.

3.1. Variabilidad de la medida.

En cualquier experimentación que se realice es necesario evaluar la variabilidad de la medida de una muestra, representada bajo diferentes conceptos. En todos los experimentos realizados en los diferentes estudios se calculó la media de la muestra analizada \bar{x}_m (Ec. 3.1), y la desviación estándar muestral corregida s_m (Ec. 3.2), o desviación típica. En general, como se estudia la rugosidad superficial, las unidades de estas variables en la mayoría de los estudios serán en μm . El número de mediciones tomadas variará en función del estudio realizado y de las muestras analizadas.

$$\bar{x}_m = \frac{\sum_{i=1}^n x_{mi}}{n} \quad \text{Ec. 3.1}$$

Donde x_{mi} es el valor de la medida tomada para una muestra y n es el número de mediciones de la muestra.

$$s_m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{mi} - \bar{x}_m)^2}{n-1}} \quad \text{Ec. 3.2}$$

Las variables estadísticas o estadísticos de una muestra \bar{x}_m y s_m^2 (media y varianza de la muestra) son variables aleatorias, que varían de muestra a muestra, según sea su distribución muestral y representan a los mejores estimadores posibles de la media poblacional μ y de la varianza poblacional σ^2 . En metrología se considera que los valores de medición siguen una distribución normal, cuando el tamaño de la muestra es suficiente, $n > 30$ (TCM 2008). Debido a la fluctuación de estos estadísticos es necesario plantear un intervalo de confianza, un intervalo de estimación con respecto a la media \bar{x}_m , para una probabilidad determinada, que contenga al valor verdadero, de la media poblacional μ .

También se considera el concepto de error de repetibilidad, R (Ec. 3.3) y cuando es posible, el error de reproducibilidad de la medida, r (Ec. 3.4), para un cierto parámetro variable. Se entiende el error de repetibilidad de una medida (también definido como rango o recorrido de la muestra), como la diferencia entre los valores máximos y mínimos ($x_{m\acute{a}x}$, $x_{m\acute{i}n}$) obtenidos en una muestra. El error de reproducibilidad queda definido como la diferencia de los valores medios obtenidos de dos muestras (\bar{x}_{m1} , \bar{x}_{m2}), donde sólo se ha cambiado una variable entre ellas, (por ejemplo: la herramienta, el aparato de medición, o el operario).

$$R = x_{m\acute{a}x} - x_{m\acute{i}n} \quad \text{Ec. 3.3}$$

$$r = \left| \bar{x}_{m1} - \bar{x}_{m2} \right| \quad \text{Ec. 3.4}$$

Otras variables a controlar para tener en cuenta los errores de medición son los valores del error cuadrático medio, ε (Ec. 3.5), o incertidumbre típica del proceso de medición (u_m). El error absoluto total, ε_T [μm] será el mayor entre el error ε y el error absoluto, debido a la resolución del aparato de

medición empleado (UCLM 2016). Por ejemplo, la resolución del rugosímetro utilizado en la medición de la rugosidad en los estudios experimentales es de $0,0001 \mu\text{m}$, y el valor del error ε siempre será mayor a esta resolución, por lo que $\varepsilon = \varepsilon_T$. Al considerar estos errores, se establece la medida total resultante, x , según la Ec. 3.6.

$$\varepsilon = \frac{S_m}{\sqrt{n}} \quad \text{Ec. 3.5}$$

$$x = \bar{x}_m \pm \varepsilon_T \quad \text{Ec. 3.6}$$

El valor estimado de x permite obtener una idea aproximada de la incertidumbre del proceso de medición, dentro del campo de aplicación. Cuando el tamaño de la muestra es pequeño, para garantizar un intervalo de confianza determinado (un valor del 95% es el habitual), es necesario ampliar el tamaño del intervalo establecido en la Ec. 3.6 (TCM 2008) al considerar ahora una distribución t de Student (en lugar de una distribución Normal) como se muestra en la Ec. 3.7. En este caso, el intervalo de confianza es una medida del error practicado al estar limitada la muestra en n mediciones.

$$x = \bar{x}_m \pm t \cdot \frac{S_m}{\sqrt{n}} \quad \text{Ec. 3.7}$$

A partir de la Ec. 3.7 se obtiene un intervalo ampliado de la medida total resultante ($x_{\text{mín}} - x_{\text{máx}}$), de esta forma se cumplirá que la probabilidad que la media poblacional μ de la experimentación realizada se encuentre dentro del intervalo ampliado, será del 95%. En las tablas correspondientes, se halla el estadístico t , o factor de seguridad calculado según la distribución t de Student, para un valor muestral $n-1$ (número de grados de libertad) y un intervalo de confianza (IC) determinado. Por ejemplo, para una muestra, $n = 5$ mediciones y un IC del 95%, le corresponde el estadístico $t = 2,78$.

Un estudio avanzado de la incertidumbre, debería analizar todas las fuentes de error presentes en el proceso de fabricación y en el proceso de medición. En la Figura 3.1 se muestra un ejemplo de las 10 principales causas o componentes de la incertidumbre en la medición (ISO 14253-2:2011).

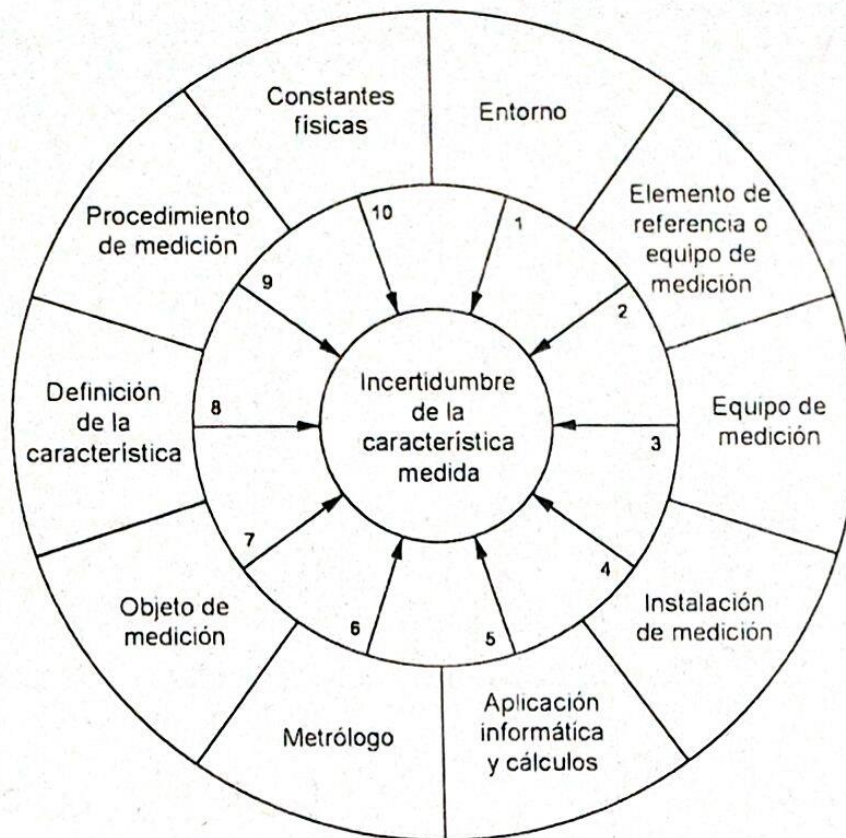


Figura 3.1. Componentes de la incertidumbre en la medición. Fte.: (ISO 14253-2:2011).

3.2. Diseño de experimentos estadístico.

Para la modelización de los resultados esperados de los procesos industriales, en función de los diferentes parámetros implicados, existen diferentes métodos tal como se ha mostrado en el apartado sobre la modelización del acabado superficial.

Para el estudio estadístico de los parámetros de rugosidad superficial, se consideran éstos como variables aleatorias cuantitativas y continuas, que pueden tomar un conjunto infinito de valores dentro de un intervalo, por lo que se establece el control estadístico por variables. Por otra parte, en la mayoría de los procesos industriales las características de calidad se distribuyen según una función cuyas propiedades son conocidas. Es la distribución Normal o de Gauss (TCM 2008).

Para optimizar un proceso industrial se deben realizar una batería de experiencias, con la modificación adecuada de los factores implicados, en función del conocimiento disponible del proceso. Optimizar

un proceso repercute en la disminución de costes y la mejora de la calidad. Para obtener la mejor información del proceso, con el mínimo esfuerzo experimental, se utiliza la metodología estadística del Diseño de Experimentos, que permite analizar los resultados y obtener un modelo predictivo del proceso (Pepió 2011). La planificación del diseño de experimentos requiere distintas fases:

- Especificar el problema a solucionar u optimizar
- Elegir las respuestas esenciales
- Concretar los factores implicados
- Fijar la región experimental de cada factor
- Elegir el diseño de experimentos en relación a los niveles-factores necesarios
- Obtener los datos experimentales (respuestas)
- Analizar los resultados
- Crear el modelo lineal o predictivo

En general se establece el diseño de experimentos a través de diseños factoriales completos a 2 niveles, con el número mínimo de factores (k). El número de experimentos a realizar, vendrá dado por el valor 2^k . Una vez definido el diseño factorial concreto, a partir de una matriz de diseño estandarizada, se establecen las experiencias a realizar y el modelo lineal correspondiente. En la Ec. 3.8 se muestra el modelo lineal saturado para un diseño factorial 2^2 , con 2 niveles y 2 factores (A , B). Ello conlleva 4 experimentos a realizar, tal como se muestra en la Figura 3.2.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot X_1 + \beta_2 \cdot X_2 + \beta_{12} \cdot X_1 \cdot X_2 + \varepsilon \quad \text{Ec. 3.8}$$

Donde Y es la variable de respuesta, las variables β_i , factores del modelo lineal, ε el residuo y las variables codificadas X_i de los factores del diseño de experimentos.

En la Figura 3.2 se muestra la tabla de la matriz de diseño factorial 2^2 , con distintas columnas agrupadas por colores, según sea la matriz de diseño de las variables directas o factores (A , B), la matriz de diseño de las variables codificadas (X_1 , X_2), la matriz del modelo saturado y la columna de respuestas (Y). Cada tanda de experimentación se formará con todas las combinaciones de valores de los factores.

n°	A	B	X ₁	X ₂	I	X ₁	X ₂	X ₁ X ₂	Y
1	a _{min}	b _{min}	-1	-1	1	-1	-1	+1	y ₁
2	a _{max}	b _{min}	+1	-1	1	+1	-1	-1	y ₂
3	a _{min}	b _{max}	-1	+1	1	-1	+1	-1	y ₃
4	a _{max}	b _{max}	+1	+1	1	+1	+1	+1	y ₄

Diagram illustrating the relationship between the design matrix and the model matrix. The design matrix (left) is derived from the direct variables (A, B) and their levels (a_{min}, a_{max}, b_{min}, b_{max}). The model matrix (middle) is derived from the coded variables (X₁, X₂) and their interactions (I, X₁X₂). The responses (Y) are shown on the right.

Figura 3.2. Tabla de la matriz de diseño factorial 2². Fte.: (Pepió 2011).

Una vez codificados los niveles de los factores entre un valor mínimo y máximo (-1, +1), puede establecerse la gráfica de los efectos (cambio de la respuesta media al pasar un factor, del nivel mínimo al máximo) y la gráfica de las interacciones (cambio del efecto de un factor al cambiar de nivel el otro factor). Por ejemplo a partir de la gráfica de los efectos para el factor X₁ se obtiene la Ec. 3.9, y a partir de la gráfica de interacciones X₁X₂ se obtiene la Ec. 3.10.

$$Ef(X_1) = \frac{-y_1 + y_2 - y_3 + y_4}{2} \quad \text{Ec. 3.9}$$

$$Int(X_1X_2) = \frac{y_1 - y_2 - y_3 + y_4}{2} \quad \text{Ec. 3.10}$$

Donde las variables y_i, son los valores de las respuestas de la experimentación correspondiente.

Respecto los factores y sus interacciones es necesario separar el grupo de términos significativos del grupo de no significativos, a partir de una gráfica de semizetas, siempre que el modelo esté saturado (implica residuos nulos), y se cumpla la normalidad de la distribución. En la gráfica, todos los puntos que se alejan de la recta que pasa por el origen, se considerarán significativos (Figura 3.3).

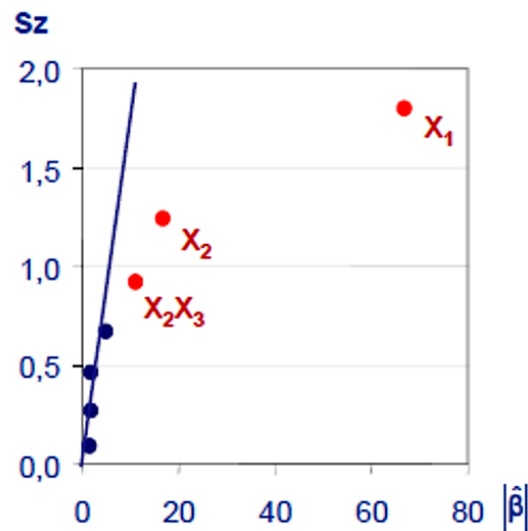


Figura 3.3. Gráfica de semizetas, con indicación de términos significativos. Fte.: (Pepió 2011).

Un gráfico interesante a tener en cuenta, es la superficie de respuesta, que nos dará una visión de la variabilidad de la respuesta en función de los niveles máximos y mínimos de los factores (Figura 3.4).

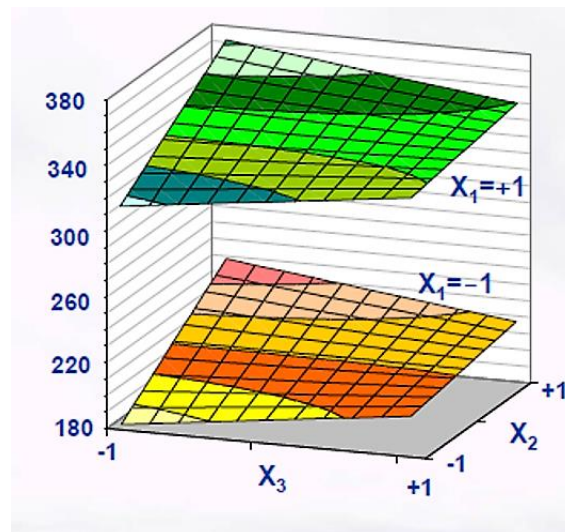


Figura 3.4. Superficie respuesta del modelo obtenido. Fte.: (Pepió 2011).

Todos los cálculos analíticos y gráficos detallados anteriormente pueden resolverse y obtenerse, con el módulo estadístico del programa Excel, o con programas específicos como Minitab, o Statgraphics.

Para la comprobación y validación de los modelos predictivos desarrollados y de la experimentación realizada se utilizaron las herramientas disponibles en los programas específicos indicados. También se calcularon los residuos estandarizados e_r [%], mediante las herramientas del programa Excel, al

aplicar la Ec. 3.11. Esta ecuación refleja la diferencia entre el valor de rugosidad calculado para el modelo predictivo Ra_M (obtenido mediante el diseño de experimentos correspondiente) y la rugosidad media Ra_{exp} del experimento en cuestión, a realizar en función del factor de influencia a examinar, dividido por esta rugosidad media Ra_{exp} . Esta es una forma de medir el error relativo de la experimentación.

$$e_r = \frac{Ra_M - Ra_{exp}}{Ra_{exp}} \cdot 100 \quad \text{Ec. 3.11}$$

El valor del residuo será positivo o negativo en función de los valores de las variables Ra_M y Ra_{exp} . En términos de usar el modelo en aplicaciones reales, interesa que los residuos tiendan a cero y/o sean positivos. De esta forma la mayoría de rugosidades que se midan en pieza serán menores al valor exigido en plano. Tal como se explicaba en el apartado 1.4, por defecto se aplica la regla del 16%, como control de la rugosidad medida, para que se admita un máximo de un 16% de las mediciones tomadas que superen el valor de rugosidad establecido.

4. ESTUDIOS EXPERIMENTALES SOBRE ACEROS DE MOLDES.

En este capítulo se presentan diferentes estudios experimentales realizados para estudiar la influencia de los parámetros de mecanizado sobre la rugosidad superficial obtenida con el proceso de fresado en alta velocidad, en la fase de acabado, sobre aceros de moldes, en piezas tipo con distintas geometrías.

En el apartado 4.1 se ha desarrollado la experimentación con la pieza tipo 1 (pieza semicilíndrica) para realizar la operación de copiado sobre el acero de moldes W Nr. 1.2344 templado y revenido a 52 HRC, con herramienta de punta esférica. En el apartado 4.1.1 se explican los materiales y métodos empleados en los ensayos realizados. En el apartado 4.1.2 se presentan los resultados del diseño de experimentos elaborado, con distintas condiciones de corte, sobre la pieza tipo 1. Se han obtenido 2 modelos predictivos del parámetro de rugosidad Ra , en función del método de corte (en concordancia y en oposición). En el apartado 4.1.3 se analiza el acabado superficial obtenido. En el apartado 4.1.4 se muestran las gráficas de residuos para la validación de los modelos obtenidos y en el apartado 4.1.5 se destacan unas conclusiones de la experimentación.

En el apartado 4.2 se presenta el estudio de la influencia del desgaste de la herramienta, con el método de corte en concordancia, en la pieza tipo 1. En el apartado 4.2.1 se resume los materiales y métodos empleados diferenciados respecto a la anterior experimentación. En el apartado 4.2.2 se analizan los resultados y en el apartado 4.2.3 se plantean unas conclusiones al respecto.

En el apartado 4.3 se ha desarrollado la experimentación con la pieza tipo 2 (pieza prismática) para realizar la operación de contorneado con distintos parámetros de mecanizado para la herramienta de punta plana de 6 aristas de corte. En el apartado 4.3.1 se resume los materiales y métodos empleados en general para toda la experimentación. En el apartado 4.3.2 se presenta la influencia sobre la rugosidad superficial, de distintos sistemas de lubricación y distintos aceros de moldes, con un análisis de los resultados y conclusiones finales. En el apartado 4.3.3 se estudia la influencia del desgaste de la herramienta, para los dos métodos de corte (en concordancia y en oposición). En el apartado 4.3.4 se estudia la influencia del voladizo de la herramienta y el tipo de portapinzas (mecánico y térmico). En el apartado 4.3.5 se estudia la influencia de dos condiciones distintas de equilibrado del sistema de sujeción de la herramienta. En el apartado 4.3.6 se presentan los resultados del diseño de experimentos elaborado, con distintas condiciones de corte, sobre la pieza tipo 2. Se obtiene un modelo predictivo para el parámetro de rugosidad Ra , con el acero de moldes W Nr. 12344 (Böhler W302) templado y revenido a 52 HRC. Finalmente en el apartado 4.3.7 se presentan unas conclusiones generales de los estudios realizados en el apartado 4.3.

4.1. Estudio de la operación de copiado.

En el mecanizado de moldes se requieren en muchas ocasiones geometrías complejas con distintas curvaturas, por lo que para este primer estudio experimental y tras evaluar diferentes geometrías tipo de moldes, tal como se mostraba en el apartado 2.3 (superficies curvas convexas/cóncavas con distinto radio de curvatura, superficies inclinadas con distinto ángulo de inclinación), finalmente se diseñaron y fabricaron unas piezas tipo con una geometría básica semicilíndrica (Figura 4.1), donde se realizó la operación de copiado, con distintos métodos de corte, con un acero de moldes y un tipo de herramienta de corte en concreto.

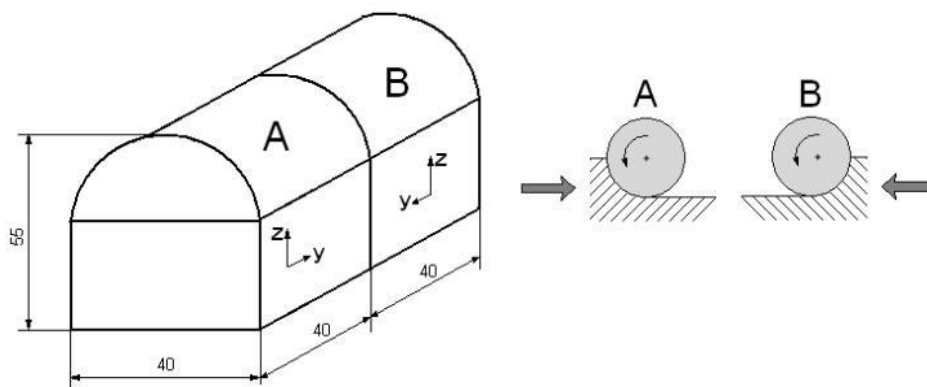


Figura 4.1. Pieza tipo 1 y métodos de corte: A en concordancia, B en oposición.

4.1.1. Materiales y métodos.

Tal como se muestra en la Figura 4.1, la pieza tipo 1 tiene una superficie curva convexa de radio de curvatura 19,9 mm. Esta pieza se ha mecanizado con la operación de copiado. La experimentación se ha realizado en la fase de acabado con distintos métodos de corte, separados por dos zonas (A y B):

- Zona A: fresado en concordancia, corte descendente, a la contra (*down milling or climb machining*);
- Zona B: fresado en oposición o corte ascendente, a favor (*up milling or conventional machining*).

En la Figura 4.1 se muestran los planos de trabajo de la herramienta de corte. En el plano ZY, se establece la dirección y sentido del paso o profundidad de corte lateral. En el plano ZX, se establece

la dirección y sentido unidireccional, del avance programado de la herramienta de corte y su profundidad de corte axial. En la Figura 4.2 se muestra la imagen donde se inicia la operación de mecanizado, con el corte en concordancia. Las piezas siempre se colocaron en la misma posición respecto a los planos de trabajo comentados.

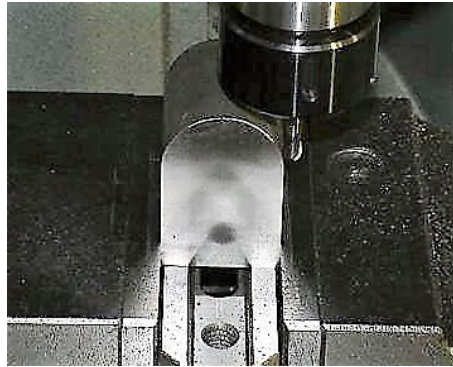


Figura 4.2. Posicionamiento de la pieza respecto a herramienta en máquina.

Las piezas tipo fueron fresadas en un centro de mecanizado con husillo vertical, de 5 ejes, del fabricante *Deckel Maho*, modelo *DMU 50 eVolution*, con control numérico *Heidenhain iTNC 430*, cono del husillo DIN 69871(CAT 40), número máximo de revoluciones de 18.000 min^{-1} y potencia máxima de 10 kW.

Para igualar el acabado superficial en todas las piezas semicilíndricas que se utilizan en la experimentación se realiza una operación previa de semiacabado mediante el método de corte en concordancia, con las siguientes condiciones de corte:

- Velocidad de corte, $V_c = 250 \text{ m/min}$ (Velocidad de giro, $S = 13.270 \text{ min}^{-1}$);
- avance por diente, $f_z = 0,04 \text{ mm/diente}$ (avance lineal $F = 1.060 \text{ m/min}$);
- profundidad de corte radial, $Rd = 0,05 \text{ mm}$ y profundidad de corte axial, $Ad = 0,1 \text{ mm}$.

Con la simulación de la operación de mecanizado mediante el programa *Powermill* puede apreciarse las trayectorias de mecanizado que realiza la herramienta de corte sobre la superficie semicilíndrica (Figura 4.3).

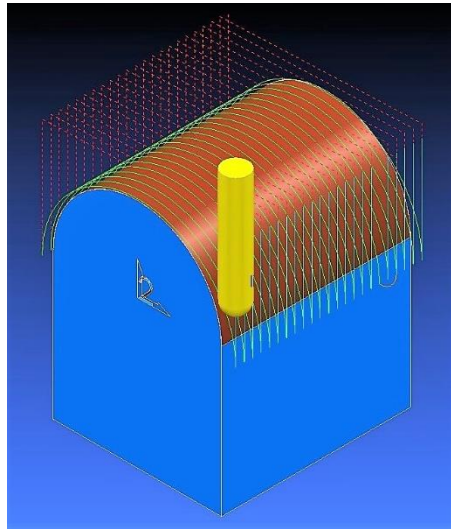


Figura 4.3. Simulación de la operación de mecanizado.

El sistema de fijación de la pieza a la mesa de la máquina utilizado en este primer estudio fue una mordaza hidráulica con cuerpo de fundición, del fabricante Crucelegui, referencia CH-1. El sistema de fijación de la herramienta estándar fue un portapinzas mecánico, preequilibrado para unas revoluciones máximas de 20.000 min^{-1} , con un desequilibrio residual de $16 \text{ g} \cdot \text{mm}$, del fabricante MST (MST 2004a), referencia DN40AD-CTH20-75 (Figura 4.4). Se emplearon pinzas de precisión (C20P), que garantizan una excentricidad máxima de $0,005 \text{ mm}$, para un voladizo inferior a 4 veces el diámetro de la herramienta.

En esta experimentación la lubricación fue externa y consistió en la inyección de aire a presión de 6 bar a temperatura ambiente. En toda la experimentación a realizar se tuvo en cuenta la vigilancia de la limpieza de los sistemas de fijación de pieza o herramienta.

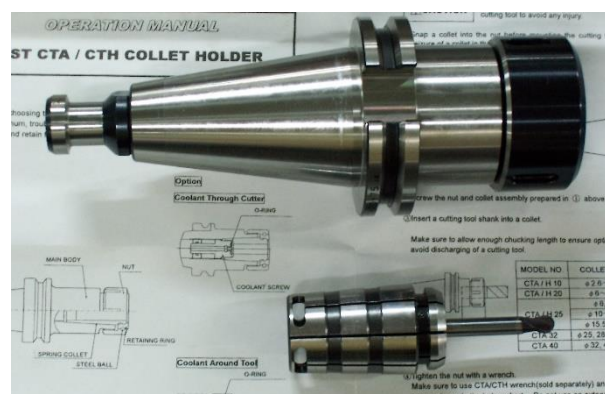


Figura 4.4. Portapinzas mecánico MST, ref. CTH.

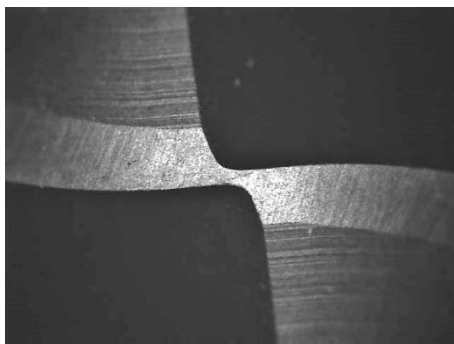
Para realizar esta operación de copiado, las herramientas de corte utilizadas fueron fresas integrales de metal duro, micrograno y recubrimiento (Al,Ti)N, de la serie MIRACLE, del fabricante *MMC Kobelco*, referencia VC2SBR0300 (Figura 4.5), con las siguientes características principales (Kobelco 2003):

- Geometría de punta esférica de radio, $R = 3$ mm, con 2 aristas de corte,
- ángulo de desprendimiento positivo y ángulo de hélice 30° ,
- tolerancia de radio de corte: $\pm 0,01$ mm,
- voladizo de herramienta de 30 mm y excentricidad inferior a 0,002 mm.

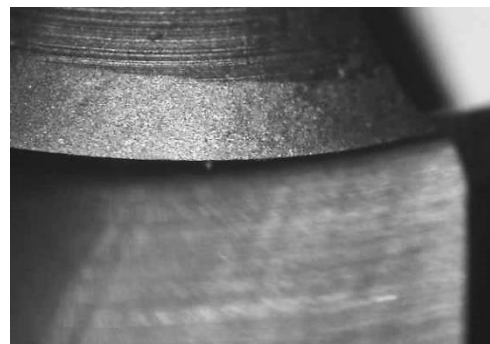


Figura 4.5. Fresa ref. VC-2SB R3 mm. Fte.: (Kobelco 2003).

En la Figura 4.6 (ampliación 72X) se muestra una vista frontal en la Figura 4.6(a) y una vista con la herramienta inclinada a 45° en la Figura 4.6(b), donde se muestra la superficie de incidencia de una de las aristas de corte de la herramienta.



(a) Vista frontal de la herramienta.



(b) Vista a 45° de una arista de corte.

Figura 4.6. Vistas herramienta nueva MMC Kobelco VC-2SB R3.

El suministro de todos los materiales de las piezas a mecanizar fue encargado a aceros Böhler y el tratamiento térmico de templado y revenido a la empresa Tratamientos Térmicos Carreras. El acero de moldes empleado en la pieza tipo fue el acero W. Nr. 1.2344, bajo la denominación comercial de Böhler W302 ISODISC, con el tratamiento térmico especial para este tipo de aceros, para trabajos en

caliente. En general, el tratamiento térmico de templado y revenido para este material permite alcanzar una dureza entre 50-54 HRC, dureza variable en función de la temperatura de revenido empleada.

En la Tabla 4.1, se muestra la composición química aproximada en porcentaje, de este material y las principales propiedades físicas, a temperatura ambiente, 20°C (Böhler 2000).

Tabla 4.1. Composición química del material W. Nr. 12344. Fte: (Böhler 2000).

C[%]	Si[%]	Mn[%]	Cr[%]	Mo[%]	V[%]	Densidad	Cond. térmica
						[kg/dm ³]	[W/(m·K)]
0,39	1,10	0,40	5,20	1,40	0,95	7,80	25

Tras la experimentación se realizó la medición de los principales parámetros de rugosidad establecidos según la norma UNE-EN-ISO 4287:1998 (ISO4287:1999) y la norma UNE-EN ISO 4288:1998 (ISO4288:1996). Se midió la rugosidad en la generatriz de la superficie semicilíndrica, en la dirección perpendicular a la dirección de las trayectorias principales de la herramienta (en la dirección del eje Y), en distintos ángulos de medición, tal como se muestra en la Figura 4.7.

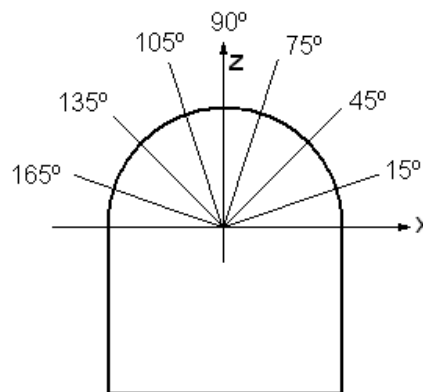


Figura 4.7. Ángulos de medición de la experimentación. Pieza tipo 1.

Al realizar la medición de la rugosidad en diferentes ángulos, es posible comprobar cómo afecta la velocidad de corte efectiva al acabado superficial. La velocidad de corte varía en función del ángulo de mecanizado sobre la pieza y de la profundidad de corte, ya que cambia la sección de contacto entre la herramienta esférica y la pieza, en función de dicho ángulo de medición.

4.1.2. Diseño de experimentos en la operación de copiado de acero de moldes.

En este estudio inicial, se desarrolló un diseño de experimentos factorial completo, 2^4 , a dos niveles y con 4 factores: velocidad de corte, V_c [m/min]; avance por diente, f_z [mm/diente]; profundidad de corte axial, Ad [mm] y profundidad de corte radial, Rd [mm]. En la Tabla 4.2 se muestran los niveles y factores utilizados en la pieza tipo 1. Inicialmente, la respuesta a valorar fue la rugosidad media aritmética, Ra , como valor medio obtenido en la medición de la rugosidad de todos los ángulos mostrados en la Figura 4.7.

Tabla 4.2. Factores y niveles del diseño de experimentos. Pieza tipo 1.

Factor/ Nivel	Ad [mm]	Rd [mm]	f_z [mm/diente]	V_c [m/min]
Mín.	0,1	0,1	0,02	150
Máx.	0,3	0,3	0,06	250

Estas condiciones de corte se escogieron tras la revisión de los catálogos de los fabricantes de herramientas, de las referencias bibliográficas consultadas y de la experiencia acumulada.

En la Tabla 4.3 se muestran los experimentos realizados con los resultados de rugosidad Ra , valor promedio a todos los ángulos de medición, para los 2 métodos de corte (fresado en concordancia $Ra(A)$ y fresado en oposición $Ra(B)$), con los correspondientes niveles y factores.

Tabla 4.3. Matriz del Diseño de Experimentos. Pieza tipo 1.

N	<i>Ad</i> [mm]	<i>Rd</i> [mm]	<i>fz</i> [mm/diente]	<i>Vc</i> [m/min]	<i>Ra (A)</i> [μm]	<i>Ra (B)</i> [μm]
1	0,1	0,1	0,02	150	0,22	0,22
2	0,3	0,1	0,02	150	0,25	0,32
3	0,1	0,3	0,02	150	1,11	0,90
4	0,3	0,3	0,02	150	0,94	1,03
5	0,1	0,1	0,06	150	0,35	0,34
6	0,3	0,1	0,06	150	0,34	0,38
7	0,1	0,3	0,06	150	0,99	0,77
8	0,3	0,3	0,06	150	0,89	0,88
9	0,1	0,1	0,02	250	0,20	0,23
10	0,3	0,1	0,02	250	0,21	0,32
11	0,1	0,3	0,02	250	0,98	0,97
12	0,3	0,3	0,02	250	1,12	1,01
13	0,1	0,1	0,06	250	0,24	0,30
14	0,3	0,1	0,06	250	0,38	0,63
15	0,1	0,3	0,06	250	1,08	1,12
16	0,3	0,3	0,06	250	1,09	0,98

En la Tabla 4.4 se muestran también 4 experimentos más, con las idénticas condiciones de corte en los puntos centrales y en la Tabla 4.5, los 8 experimentos empleados para la validación de los modelos obtenidos.

Tabla 4.4. Matriz del Diseño de Experimentos. Pieza tipo 1. Puntos centrales.

N	<i>Ad</i> [mm]	<i>Rd</i> [mm]	<i>fz</i> [mm/diente]	<i>Vc</i> [m/min]	<i>Ra (A)</i> [μm]	<i>Ra (B)</i> [μm]
17	0,2	0,2	0,04	200	0,49	0,56
18	0,2	0,2	0,04	200	0,49	0,51
19	0,2	0,2	0,04	200	0,47	0,51
20	0,2	0,2	0,04	200	0,48	0,54

En los resultados presentados en las tablas del diseño de experimentos (Tabla 4.3, Tabla 4.4 y Tabla 4.5), se marca en rojo los valores máximos para cada uno de los métodos y en verde los valores mínimos.

Tabla 4.5. Matriz del Diseño de Experimentos. Pieza tipo 1. Puntos de validación.

N	A_d [mm]	R_d [mm]	f_z [mm/diente]	V_c [m/min]	$R_a (A)$ [μm]	$R_a (B)$ [μm]
21	0,04	0,2	0,04	200	0,48	0,58
22	0,36	0,2	0,04	200	0,48	0,51
23	0,2	0,04	0,04	200	0,21	0,21
24	0,2	0,36	0,04	200	1,52	1,31
25	0,2	0,2	0,01	200	0,57	0,69
26	0,2	0,2	0,07	200	0,51	0,50
27	0,2	0,2	0,04	120	0,48	0,45
28	0,2	0,2	0,04	280	0,52	0,49

En la experimentación mostrada en las tablas anteriores la velocidad de giro máxima fue $S = 13.263 \text{ min}^{-1}$ y el avance lineal máximo fue $F = 1.592 \text{ mm/min}$, condiciones de corte que corresponden a los experimentos con velocidad de corte $V_c = 250 \text{ m/min}$ y avance por diente $f_z = 0,06 \text{ mm/diente}$.

En un primer análisis de los resultados presentados en las tablas anteriores (Tabla 4.3, Tabla 4.4 y Tabla 4.5), se comprueba como con los valores mayores de la profundidad de corte radial R_d se obtienen los mayores valores de rugosidad R_a , con ambos métodos de corte. La máxima rugosidad R_a se obtiene con corte en concordancia para $R_d = 0,36 \text{ mm}$ ($R_a(A) = 1,52 \mu\text{m}$).

Tras el análisis estadístico del diseño de experimentos realizado con el módulo específico del programa estadístico STATGRAPHICS®plus versión 5.0 y tras eliminar los términos no significativos del modelo saturado, se obtuvo una expresión estimativa del parámetro de rugosidad, R_a , promedio para todos los ángulos de medición ($15^\circ, 45^\circ, 75^\circ, 90^\circ, 105^\circ, 135^\circ, 165^\circ$), para cada una de las zonas en estudio. Para el fresado en concordancia (zona A) le corresponde la Ec. 4.1, con un ajuste R^2 igual al 98,2%.

$$R_a(A) = 0,6830 - 1,3451 \cdot A_d - 2,4904 \cdot R_d + 3,4081 \cdot f_z - 0,0025 \cdot V_c + 0,0067 \cdot A_d \cdot V_c + 14,6044 \cdot R_d^2 - 17,0406 \cdot R_d \cdot f_z + 0,0058 \cdot R_d \cdot V_c \quad \text{Ec. 4.1}$$

Para el fresado en oposición (zona B), le corresponde la Ec. 4.2, con un ajuste R^2 igual al 92,6%.

$$R_a(B) = 0,2004 + 0,2778 \cdot A_d + 0,3013 \cdot R_d - 2,8924 \cdot f_z - 0,0007 \cdot V_c + 9,4187 \cdot R_d^2 - 22,5372 \cdot R_d \cdot f_z + 0,0370 \cdot f_z \cdot V_c \quad \text{Ec. 4.2}$$

Es destacable el elevado valor del coeficiente de determinación del ajuste R^2 , en corte en concordancia, frente al menor valor de R^2 , obtenido en corte en oposición. El parámetro R^2 explica la fracción de la variabilidad total explicada por el ajuste. Por lo que el modelo $Ra(A)$ se ajusta mejor que el modelo $Ra(B)$ para los valores de rugosidad obtenidos en la experimentación realizada.

En la Figura 4.8, se muestran los efectos principales sobre el parámetro de rugosidad Ra , en la zona A. Para la operación de fresado realizada, la variable más significativa es la profundidad de corte radial Rd , que presenta una curva característica dada por la presencia del término cuadrático Rd^2 en la Ec. 4.1. El resto de variables también influyen, con una relación lineal directa, pero en una menor proporción, con menor diferencia entre los valores máximos y mínimos de las variables.

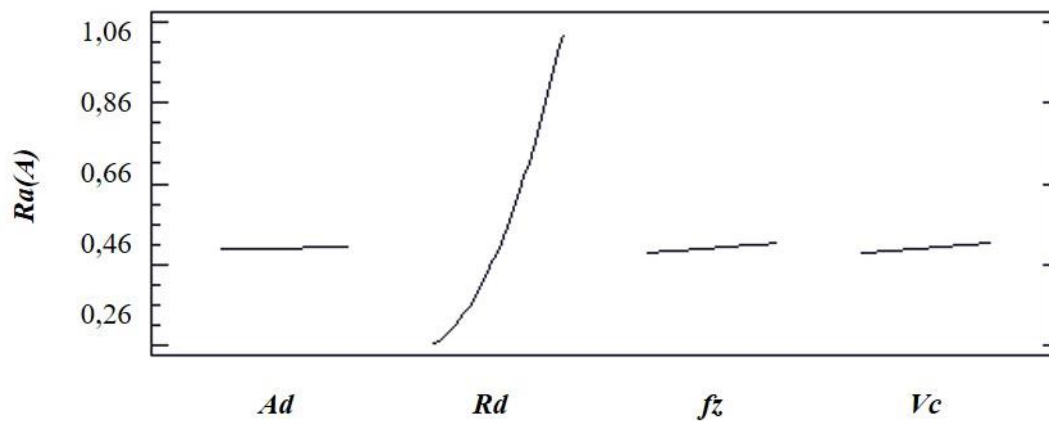


Figura 4.8. Gráficas de los efectos principales de la rugosidad $Ra(A)$.

En la Figura 4.9 se muestran las gráficas de las interacciones significativas para el modelo de la rugosidad $Ra(A)$, donde también se aprecia la gran influencia de la variable Rd , en relación con el resto de variables significativas, para los distintos niveles.

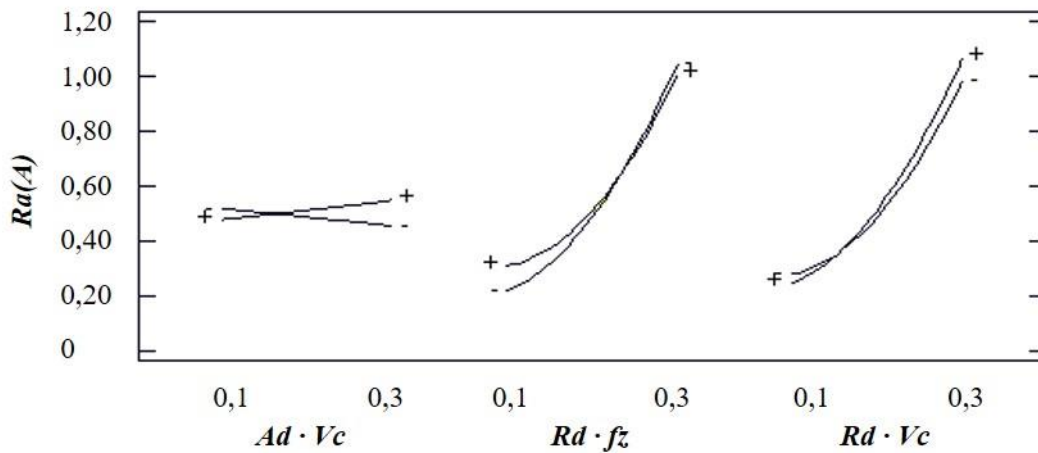


Figura 4.9. Gráficas de las interacciones significativas de la rugosidad $Ra(A)$.

En la Figura 4.10 se muestra un ejemplo de la superficie respuesta de la rugosidad Ra , del modelo obtenido para el fresado en concordancia (zona A), en función de la profundidad de corte radial, Rd y el avance por diente, fz . Al observar esta superficie se puede comprobar la variación de la rugosidad $Ra(A)$, con el cambio combinado de las variables Rd y fz . Mediante esta perspectiva tridimensional puede comprobarse como la variable Rd afecta de forma muy significativa al valor de rugosidad Ra . En cambio la variable fz afecta ligeramente al valor de Ra , con una relación lineal de pequeña pendiente.

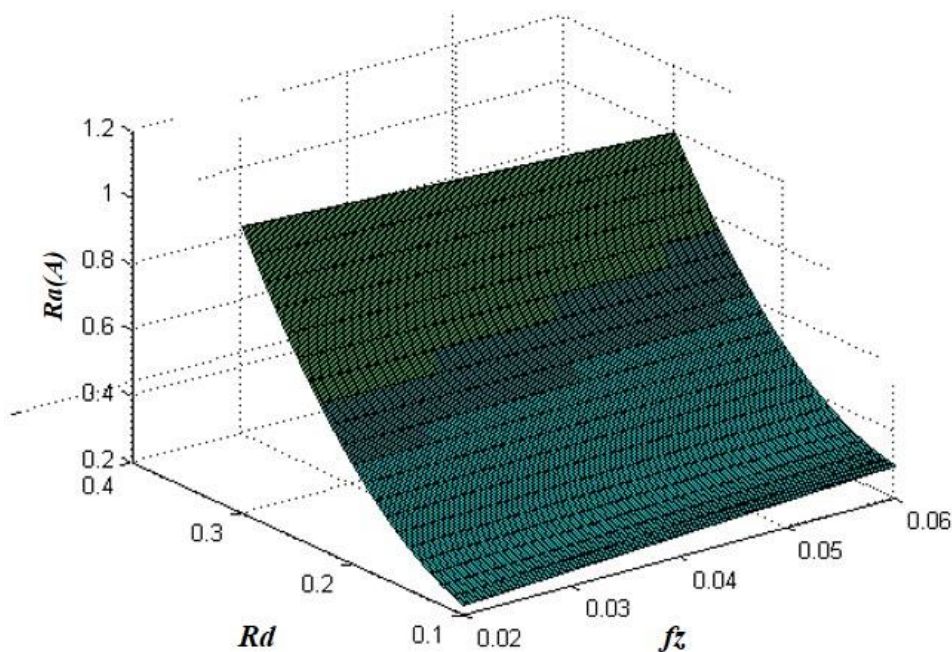


Figura 4.10. Superficie respuesta modelo $Ra(A)$. Ra versus Rd, fz .

En la Figura 4.11, se muestran los efectos principales sobre el parámetro de rugosidad Ra , en la zona B (corte en oposición). También en este caso, la variable más significativa es la profundidad de corte radial Rd . El resto de variables también influyen pero en una menor proporción. A diferencia de la gráfica para la rugosidad $Ra(A)$ de la Figura 4.8, en la Figura 4.11 se aprecia una influencia de las variables Ad y Vc mayor para el nivel alto, pues la relación lineal mostrada de cada variable tiene una mayor pendiente respecto las gráficas mostradas en la Figura 4.8.

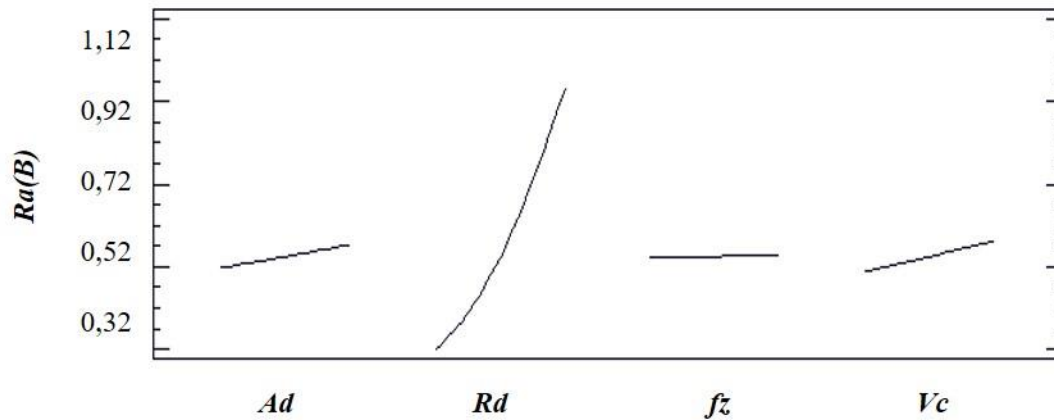


Figura 4.11. Gráficas de los efectos principales de la rugosidad $Ra(B)$.

En la Figura 4.12 se muestran las gráficas de las interacciones significativas para el modelo de la rugosidad $Ra(B)$. En este caso, sólo existen dos interacciones significativas ($Rd \cdot fz$ y $fz \cdot Vc$) donde también se aprecia la gran influencia de la variable Rd , en relación con la variable significativa, fz para los distintos niveles. En la interacción $fz \cdot Vc$ se comprueba que no afecta la variable Vc , al valor de rugosidad Ra para el nivel bajo de fz .

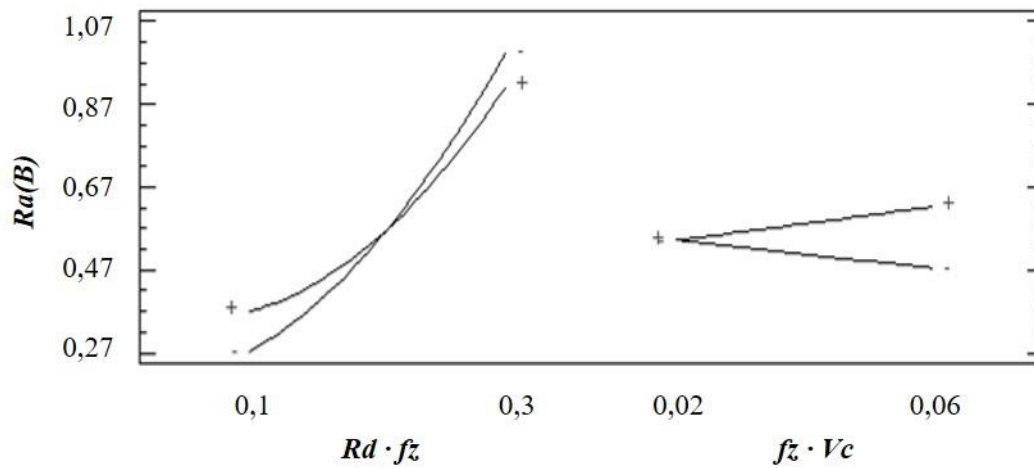


Figura 4.12. Gráficas de las interacciones significativas de la rugosidad $Ra(B)$.

En la Figura 4.13 se muestra un ejemplo de la superficie respuesta de la rugosidad Ra , del modelo obtenido para el método de corte B (en oposición), en función de la profundidad de corte radial, Rd y el avance por diente, fz , para distintos valores de estas variables limitadas dentro del intervalo de experimentación ensayado.

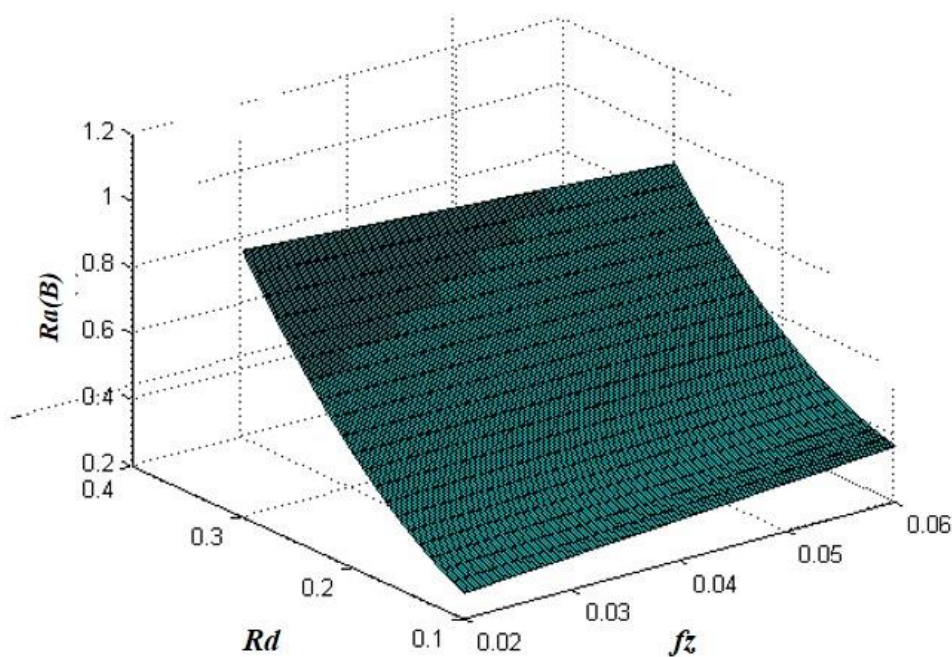


Figura 4.13. Superficie respuesta modelo $Ra(B)$. Ra versus Rd, fz .

Con la obtención de estos modelos analíticos del parámetro de rugosidad, Ra , es importante destacar en este punto, la relevancia del uso adecuado del número de cifras decimales, o cifras significativas,

en función de los factores o variables significativos que aparecen en el modelo. Así en el modelo A de la Ec. 4.1 con los factores de corrección con 4 cifras decimales, si se plantean las condiciones de corte de la Tabla 4.3, experimento n° 20, se obtiene una rugosidad Ra de 0,50 μm . Pero si se emplean 3 cifras decimales en el modelo, la rugosidad se reduce a 0,42 μm (diferencia que coincide prácticamente con el error de repetibilidad presente en esta experimentación), lo que implica una reducción del 16% en el valor calculado inicialmente. Para el mismo experimento, en el modelo B de la Ec. 4.2, se obtiene una reducción menor, del 11%. En general, se obtiene el mayor porcentaje de reducción al pasar el modelo de 4 a 3 decimales, con los valores mínimos de rugosidad Ra obtenida.

4.1.3. Análisis del acabado superficial obtenido

A continuación, se presentan como ejemplo los resultados concretos del experimento n° 20, en la franja de los puntos centrales de experimentación con las condiciones de corte mostradas en la Tabla 4.4, condiciones que dan lugar a los parámetros de programación fundamentales de la máquina: velocidad de giro $S = 10.611 \text{ min}^{-1}$ y avance lineal $F = 849 \text{ mm/min}$. En la Figura 4.14 y Figura 4.15 se muestra un ejemplo de los perfiles de rugosidad obtenidos mediante el rugosímetro Taylor Hobson, para 2 ángulos de medición distintos (a 45° y a 90°), con el método de corte en concordancia (zona A).

En la Figura 4.14 (experimento 20, zona A, ángulo 45°) se muestra el perfil de la rugosidad obtenida de una superficie sin defectos, con un perfil periódico, con homogeneidad en su textura y acabado brillante. Los valores de rugosidad correspondientes a este experimento: $Ra = 0,59 \mu\text{m}$, $RSm = 200 \mu\text{m}$.

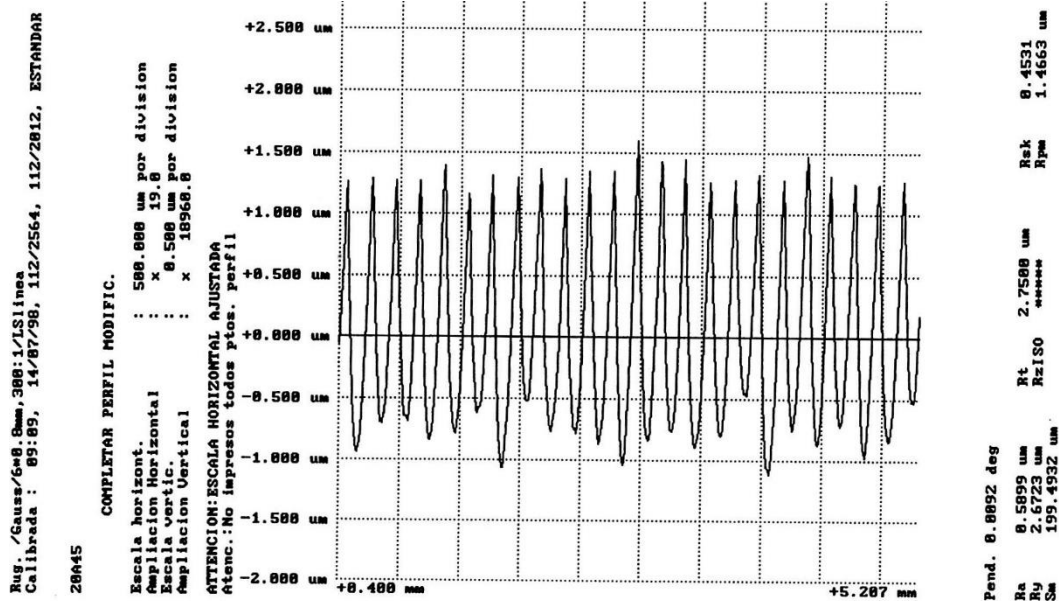


Figura 4.14. Perfil de rugosidad zona A, experimento 20, ángulo 45°.

En cambio, en la Figura 4.15 (experimento 20, zona A, ángulo 90°) se muestra la rugosidad de una superficie heterogénea, con un perfil no periódico, con defectos apreciables visualmente y acabado mate. Los valores de rugosidad correspondientes a este experimento con el ángulo de 90°: $Ra = 0,38 \mu\text{m}$, $RSm = 61 \mu\text{m}$. Estos valores son menores respecto a los valores obtenidos para 45°.

Para el ángulo de 45°, el parámetro de rugosidad RSm tiene un valor próximo ($200 \mu\text{m}$) al valor de la profundidad de corte radial, $Rd = 0,20 \text{ mm}$, tal como es de esperar en un perfil periódico. En cambio, para el ángulo de 90°, el valor de RSm es distinto ($61 \mu\text{m}$), lo cuál corrobora la presencia de irregularidades en el perfil de rugosidad.

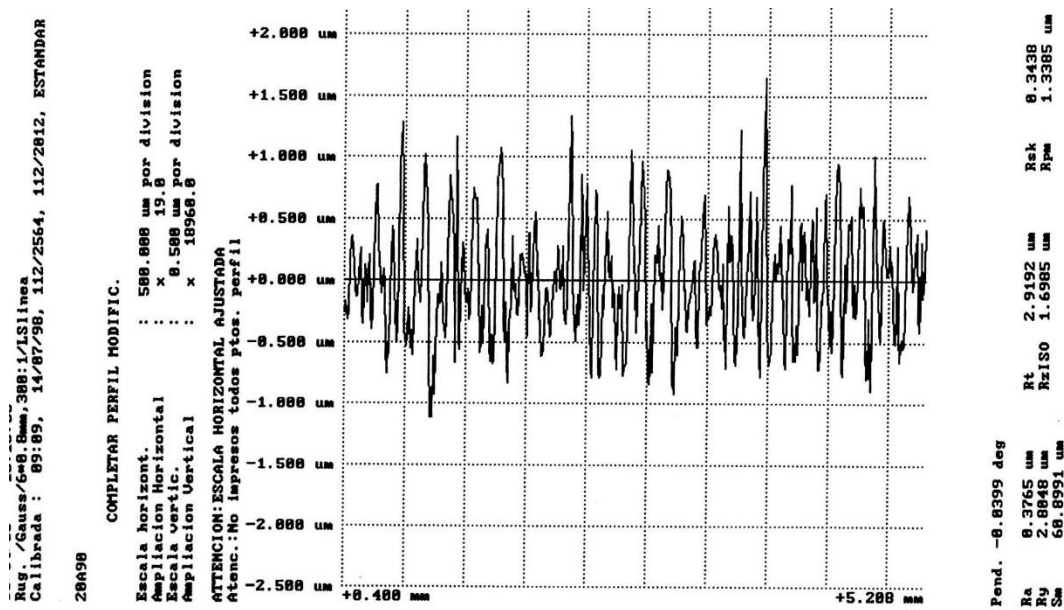


Figura 4.15. Perfil de rugosidad zona A, experimento 20, ángulo 90°.

Entre otros factores que repercuten en el resultado, en este caso, resulta que al mecanizar a 90° y a profundidad de corte axial pequeña, $Ad = 0,20$ mm, la velocidad de corte efectiva desciende considerablemente, para el ángulo de 90° hasta un valor de 67 m/min (calculado con un diámetro efectivo de 2,15 mm). Para el ángulo de 45° se obtiene una velocidad de corte efectiva, $Vce = 181$ m/min. Para el ángulo de 105° se obtiene el valor mínimo de la velocidad de corte efectiva ($Vce = 16$ m/min, valor calculado con un diámetro efectivo de 0,49 mm), por lo que la punta de la herramienta de corte trabaja a velocidad de corte muy por debajo del valor recomendado. Este hecho dificulta el corte del material y la obtención de la viruta correspondiente, pues la velocidad de corte se debería hallar dentro del intervalo recomendado por el fabricante de la herramienta de corte, para unas condiciones de contorno dadas (tipo de herramienta, material a mecanizar, operación de mecanizado).

Según comentarios con operarios que realizan el pulido o ajuste manual final del molde, una superficie como la indicada en la Figura 4.15, a pesar de obtener una menor rugosidad Ra , por el hecho de ser más irregulares las superficies obtenidas, supone mayor tiempo de pulido manual, en operaciones posteriores a realizar para mejorar el acabado superficial, en especial sobre materiales templados.

Al observar los resultados anteriores, es interesante comparar los resultados experimentales hallados del experimento 20, con los ángulos analizados, de la rugosidad Ra , respecto a los resultados teóricos de la zona A y de la zona B (Tabla 4.6). También se presenta el valor medio para la trayectoria de subida, bajada, así como el valor medio de todos los ángulos.

Tabla 4.6. Rugosidad Ra y RSm en experimento 20, en función de los ángulos de medición.

Ángulo [°]	Vce [m/min]	Ra [μm] zona A	RSm [μm] zona A	Ra [μm] zona B	RSm [μm] zona B
15	200	0,82	200	1,07	200
45	181	0,59	200	0,40	200
75	114	0,38	201	0,35	200
90	67	0,38	61	0,40	75
105	16	0,39	199	0,41	199
135	86	0,34	208	0,57	191
165	164	0,45	198	0,62	200
Subida		0,59	200	0,61	200
Bajada		0,39	202	0,53	197
Media total		0,48	201	0,53	199

En los resultados mostrados en la Tabla 4.6 se contemplan inicialmente la media de los parámetros de rugosidad Ra y RSm , para los ángulos de subida (15°, 45° y 75°), ángulo de 90°, ángulos de bajada (105°, 135° y 165°), la media total de todos los ángulos analizados. En relación a estos resultados obtenidos para ambos métodos de corte se destacan los siguientes aspectos:

- El valor mayor de la rugosidad Ra aparece en el ángulo de 15° (en especial, en corte en oposición), cuando la velocidad de corte efectiva es máxima, en un punto próximo a la entrada de la herramienta.
- El valor menor de rugosidad Ra aparece en el ángulo de 135° para corte en concordancia, con trayectoria de bajada. Con corte en oposición, el valor menor de rugosidad Ra aparece en el ángulo de 75°, con trayectoria de subida.
- El valor de rugosidad Ra es menor cuando la herramienta realiza la trayectoria de bajada en ambos métodos.
- En la media total del valor de RSm , no se ha contabilizado el valor de la rugosidad a 90°, pues se desvía notablemente del valor esperado. En el resto de ángulos el valor de RSm se mantiene estable, entorno a 200 μm , y se aproxima al valor de Rd (0,20 mm).

En la Tabla 4.7, se muestra la variabilidad de la medida de la rugosidad Ra (promedio a todos los ángulos de medición y desviación típica), para el experimento 20, en función de los dos métodos de corte (zona A en concordancia y zona B en oposición). También se añaden los valores de repetibilidad R [μm], del error cuadrático medio, ε_T [μm], y los valores mínimos y máximos de la medida total resultante, $x_{\min} - x_{\max}$ [μm]. Se redondea el error total de forma que tenga sólo dos cifras decimales. De igual forma la medida total no puede ser más precisa que el error y debe redondearse para que tenga la misma precisión.

Tabla 4.7. Variabilidad de la medida de la rugosidad, Ra en función del método de corte.

Zona	\bar{x}_m [μm]	s_m [μm]	R [μm]	ε_T [μm]	$x_{\min} - x_{\max}$ [μm]
A	0,48	0,033	0,085	0,02	0,46 - 0,50
B	0,53	0,045	0,108	0,02	0,51 - 0,55

Con los resultados mostrados en la Tabla 4.7 se observa que el valor medio, la desviación típica y la repetibilidad son mayores para la zona B (corte en oposición), respecto la zona A (corte en concordancia).

También es interesante desglosar los resultados generales obtenidos en los experimentos 17-20 (con idénticas condiciones de corte, en los puntos centrales de la experimentación), para los distintos ángulos de medición, y para el promedio de los ángulos, en la zona A, tal como se muestra en la Tabla 4.8 y para la zona B, en la Tabla 4.9. Se resalta en color, en rojo los valores máximos y en verde los valores mínimos en cada columna.

Tabla 4.8. Variabilidad de la rugosidad, Ra en función del ángulo de medición en la zona A.

Ángulo [°]	\bar{x}_m [μm]	s_m [μm]	R [μm]	ε_T [μm]	$x_{\min} - x_{\max}$ [μm]
15	0,77	0,037	0,104	0,02	0,75 - 0,79
45	0,58	0,043	0,109	0,02	0,56 - 0,60
75	0,41	0,03	0,072	0,01	0,40 - 0,42
90	0,37	0,027	0,069	0,01	0,36 - 0,38
105	0,40	0,012	0,028	0,01	0,39 - 0,41
135	0,39	0,047	0,125	0,02	0,37 - 0,41
165	0,47	0,035	0,091	0,02	0,45 - 0,49
Media total	0,48	0,033	0,085	0,02	0,46 - 0,50

Tabla 4.9. Variabilidad de la rugosidad, Ra en función del ángulo de medición en la zona B.

Ángulo [°]	\bar{x}_m [μm]	s_m [μm]	R [μm]	ε_T [μm]	$x_{\min} - x_{\max}$ [μm]
15	0,90	0,151	0,35	0,07	0,83 - 0,97
45	0,42	0,055	0,144	0,03	0,39 - 0,45
75	0,35	0,007	0,017	0,01	0,34 - 0,36
90	0,42	0,027	0,066	0,01	0,41 - 0,43
105	0,42	0,015	0,039	0,01	0,41 - 0,43
135	0,56	0,038	0,092	0,02	0,54 - 0,58
165	0,62	0,022	0,052	0,01	0,61 - 0,63
Media total	0,53	0,045	0,109	0,02	0,51 - 0,55

El máximo valor de rugosidad Ra corresponde al ángulo de medición a 15° en la zona B. En la zona B se obtienen todos los valores máximos de rugosidad, Ra y de los parámetros de dispersión, para los experimentos analizados, en el ángulo de 15° y los valores mínimos en el ángulo de 75° . Las diferencias entre los valores máximos y mínimos son grandes para estos dos ángulos de medición de la trayectoria de subida. Por ejemplo, rugosidad Ra ($0,35 \mu\text{m} - 0,90 \mu\text{m}$) el error de repetibilidad ($0,017 \mu\text{m} - 0,350 \mu\text{m}$), el error medio ($0,01 \mu\text{m} - 0,07 \mu\text{m}$) y la medida total ($0,34 \mu\text{m} - 0,97 \mu\text{m}$), para los ángulos de 75° y 15° respectivamente. En el caso A, los resultados son más dispares, con un resultado mínimo del valor de la rugosidad ($Ra = 0,37 \mu\text{m}$) y por lo tanto de la medida total, en el ángulo de 90° . El resultado máximo del valor de la rugosidad ($Ra = 0,77 \mu\text{m}$) y por lo tanto de la medida total, se ha obtenido en el ángulo de 15° .

Para que el avance programado no fuera una causa de un acabado heterogéneo en la entrada de la herramienta a pieza, y se mantuviera constante este avance, se programó una distancia de seguridad suficiente (30 mm), con entrada tangencial de la herramienta al iniciar la operación de copiado.

Aún así, como se observa en los resultados mostrados en la Tabla 4.8 y la Tabla 4.9, el peor resultado de rugosidad Ra , con diferencia en ambos casos, se produce en el ángulo de medición a 15° . Este es el punto de mayor velocidad de corte efectiva, mayor sección de corte y el ángulo más próximo, al punto de entrada de la herramienta al mecanizar la pieza.

A continuación se muestran algunas particularidades de la experimentación, obtenidas en el acabado superficial, en los experimentos 9, 16, 17 y 24, según las condiciones de corte establecidas (Tabla 4.3, Tabla 4.4 y Tabla 4.5), en el ángulo de 90° , en las zonas A y B (rugosidades $Ra(A)$ y $Ra(B)$ promedio a todos los ángulos de medición):

- En el experimento 9 se obtuvo el menor valor de la rugosidad Ra en zona A.
- El experimento 16 se realizó con las máximas condiciones de corte.
- El experimento 17 se realizó con las condiciones de corte centrales.
- En el experimento 24 se obtuvo el mayor valor de la rugosidad Ra en zona A.

En las siguientes figuras (Figura 4.16, Figura 4.17, Figura 4.18 y Figura 4.19, con ampliación 72X), se observa la textura superficial característica para cada condición de corte, alrededor del ángulo de medición de 90° , en la zona A (corte en concordancia) y en la zona B (corte en oposición).

La distancia aproximada entre líneas horizontales corresponde al valor de la profundidad de corte radial y la distancia aproximada entre los semicírculos que aparecen en las figuras, entre estas líneas horizontales, corresponde al valor del avance por revolución correspondiente.

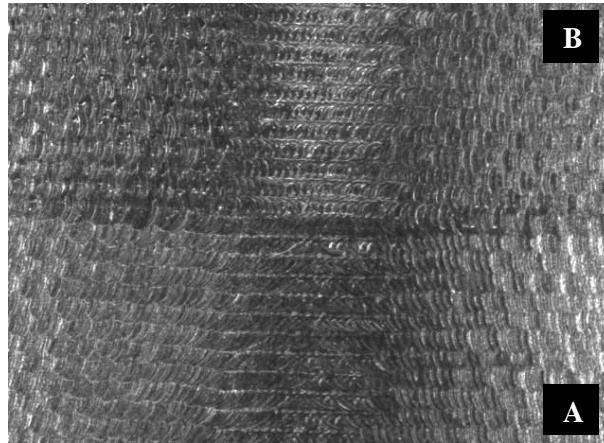


Figura 4.16. Experimento 9, ángulo 90°. Zona A y zona B.



Figura 4.17. Experimento 16, ángulo 90°. Zona A y zona B.

En el experimento 9, la rugosidad Ra (promedio a todos los ángulos de medición) en la zona A, es ligeramente inferior a la rugosidad Ra obtenida en la zona B, con una diferencia de $0,03 \mu\text{m}$. En cambio en el experimento 16, la rugosidad Ra en la zona A, es superior a la rugosidad Ra obtenida en la zona B, con una diferencia de $0,11 \mu\text{m}$.

En la figura que se muestra a continuación (Figura 4.18) del experimento 17, la rugosidad Ra (promedio a todos los ángulos de medición) en la zona A, es inferior a la rugosidad Ra obtenida en la zona B, con una diferencia de $0,07 \mu\text{m}$. En cambio en el experimento 24 (Figura 4.19), la rugosidad Ra en la zona A, es superior a la rugosidad Ra obtenida en la zona B, con una diferencia de $0,21 \mu\text{m}$.

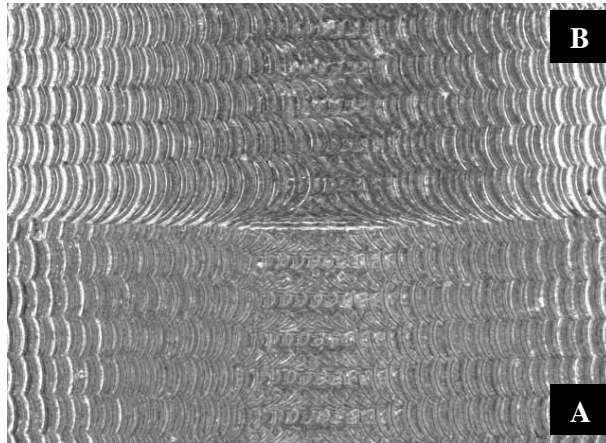


Figura 4.18. Experimento 17, ángulo 90°. Zona A y zona B.

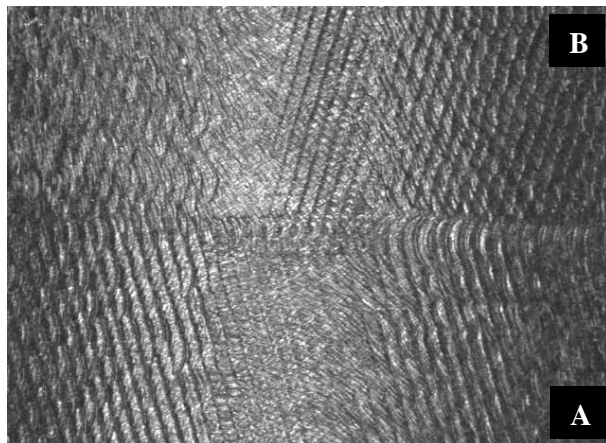


Figura 4.19. Experimento 24, ángulo 90°. Zona A y zona B.

En la Figura 4.18, en la textura superficial mostrada se aprecian las líneas horizontales indicadoras del paso o profundidad radial de la herramienta ($Rd = 0,20$ mm) en el experimento 17. En cambio, en la Figura 4.19 se muestra el experimento 24, donde sólo ha cambiado la profundidad de corte Rd al valor máximo ($Rd = 0,36$ mm). En este caso, no son apreciables estas líneas horizontales, pero aparecen otras líneas características inclinadas a 15° respecto el eje Y de máquina, para ambos métodos de corte. Líneas con un distanciamiento entre ellas aproximado de $0,10$ mm, valor cercano al avance por revolución para este experimento, $f = 0,08$ mm/rev.

4.1.4. Validación de los modelos obtenidos.

Para la validación de los modelos calculados anteriormente, para cada método de corte (modelo $Ra(A)$ con Ec. 4.1 y modelo $Ra(B)$ con Ec. 4.2), se utilizaron los resultados obtenidos en los 8 experimentos adicionales mostrados en la Tabla 4.5. En la Figura 4.20 y la Figura 4.21 se muestran los residuos estandarizados calculados a partir de la Ec. 3.11, para los valores de profundidad de corte radial Rd y los métodos de corte ensayados.

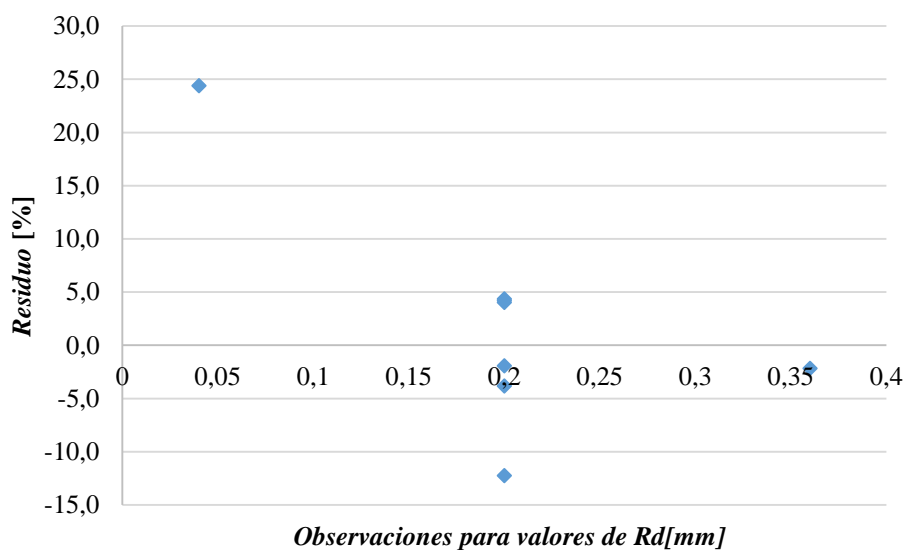


Figura 4.20. Residuos en experimentos adicionales para el modelo $Ra(A)$, en función de Rd .

Se observa un comportamiento aleatorio para ambos métodos de corte, con valores mayores de los residuos con el método de corte en oposición (Figura 4.21 con modelo $Ra(B)$), con un valor máximo de 36,8% (el valor máximo con corte en concordancia fue del 24,4%). Si se considera la variabilidad existente por los distintos puntos de medición analizados, el comportamiento de los residuos es satisfactorio. Por ejemplo, si se tuviera en cuenta la diferencia mínima entre los valores mínimos y máximos de las muestras analizadas mostrados en la Tabla 4.8 ($0,02 \mu\text{m}$), el residuo máximo en corte en concordancia, de 24,4% se reduciría al 13,6%. En el caso del corte en oposición, el residuo máximo de 36,8% se reduciría al 24,9%.

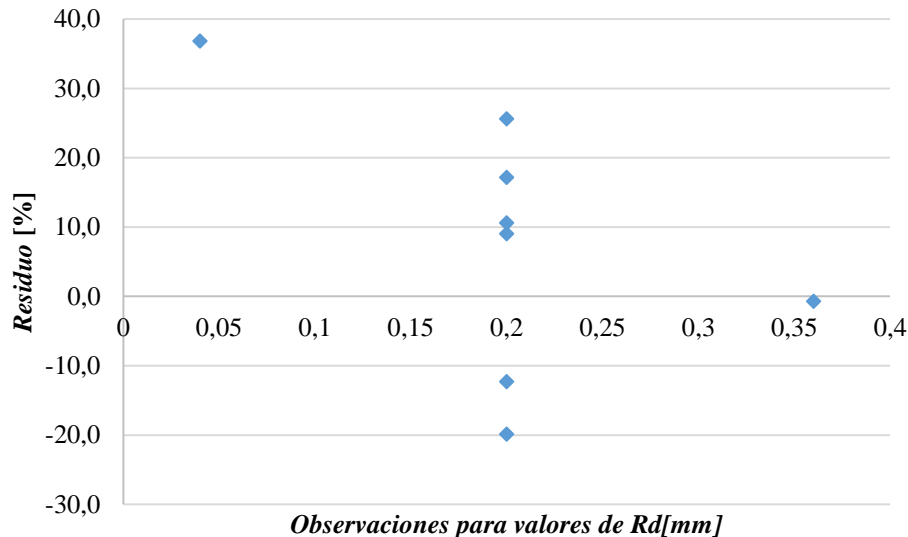


Figura 4.21. Residuos en experimentos adicionales para el modelo $Ra(B)$, en función de Rd .

4.1.5. Conclusiones.

Las conclusiones principales del estudio presentado con anterioridad, han sido las siguientes:

- Se han obtenido dos modelos predictivos para la rugosidad Ra , para cada uno de los métodos de corte (en concordancia y en oposición), para el valor medio de rugosidad de todos los ángulos de medición, en una superficie curva convexa.
- El factor más significativo con respecto a la rugosidad Ra ha sido la profundidad de corte radial, Rd , o paso lateral. De manera que a mayor Rd se incrementa notablemente la rugosidad Ra . El resto de factores (velocidad de corte, avance por diente y profundidad de corte axial) tienen una influencia menor. No se aprecia influencia significativa de la velocidad de corte a un avance por diente bajo.
- Con la estrategia de mecanizado en concordancia se obtiene un acabado más uniforme, sin la presencia de defectos superficiales. En cambio, con el mecanizado en oposición el acabado es más heterogéneo, con aparición de marcas que evidencian un corte de la herramienta desigual.
- En general, cuando se mecaniza con trayectoria en sentido ascendente se han encontrado un mayor número de defectos superficiales debido a marcas presentes en la superficie. El peor resultado se ha obtenido durante el mecanizado en oposición en sentido ascendente, debido a diversas irregularidades presentes en la superficie, con una textura superficial heterogénea, no uniforme, en varios de los experimentos. Este tipo de mecanizado es más sensible a la

variación y dirección de las fuerzas de corte, especialmente en las profundidades de corte menores, lo que afecta a la flexión de la herramienta e indirectamente al acabado superficial.

- Para evaluar el acabado superficial, aparte de presentar el parámetro Ra , es interesante indicar el parámetro de rugosidad RSm , como indicador de las irregularidades horizontales presentes en la superficie, o como indicador de la heterogeneidad de la superficie obtenida.
- Este hecho se ha comprobado en el ángulo de medición de 90° , donde el valor de RSm es diferente al valor esperado, en función de la profundidad de corte radial y el acabado superficial obtenido también es diferente al resto de los ángulos de medición.

4.2. Estudio de la influencia del desgaste de las herramientas en el acabado superficial.

En este apartado se muestra el estudio realizado para determinar la relación entre acabado superficial y desgaste de la herramienta de corte al realizar la operación de copiado sobre un acero de moldes templado en la pieza tipo 1.

4.2.1. Materiales y métodos.

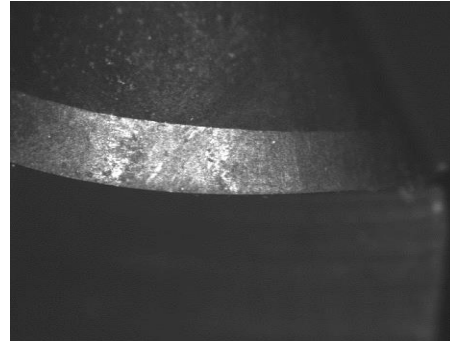
En este estudio se emplean los mismos parámetros de mecanizado detallados en el apartado 4.1.1. Aunque en este caso sólo se emplea el método de corte en concordancia, puesto los resultados obtenidos en el apartado 4.1.2 fueron más favorables.

Respecto a la herramienta de corte se mantuvo la geometría básica, con punta esférica, de metal duro submicrograno con recubrimiento, con 2 aristas de corte y con un voladizo de herramienta de 30 mm. Pero se cambió la referencia de la herramienta, ref. VF2SBR0300 (diámetro de corte 6 mm), pues aparecieron en el mercado una serie nueva de herramientas de MMC KOBE con un nuevo nanorecubrimiento MIRACLE, con base (Al, Ti)N (Mitsubishi 2006). Las características principales de este nuevo nanorecubrimiento son: dureza 3.700 HV, fuerza de adhesión 100 N, resistencia térmica 1.300 °C y coeficiente de fricción 0,48. La herramienta de corte tiene un ángulo de desprendimiento positivo, ángulo de hélice 30° y además ofrece una tolerancia de corte en radio más precisa, $\pm 0,005$ mm.

En las siguientes figuras (ampliación 72X) se muestra una vista frontal de la herramienta en la Figura 4.22(a) y una vista con la herramienta inclinada a 45° en la Figura 4.22(b), donde se puede apreciar la superficie de incidencia de una de las aristas de corte de la herramienta.



(a) Vista frontal de la herramienta.



(b) Vista a 45° de la arista de corte.

Figura 4.22. Vistas de la herramienta nueva ref. VF-2SB R3.

Las condiciones de corte para este estudio se programaron con los siguientes parámetros:

- Velocidad de corte, $V_c = 250$ m/min ($S = 13.263$ min⁻¹);
- Avance por diente, $f_z = 0,04$ mm/diente (avance, $F = 1.061$ m/min);
- Profundidad de corte axial, $A_d = 0,2$ mm y profundidad de corte radial, $R_d = 0,05$ mm;
- Método de corte: fresado en concordancia (sólo existe una zona A);
- Lubricación mediante aire a presión a 6 bar.

Se realizó un control de desgaste de herramienta en cada cambio de pieza, mediante fotografías y medición del desgaste de la superficie de incidencia de las dos aristas de corte a 45° (Figura 4.23) y vista del frontal, mediante microscopio Mitutoyo Quickvision.

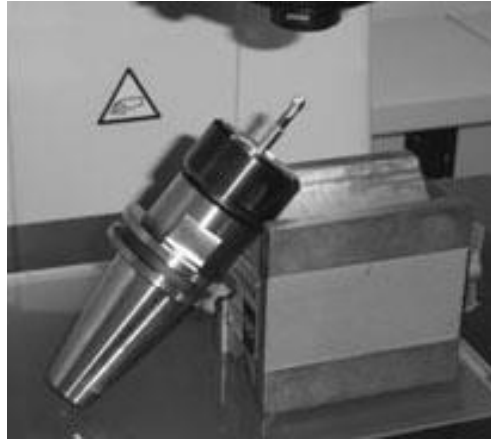


Figura 4.23. Medición desgaste herramienta en superficie de incidencia.

Se utilizaron dos herramientas ($T1$ y $T2$), para el mismo ensayo para comparar diferencias en los resultados. En las dos herramientas se comprobó su excentricidad con comparador milesimal, para asegurar un valor inferior a 0,005 mm.

Respecto a los ángulos de medición de rugosidad analizados anteriormente sobre la pieza (Figura 4.7), en este estudio, se estudiaron sólo tres ángulos (45° , 85° , 135°), alrededor del punto medio de cada probeta (a unos 22,5 mm de los extremos de la pieza), en la dirección del eje Y . Con la medición de la rugosidad a 45° (Figura 4.24) y 135° se analizó la rugosidad en copiado en subida (trayectoria ascendente) y en bajada (trayectoria descendente), respectivamente. Con la medición de la rugosidad a 85° , se analizó la rugosidad en copiado en subida en un ángulo de la pieza, donde se puede apreciar el máximo desgaste de la herramienta.

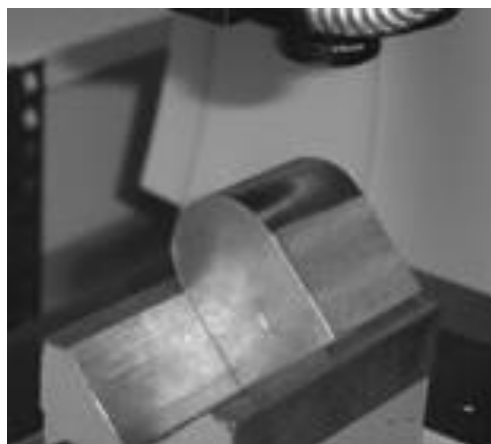


Figura 4.24. Posición pieza para medición de rugosidad a 45° .

Debido a las características geométricas de la pieza, la profundidad de corte axial y la estrategia de mecanizado empleada, la velocidad de corte efectiva era variable, entre un valor máximo de 250 m/min y un valor mínimo de 20 m/min. En la Tabla 4.10 se muestra el diámetro efectivo (según la Ec. 1.12) y la velocidad de corte efectiva (según la Ec. 1.3), para los ángulos de medición analizados.

Tabla 4.10. Parámetros de corte efectivos de la herramienta.

Angulo [°]	De [mm]	Vce [m/min]
45	5,42	226
85	2,5	104
135	2,57	107

4.2.2. Análisis de resultados.

A continuación se muestran y analizan los resultados obtenidos en la experimentación. En la Figura 4.25 puede observarse la evolución del desgaste a lo largo de toda la longitud de mecanizado recorrida, para las 2 aristas de corte de la herramienta $T1$ ($VB(f1)$ y $VB(f2)$), alrededor del ángulo de medición de 85°. Existe una ligera diferencia entre el desgaste de las dos aristas de corte. Esto puede deberse a la tolerancia de corte radial de la herramienta, que afecta a cada una de las aristas, ya que el error máximo admisible por este concepto es de 0,01 mm, según información proporcionada por el fabricante de la herramienta (Kobelco 2002), por lo que en una de las aristas de corte ($f2$) se apreciará un mayor desgaste en la superficie de incidencia.

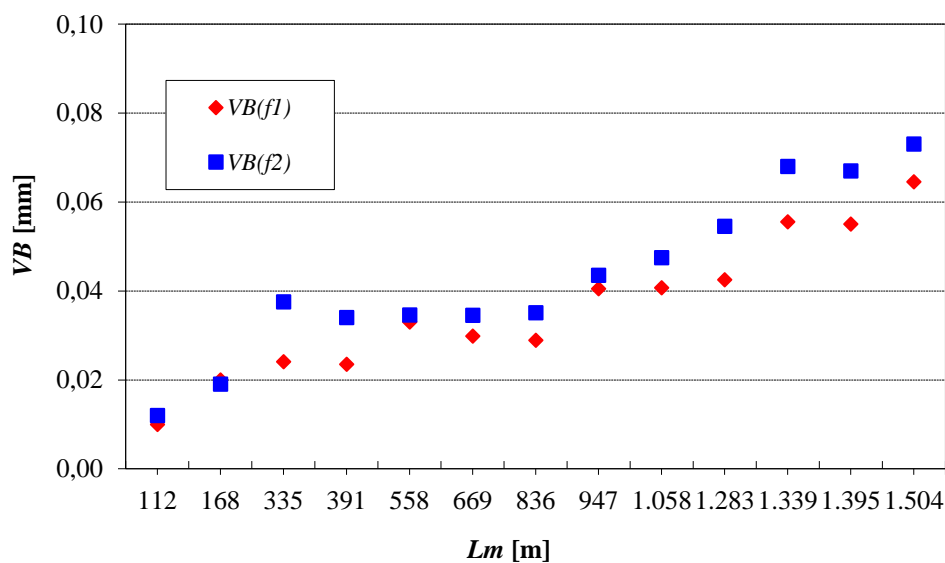


Figura 4.25. Relación desgaste de las aristas de corte de la herramienta $T1$ y longitud mecanizado, a 85°.

En la Figura 4.26 puede observarse la evolución del desgaste a lo largo de toda la longitud de mecanizado recorrida, para las 2 aristas de corte de la herramienta $T2$. En este caso existe una menor diferencia de desgaste entre las aristas de corte de la herramienta, lo que sugiere que ambas aristas de corte tengan un radio similar.

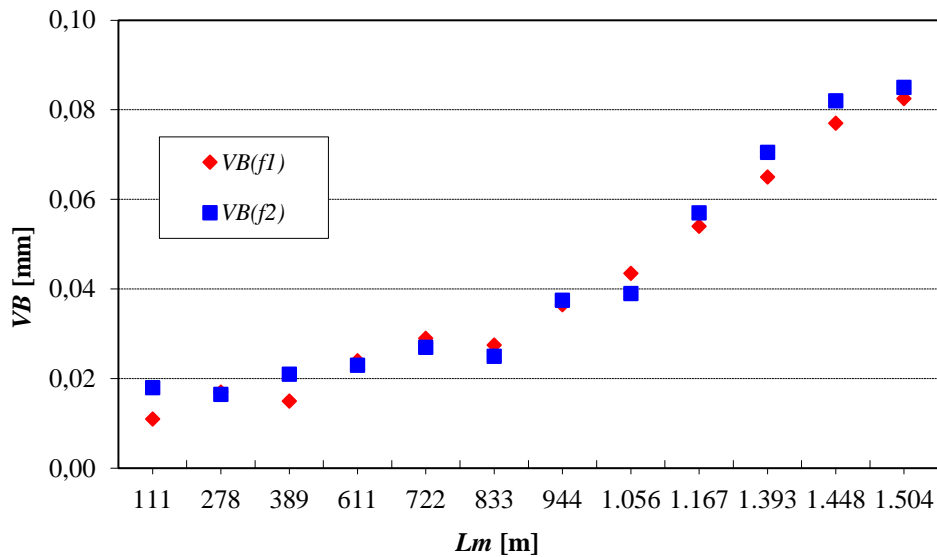
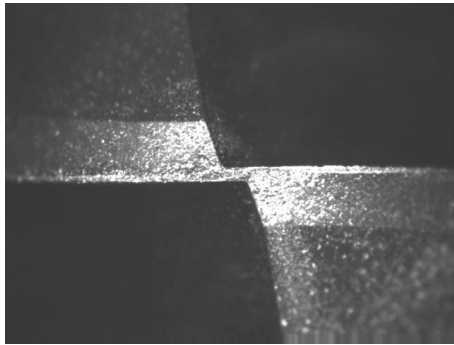


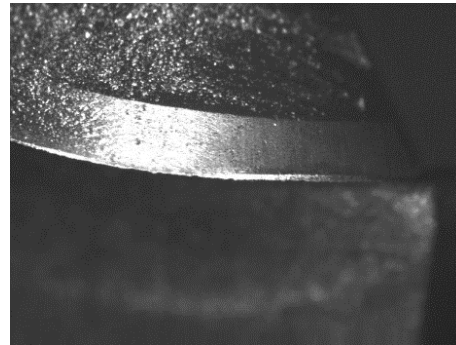
Figura 4.26. Relación desgaste de las aristas de corte de la herramienta $T2$ y longitud de mecanizado, a 85° .

En la Figura 4.26 también se observa como el desgaste aumenta lentamente hasta alcanzar la longitud de mecanizado de 833 m. A partir de esta longitud, aumenta más rápidamente el valor del desgaste de la herramienta, hasta el valor máximo de $VB(f2) = 0,085$ mm, en la longitud de mecanizado $Lm = 1.504$ mm. Para esta longitud de mecanizado, el desgaste máximo de la herramienta $T1$ fue de $VB(f2) = 0,073$ mm. Por lo tanto, el valor del desgaste máximo es similar para ambas herramientas, máxime si se tiene en cuenta la tolerancia del radio de las aristas de corte de la herramienta ($\pm 0,005$ mm).

En la Figura 4.27 (ampliación 72X), se muestra un ejemplo de la evolución del desgaste en una vista frontal en la Figura 4.27(a), y en una vista con la herramienta inclinada a 45° , en la Figura 4.27(b), para una longitud de mecanizado de 944 m en la herramienta $T2$, con un desgaste máximo promedio a ambas aristas de corte, $VB_{m\acute{a}x} = 0,037$ mm.



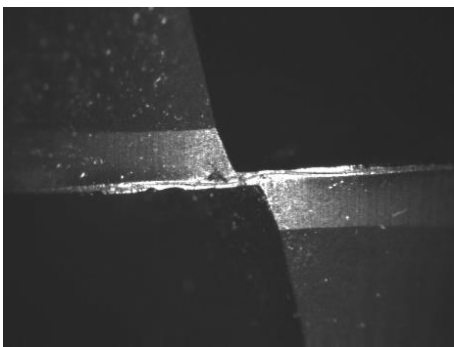
(a) Desgaste vista frontal.



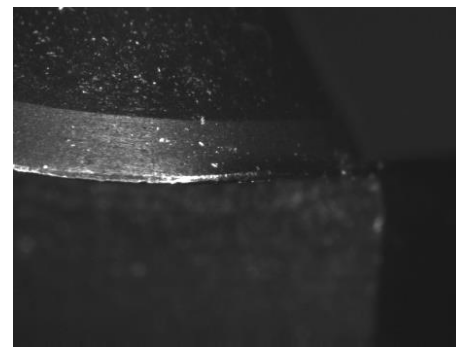
(b) Desgaste vista a 45°.

Figura 4.27. Vistas del desgaste de la herramienta *T2*, para $L_m = 944$ m.

En la Figura 4.28 (ampliación 72X), se muestra la evolución del desgaste en una vista frontal en la Figura 4.28(a), y en una vista con la herramienta inclinada a 45° en la Figura 4.28(b), para una longitud de mecanizado de 1.504 m, de la herramienta *T2*, con un desgaste máximo promedio a ambas aristas de corte, $VB_{m\acute{a}x} = 0,084$ mm.



(a) Desgaste vista frontal.



(b) Desgaste vista a 45°.

Figura 4.28. Vistas del desgaste de la herramienta *T2*, para $L_m = 1.504$ m.

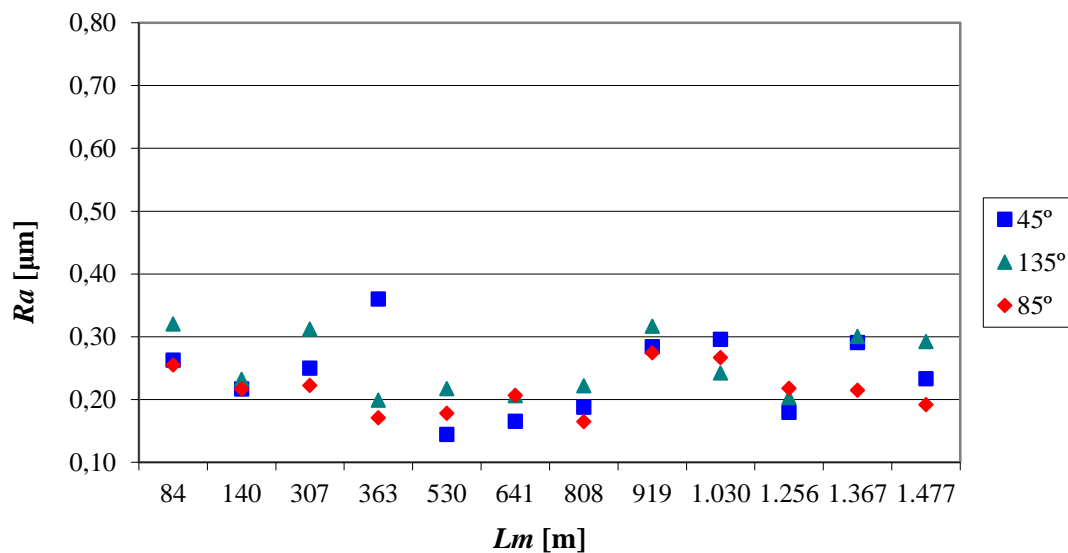
En la Tabla 4.11 se muestran los cálculos estadísticos realizados a partir de la medición repetida 5 veces, del desgaste máximo $VB_{m\acute{a}x}$, de las dos aristas de corte ($f1$, $f2$), para las dos herramientas (*T1*, *T2*), en la longitud de mecanizado final de 1.504 m, para el ángulo de medición de 85°. A partir de la Ec. 3.7 se obtiene el intervalo ampliado de la medida total resultante ($x_{m\acute{i}n} - x_{m\acute{a}x}$), al considerar un intervalo de confianza del 95%.

Con esta consideración, la diferencia de desgaste entre las dos aristas de corte queda solapada por la variabilidad de la medida, tal como puede apreciarse en la Tabla 4.11.

Tabla 4.11. Variabilidad de la medida del desgaste VB a $Lm = 1.504$ m para $T1$ y $T2$.

VB [mm]	\bar{x}_m	s_m	R	$\varepsilon_T \cdot t$	$x_{mín} - x_{máx}$
$T1 (f1)$	0,065	0,002	0,005	0,002	0,063 - 0,067
$T1 (f2)$	0,067	0,003	0,007	0,003	0,064 - 0,070
$T2 (f1)$	0,073	0,002	0,005	0,003	0,070 - 0,076
$T2 (f2)$	0,071	0,002	0,005	0,003	0,068 - 0,074

En la Figura 4.29 y la Figura 4.30 se observa la evolución de la rugosidad Ra en función de la longitud de mecanizado (medición tomada en el punto medio de la pieza), para los ángulos en estudio (45° , 85° , 135°), en los experimentos realizados con las herramientas $T1$ y $T2$ respectivamente.

**Figura 4.29.** Rugosidad Ra versus longitud de mecanizado para herramienta $T1$.

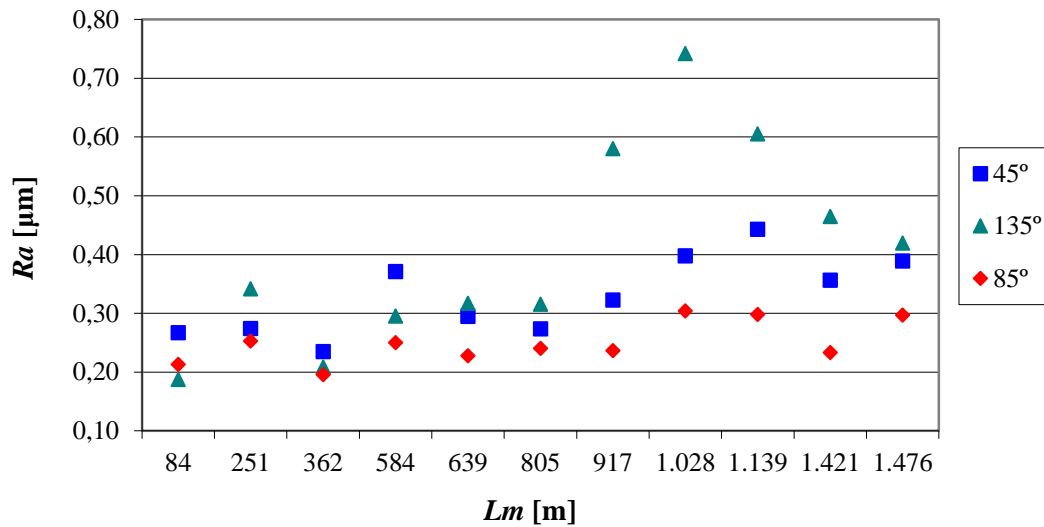


Figura 4.30. Rugosidad Ra versus longitud de mecanizado para herramienta $T2$.

Algunas particularidades que se aprecian en estas figuras, en relación a los valores máximos de rugosidad Ra obtenidos, son las siguientes:

- En la Figura 4.30, con la herramienta $T2$, se observa una mayor dispersión de los valores de rugosidad Ra respecto la herramienta $T1$, en los distintos ángulos de medición y en las diferentes longitudes de mecanizado, a partir de $Lm = 805$ m.
- En cambio, en la Figura 4.29, con la herramienta $T1$, los valores obtenidos de la rugosidad Ra fueron similares para los distintos ángulos de medición, en la mayoría de longitudes de mecanizado analizadas.
- Para la herramienta $T2$, la máxima rugosidad $Ra = 0,74 \mu\text{m}$ (valor máximo de toda la experimentación) se ha obtenido en el ángulo de 135° , para la longitud de mecanizado, $Lm = 1.028$ m. En cambio, para esta misma longitud y ángulo, en la herramienta $T1$, la rugosidad Ra fue de $0,24 \mu\text{m}$. Y la máxima rugosidad Ra fue de $0,38 \mu\text{m}$, para el ángulo de 45° , en la longitud de mecanizado de 363 m.

Como ejemplo, se comprobó la variabilidad de la medida del parámetro de rugosidad Ra para 2 longitudes de mecanizado (641 m y 1.477 m) de la herramienta $T1$, con la realización de 5 mediciones, sobre la misma pieza, en el mismo ángulo de medición a 45° . Se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 4.12.

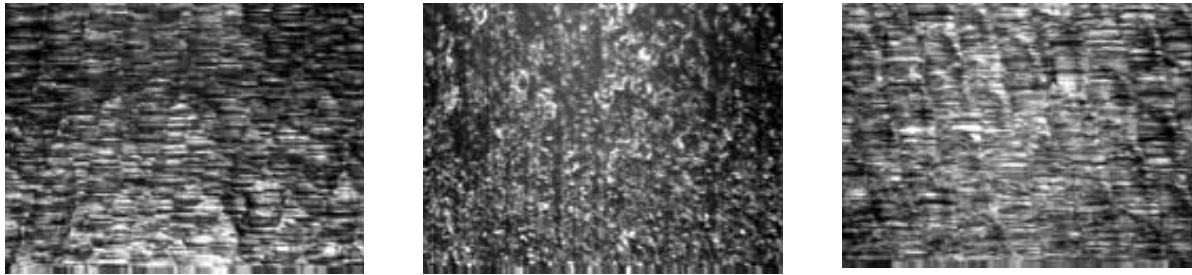
Tabla 4.12. Variabilidad de la medida de rugosidad para 2 longitudes de mecanizado, herramienta *TI*.

<i>Ra</i> [μm]	\bar{x}_m	s_m	<i>R</i>	$\varepsilon_T \cdot t$	$x_{\text{mín}} - x_{\text{máx}}$
<i>Lm</i> = 641 m	0,15	0,01	0,02	0,01	0,14-0,16
<i>Lm</i> = 1.477 m	0,28	0,01	0,03	0,02	0,26-0,30

En la Tabla 4.12 se muestran estos valores en los resultados finales, con los redondeos necesarios correspondientes. Al comparar estos valores con los resultados del desgaste mostrados en la Figura 4.25 se comprueba que para una longitud de mecanizado próxima a $Lm = 641$ m, el desgaste medio a los dos aristas de corte es de 0,033 mm, con una rugosidad media $Ra = 0,15 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$. Al realizar una $Lm = 1.477$ m, el desgaste medio se dobla ($VB = 0,068$ mm) y la rugosidad Ra también, con una dispersión mayor ($Ra = 0,28 \mu\text{m} \pm 0,02 \mu\text{m}$).

De la experimentación realizada se observa que la rugosidad Ra promedio para los distintos ángulos, para la herramienta *TI* (Figura 4.29) varía ligeramente en función de la longitud de mecanizado total experimentada. Por ejemplo, para $Lm = 140$ m, la rugosidad Ra promedio para los ángulos 45° , 85° , 135° es $Ra = 0,22 \mu\text{m}$. Para la longitud de mecanizado final, $Lm = 1.477$ m, se obtiene una rugosidad Ra promedio a todos los ángulos, $Ra = 0,24 \mu\text{m}$. Con el desgaste de la herramienta alcanzado y la longitud de mecanizado recorrida, la diferencia de rugosidad Ra promedio a los ángulos de medición no es importante, pues la dispersión es del orden de $\pm 0,02 \mu\text{m}$.

En la Figura 4.31 (ampliación 216X), se muestra el acabado superficial, así como los valores de la rugosidad Ra y RSm , para la longitud de mecanizado $Lm = 1.477$ m de la herramienta *TI*, para distintos ángulos: a 45° en Figura 4.31(a); a 85° en Figura 4.31(b); a 135° en Figura 4.31(c). Se observa el mayor valor de rugosidad Ra a 135° (la herramienta realiza la operación de copiado en trayectoria descendente) y el menor valor de rugosidad Ra a 85° , pero con un acabado y textura no homogéneo, a pesar de que el valor de rugosidad $RSm = 40 \mu\text{m}$, se acerca al valor esperado, alrededor de las $50 \mu\text{m}$.



(a) Ángulo de 45°,
 $Ra = 0,23 \mu\text{m}$, $RSm = 190 \mu\text{m}$

(b) Ángulo de 85°,
 $Ra = 0,19 \mu\text{m}$, $RSm = 40 \mu\text{m}$

(c) Ángulo de 135°,
 $Ra = 0,29 \mu\text{m}$, $RSm = 222 \mu\text{m}$

Figura 4.31. Acabado superficial para la longitud de mecanizado $Lm = 1.477$ m y distintos ángulos de medición.

4.2.3. Conclusiones.

Las conclusiones principales del estudio presentado con anterioridad, han sido las siguientes:

- A partir de una longitud de mecanizado de 940 m, el desgaste de la herramienta en la superficie de incidencia aumenta por encima de los 0,04 mm, en el ángulo de medición de 85° (estrategia de copiado en subida, en trayectoria ascendente). En este ángulo se ha obtenido la menor rugosidad, Ra promedio a toda la longitud de mecanizado, así como la menor desviación tipo y repetibilidad de la medida.
- A partir de dicha longitud de mecanizado, para una de las herramientas estudiadas, aumentó la rugosidad Ra obtenida, especialmente para el ángulo de 135°, cuando la herramienta realiza el copiado en bajada (trayectoria descendente), debido a los altos valores de rugosidad obtenidos en algunas de las longitudes de mecanizado analizadas. Según Schulz (Schultz 2004) con esta estrategia, se produce una mayor flexión de la herramienta, por lo que afecta claramente a la estabilidad del acabado superficial.
- Con la estrategia de copiado en subida, en trayectoria ascendente a 45° se obtiene una rugosidad, Ra intermedia entre los ángulos a 85° (trayectoria ascendente) y a 135° (trayectoria descendente).
- Se ha observado un elevado rendimiento de la herramienta con el nuevo recubrimiento para las condiciones de corte seleccionadas, pues con una longitud de mecanizado de 1.504 m, el desgaste de flanco, VB fue inferior a 0,10 mm.

4.3. Estudio de la operación de contorneado sobre aceros de moldes.

En este apartado se presentan distintos estudios para la operación de contorneado, con herramienta cilíndrica de punta plana, en distintas condiciones de experimentación, sobre aceros de moldes, para analizar la influencia de distintos parámetros de mecanizado en los valores de la rugosidad, Ra .

4.3.1. Materiales y métodos genéricos.

La operación de contorneado se programó directamente en el control numérico de la máquina, de tal forma que, en cada experimento la superficie correspondiente se mecanizó en la dirección del eje Y , igual a la dirección del avance lineal, F . En la Figura 4.32 se muestra una de las piezas donde se realizó la operación de contorneado con corte en concordancia y se indica la dirección de la lubricación (Ref), el sentido y dirección de la trayectoria de la herramienta, con un determinado avance lineal (F) y sentido de giro del husillo (S).

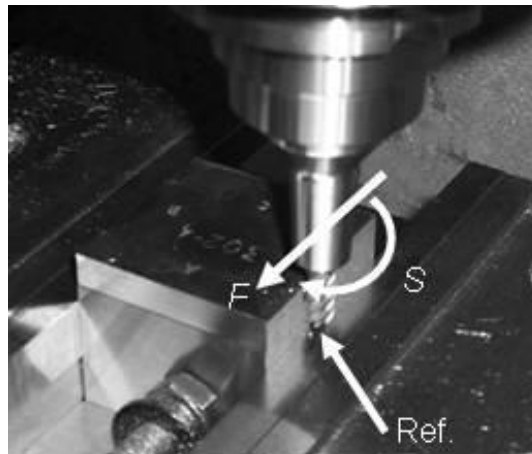


Figura 4.32. Operación de contorneado con corte en concordancia.

En los siguientes experimentos, salvo indicación contraria, el sistema de sujeción de la herramienta fue un portapinzas térmico preequilibrado del fabricante MST ref.: DN40AD SLK12-45 (Figura 4.32) y una pinza CR12-6-35 (de máximo espesor y mínimo voladizo). Para el sistema de sujeción de las piezas a mecanizar se utilizó una mordaza mecánica, de mayor precisión, serie estándar, con cuerpo de acero, del fabricante Gerardi, referencia Art.1-3 (Gerardi 2003).

Las herramientas de corte utilizadas en esta experimentación fueron fresas integrales de metal duro submicrograno del fabricante Mitsubishi (antes MMC Kobe o Shinko Kobelco), de la nueva serie IMPACT MIRACLE (Mitsubishi 2006), ref. VFSDD0600, con las siguientes características:

- Nanorecubrimiento con base (Al, Ti) N, con dureza 3.700 HV, fuerza de adhesión 100 N, resistencia térmica 1.300 °C y coeficiente de fricción 0,48.
- Geometría de punta plana de diámetro $D = 6$ mm, con 6 aristas de corte.
- Ángulo de desprendimiento negativo ($- 13^\circ$), ángulo de hélice 45° .
- Tolerancia en diámetro de corte entre 0 y - 0,02 mm.
- Longitud de corte: 12 mm; longitud total: 50 mm.
- Longitud de voladizo de herramienta: 15 mm.
- Longitud de amarre de la pieza: 30 mm.
- Sistema de lubricación/refrigeración: aire a presión. Sistema que variará según los experimentos en estudio.
- Estabilización inicial de la geometría de la herramienta, con mecanizado previo de 250 mm.
- Se verificó en todos los cambios de herramienta que la excentricidad fuera inferior a 0,005 mm.

En general, el material utilizado en los distintos experimentos fue el acero de moldes Böhler W302 (norma W. Nr. 1.2344) templado y revenido a 50-52 HRC. También se analizó la influencia de otros materiales en los valores de rugosidad Ra , que serán indicados en los correspondientes apartados.

En este estudio se definió una nueva pieza tipo 2, de geometría prismática, con dimensiones 50 mm x 50 mm x 40 mm (Figura 4.32). En cada pieza, se realizaron 8 experimentos al mecanizar 8 superficies de longitud 50 mm. Cuando se emplearon los dos métodos de corte, cuatro experimentos con corte en oposición, se realizaron en las cuatro superficies laterales (A, B, C, D), en contacto con la parte superior de la pieza (S) y cuatro experimentos más con corte en concordancia en las cuatro superficies laterales en contacto en la cara inferior de la pieza (I). Esta notación, así como el número de pieza quedó marcada en la pieza.

Para que el acabado superficial y dimensional previo de las piezas no afectara a los resultados de los experimentos, tras la obtención de las piezas y del correspondiente tratamiento térmico, se rectificaron todas las superficies a mecanizar de las piezas prismáticas. Se obtuvo un promedio de rugosidad $Ra = 0,24 \mu\text{m}$, con una desviación estándar de $0,06 \mu\text{m}$.

4.3.2. Influencia del sistema de lubricación sobre distintos aceros de moldes.

El objetivo de este estudio experimental fue el análisis de la influencia en la rugosidad superficial obtenida mediante el fresado en alta velocidad, al mecanizar distintos aceros de moldes (con diferentes composiciones y durezas), al utilizar distintos métodos de corte (en concordancia y en oposición), y al utilizar distintos sistemas de lubricación (aire a presión, microlubricación e inyección de aire frío). Todo ello se realizó en la operación básica de fresado, de contorneado, en la fase de acabado, de superficies planas de piezas prismáticas.

4.3.2.1. Materiales y Métodos

La identificación de los experimentos se realizó tal como se muestra en la Tabla 4.13, según una notación establecida y marcada en la pieza (Figura 4.32). Por ejemplo, el experimento AD, indica que se ha realizado el mecanizado sobre la superficie lateral A (en contacto con superficie Inferior), con lubricación Aire, con corte en concordancia (D: corte Descendente). Sólo se realiza una réplica de la experimentación cuando se utiliza aire como lubricante.

Tabla 4.13. Notación probetas según lubricación y método de corte.

Lubricación Estrategia	Aire (A)	Aire Frío (F)	Micro- lubricación (M)	Aire Réplica (A_R)	Superficie
Concordancia (D)	AD	FD	MD	ADR	I
Oposición (A)	AA	FA	MA	AAR	S
Sup. lateral	A	B	C	D	

Los datos principales de los sistemas de lubricación utilizados son los siguientes:

- Dispositivo *Vip4Tools* con una doble función: Sistema de inyección de aire a presión de 6 bar, a temperatura ambiente y sistema de microlubricación con un caudal de aceite de 0,06 ml/min (Figura 4.33). Aceite HCB 300 sin cloro, especialmente indicado para procesos de micropulverización.
- Dispositivo de inyección de aire frío *VORTEX AIR GUN 610* con temperatura de salida en boquilla de 0°C. (Figura 4.34)



Figura 4.33. Dispositivo de inyección de aire y microlubricación.



Figura 4.34. Dispositivo de inyección de aire frío. Fte.: (Celinfa 2006).

Los materiales experimentados se seleccionaron por ser los más representativos, como aceros de moldes, tras analizar la consulta realizada a diversos fabricantes de moldes, consultas a la empresa *Böhler* (fabricante de los aceros para moldes y matrices utilizados en la experimentación) y analizar las publicaciones expuestas en el estado del arte del capítulo 2.

En la Tabla 4.14 se presenta la relación de los materiales seleccionados, suministrados por *Böhler*, 3 aceros aleados y 5 aceros inoxidables con las durezas correspondientes a sus usos más habituales, obtenidos con los tratamientos térmicos de templeado y revenido adecuados a cada material y realizados por la empresa Tratamientos Térmicos Carreras.

Tabla 4.14. Relación de aceros para moldes seleccionados.

Norma UNE	Norma W. Nr.	Norma Böhler	Dureza ensayo
-	1.2738	M238	1.000 N/mm ² (32 HRC)
-	1.2085	M314 (Ac. INOX.)	1.000 N/mm ²
F-5318	1.2344	W302	52-54 HRC
	1.2343	W400	52-54 HRC
F-5263	1.2083	M310 (Ac. INOX.)	52-54 HRC
-	-	M333 (Ac. INOX.)	52-54 HRC
-	-	M340 (Ac. INOX.)	54-56 HRC
-	-	M390 (Ac. INOX.)	56-58 HRC

En la Tabla 4.15 pueden observarse las principales características de estos materiales con los porcentajes de elementos de la aleación. Información más detallada sobre las características y propiedades de cada uno de los materiales se obtiene del manual de aceros especiales *Böhler* (Böhler 2009).

Tabla 4.15. Características principales de los materiales de ensayo de los aceros *Böhler*. Fte.: (Böhler 2009).

Norma Böhler	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V	Densidad [kg/dm³]	Conduct. térmica [W/(m·K)]
M238	0,38	0,30	1,50	2,00	0,20	1,10	-	7,85	33
M314	0,34	0,35	1,40	16,00	0,15	0,65	-	7,65	18
W302	0,39	1,10	0,40	5,20	1,40	-	0,95	7,80	25
W400	0,36	0,20	0,25	5,00	1,30	-	0,45	7,80	25
M310	0,41	0,70	0,45	14,30	-	-	0,20	7,70	30
M333	0,28	0,30	0,30	13,50	-	-	-	7,70	30
M340	0,54	0,45	0,40	17,30	1,10	-	0,10	7,70	30
M390	1,90	0,70	0,30	20,00	1,00	-	4,00	7,60	14

Para esta experimentación se utilizaron las siguientes condiciones de corte iguales para el mecanizado de todos los materiales ensayados:

- Velocidad de corte, $V_c = 250$ m/min ($S = 13.270$ min⁻¹).
- avance por diente, $f_z = 0,04$ mm/diente ($F = 3.185$ mm/min).
- profundidad de corte axial $Ad = 8$ mm y profundidad de corte radial $Rd = 0,1$ mm.

Para cada método de corte se utilizó una herramienta nueva. La longitud de mecanizado total realizada por cada herramienta fue de 1.600 mm. Para toda la experimentación se utilizaron 8 herramientas. Se realizó un control de desgaste de la herramienta, a partir de la medición con microscopio del desgaste en las aristas de corte. Una vez realizada la experimentación para un método de corte y distintos materiales, se comprobó el desgaste máximo. Con corte en concordancia, el desgaste máximo fue $VB_{máx} = 0,017$ mm. Con corte en oposición, el desgaste de la herramienta se dobló para la misma longitud de mecanizado ($VB_{máx} = 0,028$ mm).

También se comprobó la excentricidad o el error de radio de las aristas de corte de las herramientas (*run-out*) utilizadas para cada una de las aristas de corte, a partir de comparadores con apreciación de 0,001 mm (Figura 4.35). La diferencia máxima en distancia radial, entre aristas de corte fue de 0,006 mm.



Figura 4.35. Medición de la excentricidad de la herramienta.

Las medidas de rugosidad se realizaron en 3 puntos de medición de la superficie lateral mecanizada correspondiente a cada uno de los experimentos: 3 puntos en la parte central de cada superficie, situados a distinta altura de la superficie mecanizada (Figura 4.36), en relación a la superficie superior ($p1$ a 2 mm, $p2$ a 4 mm y $p3$ a 6 mm). Además se añadieron 2 puntos adicionales de control ($p4$ y $p5$), a una distancia equidistante del punto $p2$ y a la misma altura.

Se obtuvieron datos de los diversos parámetros de rugosidad, pero sólo se evaluó el valor de la rugosidad media Ra de cada experimento, como promedio de los 3 valores Ra de las 3 medidas de rugosidad tomadas en la línea media de la correspondiente superficie mecanizada ($p4$, $p2$ y $p5$).

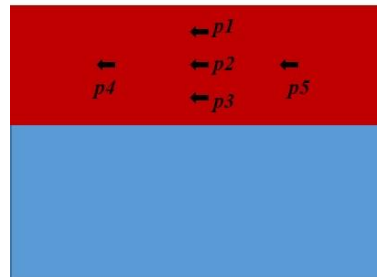


Figura 4.36. Puntos de medición de la rugosidad en la superficie mecanizada.

4.3.2.2. *Análisis de resultados inicial, con lubricación aire y material M333.*

En esta experimentación, en los primeros 250 mm de longitud de mecanizado, con corte en concordancia, se obtuvo un acabado superficial irregular con marcas inclinadas a unos 45° . En la Figura 4.37(a) y en la Figura 4.37(b) se muestran el acabado superficial obtenido sobre la probeta del material M333, tras realizar la herramienta una longitud de mecanizado de 200 mm, con aire como lubricante y corte en concordancia.

Con la herramienta nueva sin estabilizar, la geometría de la herramienta se replica claramente en la superficie mecanizada. En la Figura 4.37(a) se observan unas marcas, o líneas más oscuras a unos 45° que coinciden con el ángulo de hélice de la herramienta y cuya distancia entre ellas refleja el avance por revolución programado (avance por diente multiplicado por el número de dientes de la herramienta) igual a unos 0,24 mm. Mecanizan las 6 aristas de corte, pero debido a la excentricidad o error de radio de las aristas de corte, siempre existe una arista de mayor radio que deja estas rayas características. En la figura ampliada, Figura 4.37(b), entre las líneas oscuras, también se aprecia otro rayado característico. La distancia aproximada entre estas rayas refleja el avance por diente programado, f_z igual a 0,04 mm/diente.

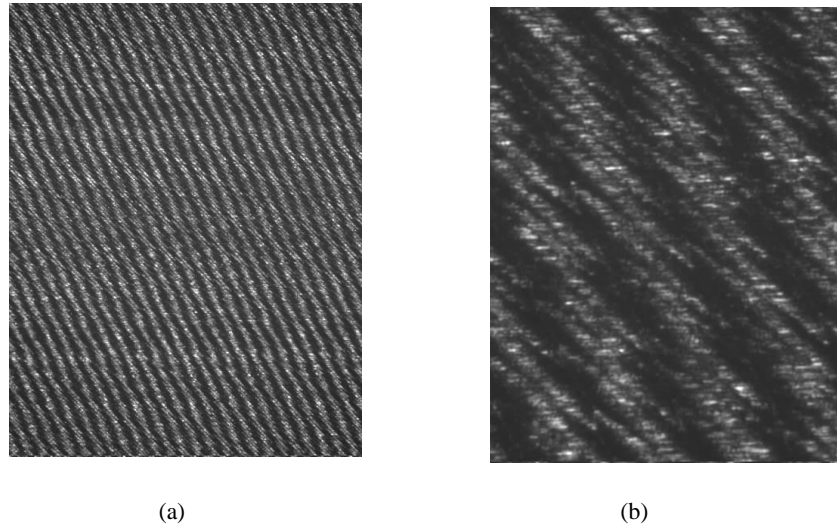


Figura 4.37. Acabado superficial en la probeta M333 a $Lm = 200$ mm.
Ampliación: (a) 36X y (b) 216X.

En la Figura 4.38(a) y Figura 4.38(b) se muestra el acabado superficial del experimento, con una longitud de mecanizado de 1.400 mm, al aplicar de nuevo, aire como lubricante. Una vez estabilizada la herramienta, al sufrir el desgaste inicial después de una cierta longitud mecanizada, desaparecen las marcas inclinadas y sólo quedan como marcas dominantes las líneas verticales (la dirección horizontal, es la dirección del avance lineal), cuya distancia entre ellas reflejan el avance por revolución de la herramienta. En este caso, el valor de la rugosidad Ra decrece.

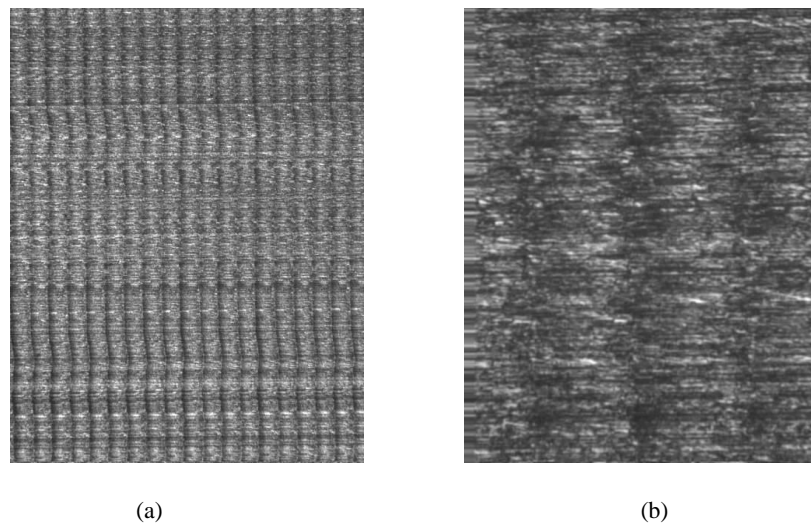


Figura 4.38. Acabado superficial en la probeta M333, con herramienta estabilizada a a $Lm = 1.400$ mm.
Ampliación: (a) 36X y (b) 216X.

Los perfiles de rugosidad que corresponden a los acabados superficiales mostrados en la Figura 4.37 y en la Figura 4.38, se muestran en la Figura 4.39 y la Figura 4.40, respectivamente. En la Figura 4.39 el acabado superficial presenta unos valores de rugosidad $Ra = 0,92 \mu\text{m}$, $RSm = 181 \mu\text{m}$. En la Figura 4.40, el acabado superficial presenta unos valores de rugosidad $Ra = 0,46 \mu\text{m}$, $RSm = 234 \mu\text{m}$.

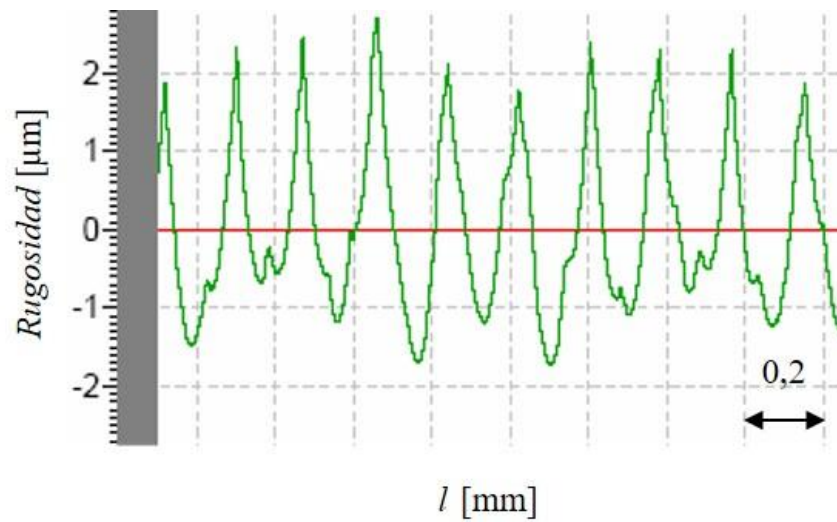


Figura 4.39. Perfil de rugosidad a $Lm = 200 \text{ mm}$ en probeta M333.

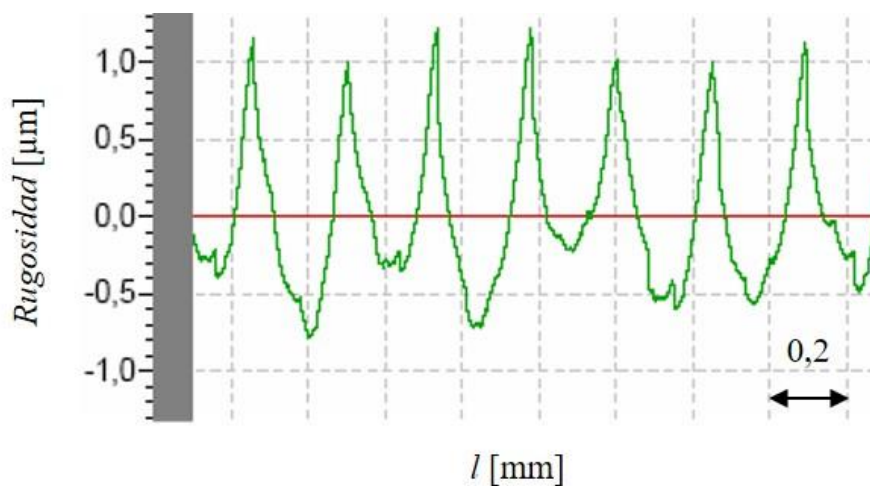


Figura 4.40. Perfil de rugosidad a $Lm = 1.400 \text{ mm}$ en probeta M333.

4.3.2.3. Análisis de resultados para distintos sistemas de lubricación y material W302.

La diferencia importante entre los primeros experimentos realizados con aire y su réplica realizada después de haber utilizado el resto de sistemas de lubricación, se muestra también en la Tabla 4.16 y

en la Figura 4.41, donde se puede observar el valor de la rugosidad Ra (valor máximo, mínimo y valor medio) obtenida sobre el acero Böhler W302, para los distintos sistemas de lubricación, con corte en concordancia.

Existe un solapamiento entre los intervalos de rugosidad Ra obtenidos, para la lubricación con aire frío, microlubricación y aire réplica. El mayor error de repetibilidad se obtuvo con aire frío (0,18 μm) y microlubricación (0,17 μm). El menor error de repetibilidad se obtuvo en el experimento inicial, con aire (0,06 μm), pero con un valor medio de rugosidad muy superior ($Ra = 0,92 \mu\text{m}$), al valor de la rugosidad obtenido en la réplica con aire del experimento ($Ra = 0,36 \mu\text{m}$).

Tabla 4.16. Rugosidad Ra , en función de los sistemas de lubricación. Acero W302, corte en concordancia.

Lubricación	Aire (A)	Aire Frío (F)	Micro-lubricación (M)	Aire Réplica (A_R)
<i>Ram</i> _{máx} [μm]	0,95	0,48	0,47	0,41
<i>Ram</i> _{mín} [μm]	0,89	0,30	0,30	0,32
<i>Ram</i> _{med} [μm]	0,92	0,41	0,37	0,36
<i>Repetibilidad</i> [μm]	0,06	0,18	0,17	0,09

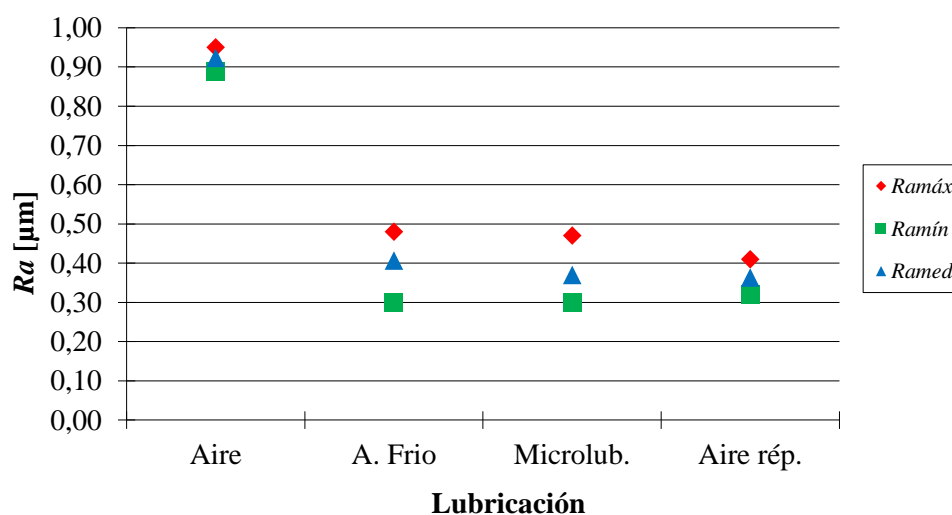


Figura 4.41. Rugosidad Ra , en función de los sistemas de lubricación. Acero W302, corte en concordancia.

En principio, la diferencia apreciable entre el valor de Ra obtenido por la experimentación inicial con aire y para su correspondiente réplica, es debido a que en la prueba inicial con aire, la herramienta no

estaba estabilizada (debido a la tolerancia del diámetro de corte) y en su réplica, sí. En este caso, se ha observado que con una herramienta nueva, es necesario mecanizar una longitud de unos 250 mm para su estabilización, es decir, para la obtención de un filo de corte uniforme, a lo largo de toda la arista. Este es un punto importante a considerar en el mecanizado de acabado de precisión.

En general, con el mecanizado en oposición se obtiene una rugosidad Ra menor, para una longitud de mecanizado corta, pero aparece adhesión de viruta en pieza y herramienta a partir de cierta longitud de mecanizado. El fabricante de herramientas en su información técnica (Mitsubishi 2006) recomienda siempre el fresado en concordancia para este tipo de operación y materiales a mecanizar.

4.3.2.4. Análisis de resultados con distintos materiales y lubricación aire.

La Figura 4.42 muestra los valores de rugosidad Ra , (valor máximo, mínimo y valor medio) de los distintos materiales ensayados, para el caso de la lubricación con aire réplica, con método de corte en concordancia.

Los valores de rugosidad se solapan para los distintos materiales, con el menor error de repetibilidad obtenido para el material W400, acero templado a 52 HRC ($0,03 \mu\text{m}$) y el mayor error de repetibilidad para el material M314, acero inoxidable no templado ($0,20 \mu\text{m}$).

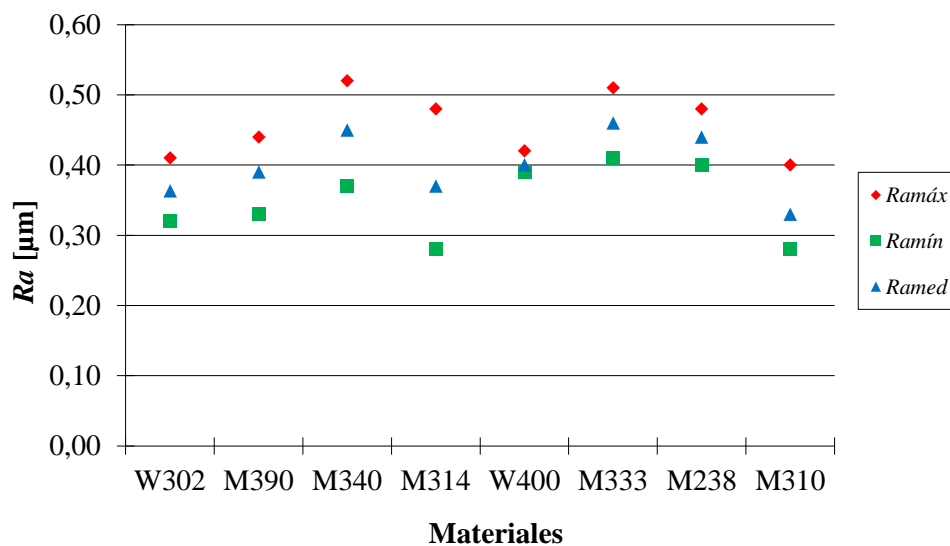


Figura 4.42. Rugosidad Ra , de los diversos materiales, con lubricación aire réplica, corte en concordancia.

En el mecanizado en concordancia, la falta de estabilización de la herramienta influye en el valor de la rugosidad Ra , tal como se apreciaba en la Figura 4.41, al comparar los resultados con el experimento inicial donde se utiliza aire y el resto de experimentos con otros sistemas de lubricación.

4.3.2.5. Análisis de resultados con distintos materiales y sistemas de lubricación.

En la Figura 4.43, se elimina este primer experimento con aire y se compara el resultado de la rugosidad media Ra obtenida entre los distintos materiales y sistemas de lubricación, con el corte en concordancia.

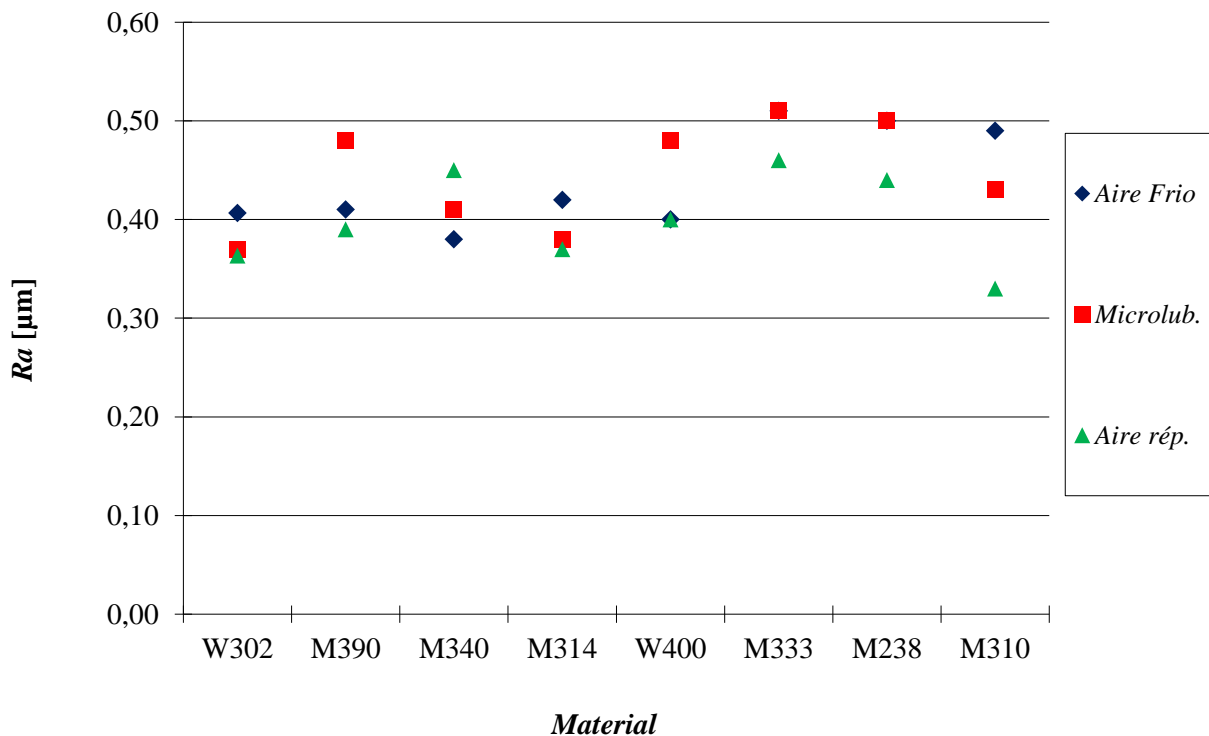


Figura 4.43. Rugosidad Ra , en corte en concordancia, para los diversos materiales y sistemas de lubricación.

A nivel de cada material existen pequeñas diferencias en la rugosidad obtenida con los distintos sistemas de lubricación ensayados. El máximo valor de rugosidad se obtiene en el material M333 con aire frío y microlubricación ($Ra = 0,51 \mu\text{m}$). El mínimo valor de rugosidad se obtiene en el material M310 con aire réplica ($Ra = 0,33 \mu\text{m}$).

Cabe destacar en este punto que respecto al método de corte en concordancia, con el método de corte en oposición se produce un mayor rozamiento inicial entre pieza y herramienta y por lo tanto una mayor temperatura de proceso. En los aceros inoxidables, con menor conductividad térmica, el mayor porcentaje de calor generado es conducido hacia la herramienta. Al utilizar el sistema de lubricación, con aire frío, se reduce la temperatura del proceso.

En el mecanizado en oposición, los resultados han sido más dispares (Figura 4.44), aunque en promedio, los valores máximos y mínimos de rugosidad Ra , son menores respecto a los valores obtenidos con corte en concordancia.

A nivel de cada material existen pequeñas diferencias en la rugosidad obtenida con los distintos sistemas de lubricación ensayados. El máximo valor de rugosidad se obtiene en el material M310 con aire réplica ($Ra = 0,39 \mu\text{m}$). El mínimo valor de rugosidad se obtiene en el material W302 con microlubricación ($Ra = 0,19 \mu\text{m}$).

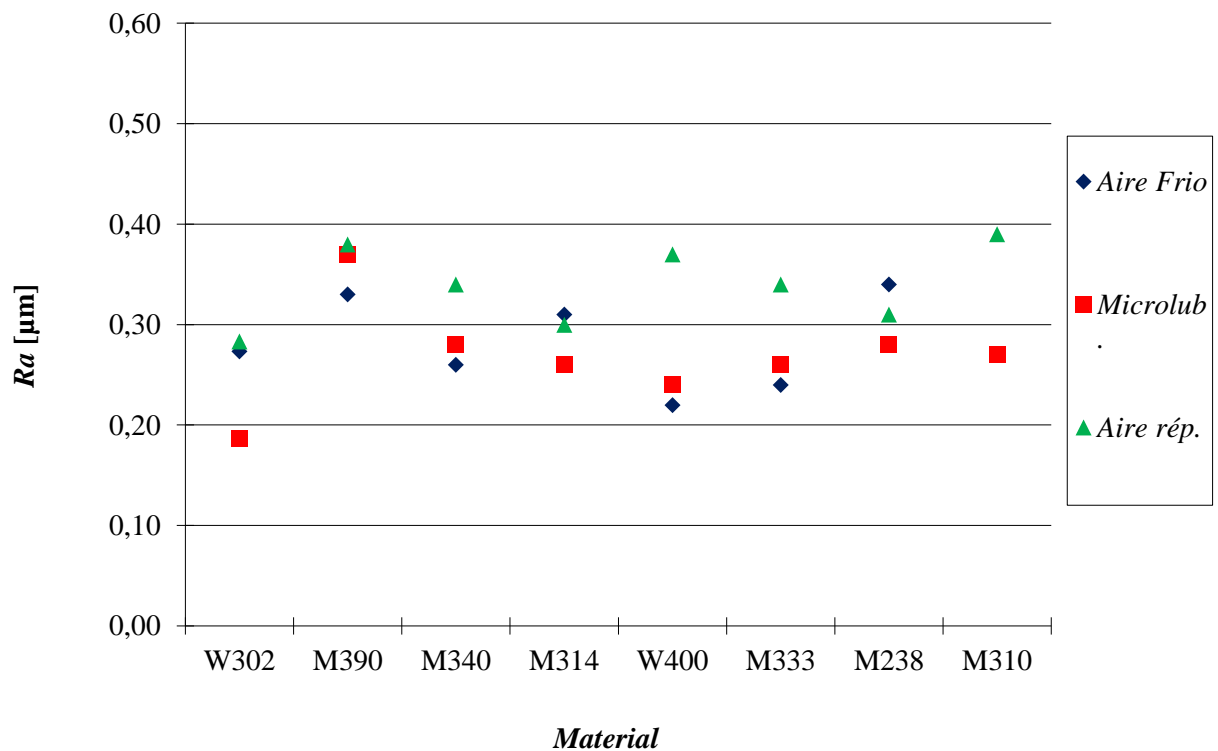


Figura 4.44. Rugosidad Ra , en corte en oposición, para los diversos materiales y sistemas de lubricación.

4.3.2.6. Conclusiones

Con el análisis de resultados presentado anteriormente se establecen las siguientes conclusiones de la experimentación realizada:

- En corte en concordancia existe un solapamiento claro de todos los intervalos de rugosidad en los distintos sistemas de lubricación. Se obtienen los valores de rugosidad mayores con microlubricación y los valores de rugosidad menores con aire.
- En corte en oposición existe un solapamiento ligero entre los intervalos de rugosidad en los distintos sistemas de lubricación. Se obtienen los valores de rugosidad mayores con aire (similar a los valores obtenidos con microlubricación, en concordancia) y los valores de rugosidad menores con aire frío.
- Se han obtenido valores mínimos de la rugosidad con corte en oposición y con aire frío. En estas condiciones, el valor mínimo se obtuvo con el acero W400, $Ra = 0,22 \mu\text{m}$.
- Se han obtenido valores máximos de la rugosidad con corte en concordancia y con microlubricación. En estas condiciones, el valor máximo se obtuvo con el acero M333, $Ra = 0,51 \mu\text{m}$.
- El acero inoxidable M333 obtuvo los valores mayores de rugosidad Ra , para todos los sistemas de lubricación y con corte en concordancia, con un valor medio de $Ra = 0,49 \mu\text{m}$. En cambio con corte en oposición se obtuvo una rugosidad media para todos los sistemas de lubricación, $Ra = 0,28 \mu\text{m}$.
- El acero W302 obtuvo los valores menores de rugosidad Ra , para todos los sistemas de lubricación, con corte en oposición, con un valor medio de $Ra = 0,25 \mu\text{m}$. En cambio con corte en concordancia se obtuvo una rugosidad media para todos los sistemas de lubricación, $Ra = 0,38 \mu\text{m}$.

4.3.3. Influencia del desgaste de herramienta sobre la rugosidad.

El objetivo de este experimento fue obtener la relación entre desgaste de herramienta y la rugosidad Ra obtenida, mediante los dos métodos de corte (concordancia y oposición), en la operación de contorneado.

4.3.3.1. Materiales y Métodos.

Las condiciones de corte establecidas para esta experimentación en concreto fueron las siguientes:

- $V_c = 300$ m/min, $f_z = 0,1$ mm/diente ($S = 15.916$ min⁻¹, $F = 9.550$ mm/min),
- Profundidades de corte: $Ad = 8$ mm, $Rd = 0,2$ mm,
- Longitud voladizo herramienta, $L_v = 15$ mm,
- Lubricación: aire a presión,
- Material de trabajo: Acero Böhrler W302 (W. Nr. 1.2344) templado y revenido a 52 HRC.
- Portapinzas mecánico MST ref. DN40AD-CTH20-75.

Las fotografías y medición de desgaste se tomaron con el microscopio Mitutoyo Quickvision sobre la cara de incidencia en la arista de corte de mayor diámetro, a profundidad de corte axial $Ad = 4$ mm. En la Figura 4.45 se muestra la herramienta nueva en dos vistas de una de las aristas de corte, la vista frontal y la vista de la superficie de incidencia.

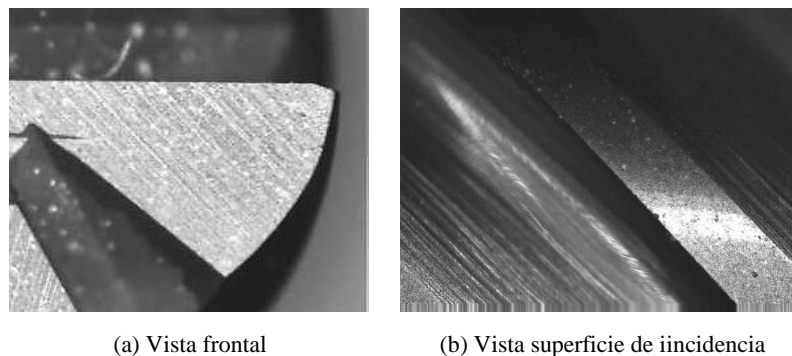


Figura 4.45. Herramienta nueva para estudio desgaste.

Ampliación: (a) y (b) 72X.

También se realizó un control de la medición de desgaste de la herramienta y rugosidad a distintas longitudes de mecanizado (1, 2, 4, 8, 12, 16 m). La medición de rugosidad se realizó sobre las 3 medidas equidistantes a profundidad de corte axial, Ad de 2, 4 y 6 mm, en el punto medio de la superficie mecanizada (puntos $p1$, $p2$, $p3$ de la Figura 4.36). En el control de la excentricidad en el extremo de la herramienta se obtuvo una diferencia máxima entre labios de 0,005 mm.

En la Figura 4.46 puede observarse las longitudes mínimas de amarre de pieza y de voladizo de la herramienta en una de las paradas de la máquina para el control de rugosidad y desgaste de la herramienta.

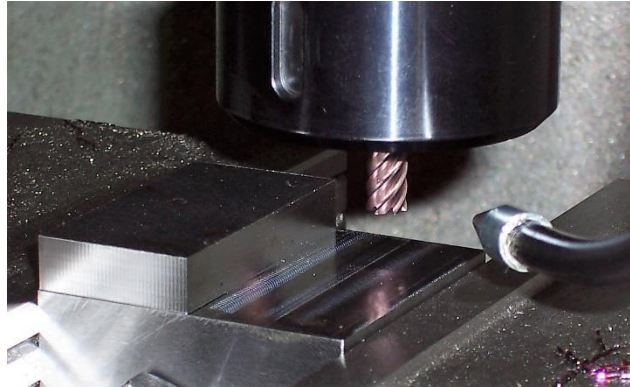


Figura 4.46. Parada de la máquina tras realizar el ensayo.

4.3.3.2. Análisis de resultados.

En la Tabla 4.17 y en la Figura 4.47 se presentan los resultados medios a los 3 puntos analizados, de las medidas de la rugosidad Ra para las distintas longitudes de mecanizado (1, 2, 4, 8, 12, 16 m) y para los dos métodos de corte (en concordancia y en oposición).

Tabla 4.17. Rugosidad Ra versus método de corte y longitud de mecanizado.

Ra [μm]	Longitud de mecanizado [m]					
Método	1	2	4	8	12	16
<i>Concordancia</i>	0,59	0,55	0,52	0,45	0,49	0,34
<i>Oposición</i>	0,61	0,62	0,60	0,71	0,59	0,61

Con estos resultados, con el corte en concordancia se aprecia una menor rugosidad Ra , en todos los puntos de control medidos a distintas longitudes de mecanizado.

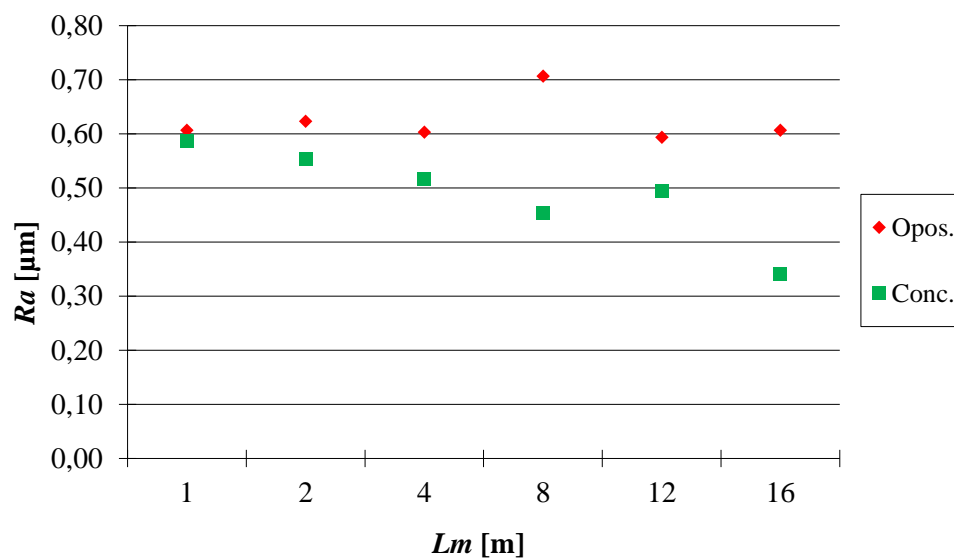


Figura 4.47. Rugosidad Ra versus método de corte y longitud de mecanizado Lm .

En la Tabla 4.18 se presenta la variabilidad de la rugosidad Ra , a partir de los 6 puntos analizados a distintas longitudes de mecanizado.

Tabla 4.18. Rugosidad Ra versus método de corte.

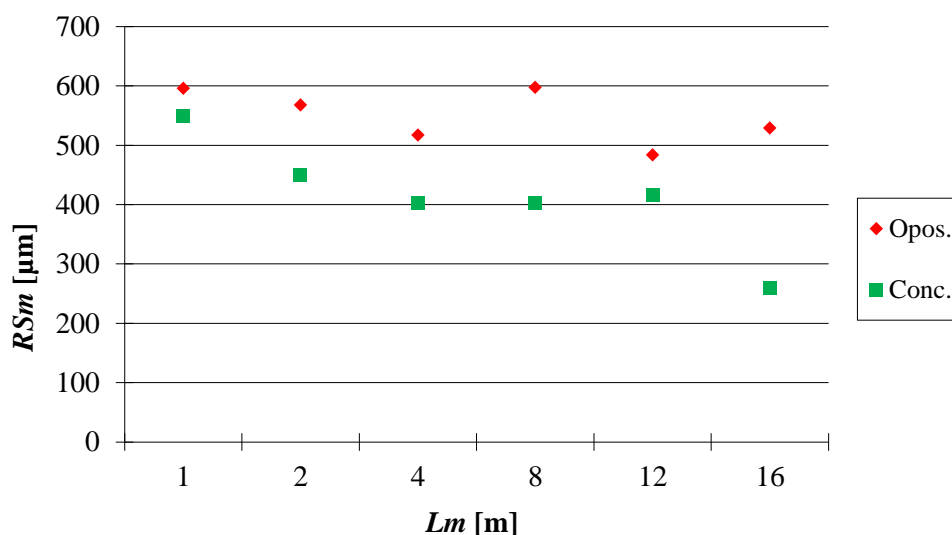
Método	Ra [μm]		
	\bar{x}_m	s_m	R
<i>Concordancia</i>	0,49	0,09	0,25
<i>Oposición</i>	0,62	0,04	0,11

Hasta la longitud mecanizada, el corte en concordancia ofrece una menor rugosidad, Ra , aunque su variabilidad (desviación tipo y error de repetibilidad) sea mayor, para el valor medio de todas las longitudes de mecanizado analizadas, tal como se ha mostrado en la Tabla 4.18.

En la Tabla 4.19 y en la Figura 4.48 se presentan los resultados medios a los 3 puntos analizados, de las medidas de la rugosidad RSm para las distintas longitudes de mecanizado (1, 2, 4, 8, 12, 16 m) y para los dos métodos de corte.

Tabla 4.19. Rugosidad RSm versus método de corte y longitud de mecanizado.

RSm [μm]	Longitud de mecanizado [m]					
Método	1	2	4	8	12	16
<i>Concordancia</i>	549	450	403	403	416	260
<i>Oposición</i>	596	509	585	601	600	571

**Figura 4.48.** Rugosidad RSm versus método de corte y longitud de mecanizado Lm .

Hasta la longitud mecanizada, el corte en concordancia ofrece una menor rugosidad, RSm , aunque su variabilidad (desviación tipo y error de repetibilidad) sea mayor, para el valor medio de todas las longitudes de mecanizado analizadas, tal como se muestra en la Tabla 4.20. En este caso, el corte en oposición ofrece unos valores más próximos al valor esperado igual a $600 \mu\text{m}$ (avance por revolución programado).

Tabla 4.20. Rugosidad RSm versus método de corte.

Método	RSm [μm]		
	\bar{x}_m	s_m	R
<i>Concordancia</i>	414	93	289
<i>Oposición</i>	548	46	114

Para ambos métodos de corte, el desgaste en superficie de incidencia es difícil de evaluar y medir en las distintas longitudes de mecanizado. Por debajo de la longitud de mecanizado de 12 m el desgaste no es apreciable, inferior a 0,01 mm, sólo se observan franjas más brillantes en la arista de corte.

A una longitud de mecanizado $L_m = 16$ m, la herramienta presenta un desgaste máximo en la superficie de incidencia, $VB_{máx} = 0,015$ mm. En la Figura 4.49, se muestra la herramienta tras 16 m. de mecanizado, en distintas vistas: Figura 4.49(a) vista superficie frontal; Figura 4.49(b) vista de la superficie de incidencia.

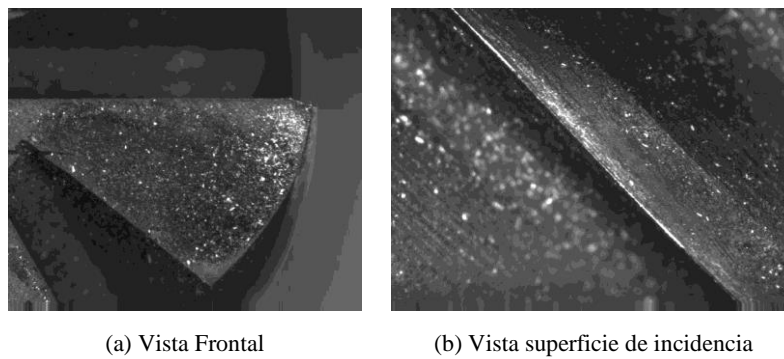


Figura 4.49. Desgaste herramienta 1. Corte en concordancia tras 16 m de mecanizado.

Ampliación: (a) y (b) 72X

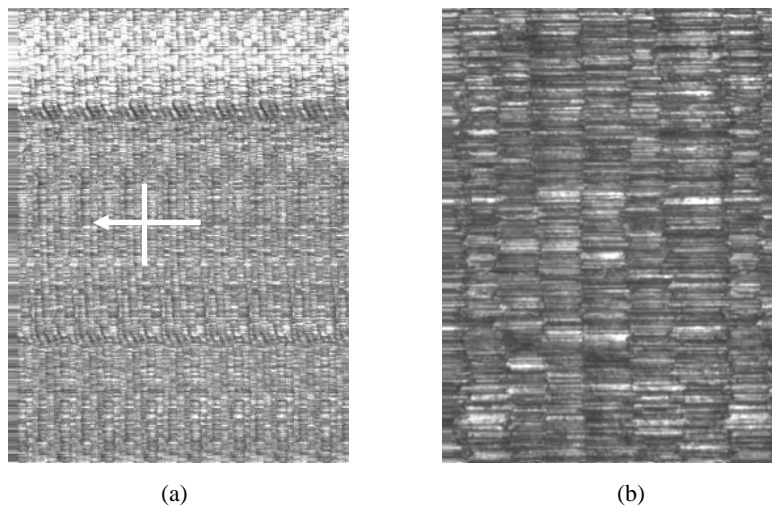


Figura 4.50. Fotografías de la superficie mecanizada tras 16 m de mecanizado. Corte en concordancia.

Ampliación: (a) 36X (b) 216X

En la Figura 4.50 se muestran distintas ampliaciones de la superficie mecanizada en el punto medio, tras 16 m de longitud de mecanizado mediante el corte en concordancia. La flecha en la Figura 4.50(a)

indica la dirección y sentido de avance lineal de la herramienta y la dirección y sentido de medición de la rugosidad, en el punto de medición central de la superficie mecanizada (punto $p2$).

Como complemento a la Figura 4.50, en la Figura 4.51 se muestra el perfil de rugosidad obtenido a $Lm = 16$ m, del punto $p2$, con corte en concordancia. Los valores de rugosidad fueron: $Ra = 0,31 \mu\text{m}$, $RSm = 250 \mu\text{m}$.

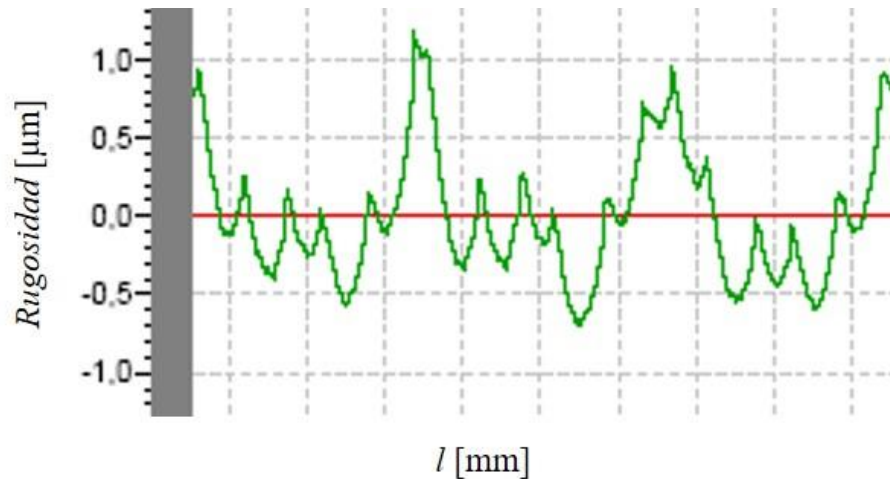
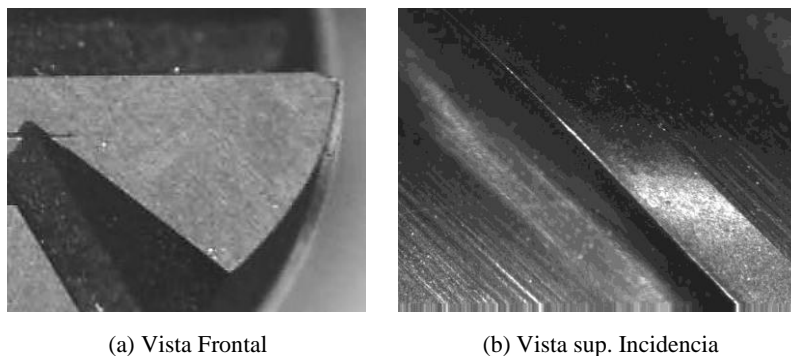


Figura 4.51. Perfil de rugosidad, $Lm = 16$ m, punto $p2$, corte en concordancia.

En la Figura 4.52 se muestra en distintas vistas la herramienta usada con el corte en oposición, tras 16 m. de mecanizado: Figura 4.52(a) vista superficie frontal; Figura 4.52(b) vista de la superficie de incidencia. La herramienta presenta un desgaste máximo en la superficie de incidencia, $VB_{\text{máx}} = 0,015$ mm, similar al desgaste obtenido con corte en concordancia.



(a) Vista Frontal

(b) Vista sup. Incidencia

Figura 4.52. Desgaste herramienta 6. Corte en oposición tras 16 m de mecanizado.

Ampliación: (a) y (b) 72X.

En la Figura 4.53 se muestran distintas ampliaciones de la superficie mecanizada en el punto medio, tras 16 m de longitud de mecanizado mediante el corte en oposición. Si se compara la Figura 4.50(b) con la Figura 4.53(b), se observa una superficie más heterogénea con el corte en oposición.

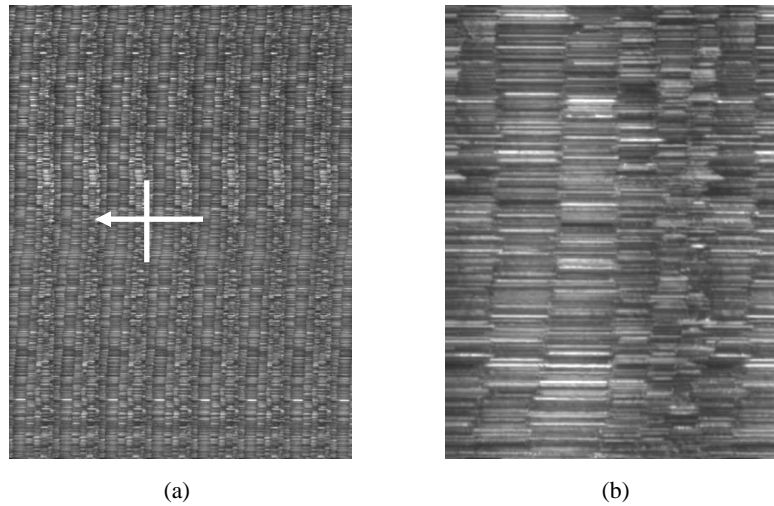


Figura 4.53. Fotografías de la superficie mecanizada tras 16 m de mecanizado. Corte en oposición.
Ampliación: (a) 36X (b) 216X

Como complemento a la Figura 4.53, en la Figura 4.54 se muestra el perfil de rugosidad obtenido a $L_m = 16$ m, del punto p_2 , pero con corte en oposición. En este caso concreto, los parámetros de rugosidad medidos ($R_a = 0,60 \mu\text{m}$, $R_{Sm} = 571 \mu\text{m}$) prácticamente se doblan respecto al corte en concordancia. Los picos presentes en los perfiles de rugosidad corresponden a las marcas de las distintas aristas de corte de la herramienta.

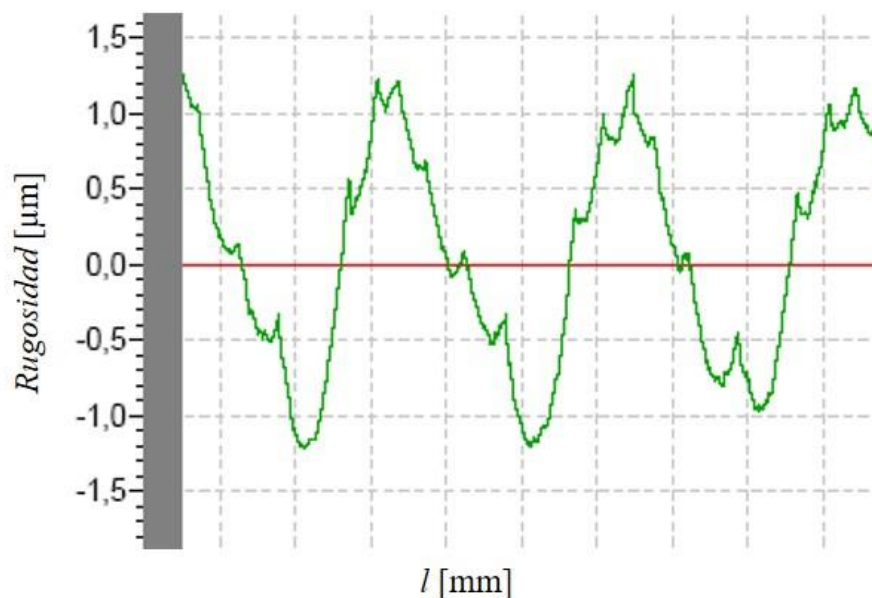


Figura 4.54. Perfil de rugosidad, $L_m = 16$ m, punto p_2 , corte en oposición.

4.3.3.3. Conclusiones.

Por los resultados presentados anteriormente pueden establecerse las siguientes conclusiones:

- La rugosidad Ra es inferior con el método de corte en concordancia en relación al corte en oposición para las distintas longitudes de mecanizado, con la mayor diferencia en el último tramo estudiado a $Lm = 16$ m.
- A esta longitud de mecanizado, el desgaste en la cara de incidencia de la herramienta para ambos métodos de corte fue muy pequeño, sólo apreciable visualmente por un mayor brillo en la arista de corte. Para el corte en concordancia el desgaste máximo fue de $VB = 0,015$ mm.
- En cambio, con el método de corte en oposición el comportamiento del valor de la rugosidad RSm para las distintas longitudes de mecanizado, fue más homogéneo y más próximo al avance por revolución igual a $600 \mu\text{m}$.

4.3.4. Influencia del voladizo de herramienta y tipo de portapinzas.

Otros factores de influencia de la rugosidad superficial son: el voladizo de la herramienta de corte y el tipo de portapinzas para la fijación al husillo de la máquina. En este estudio se experimentó con dos tipos de portapinzas y dos longitudes de voladizo, con el mismo material de trabajo.

4.3.4.1. Materiales y métodos

En esta experimentación se realizó la comparación de dos longitudes de voladizo de herramienta, L_v (15 mm y 30 mm), con el uso de 2 portapinzas con distinto sistema de fijación (mecánico y térmico).

Las condiciones de corte establecidas para este ensayo fueron las siguientes:

- $V_c = 300$ m/min, $f_z = 0,04$ mm/diente ($S = 15.916$ min⁻¹, $F = 3.819$ mm/min).
- Profundidades de corte: $Ad = 8$ mm, $Rd = 0,1$ mm.
- Método de corte: en concordancia.
- Lubricación: aire a presión.

- Herramienta de corte: Mitsubishi VFSD D6 mm, estabilizada a una longitud de 250 mm.
- Material de trabajo: Acero Böhler W302 (W. Nr. 1.2344) a 52 HRC.

Las medidas de rugosidad se realizaron en los 3 puntos de medición ($p1$, $p2$ y $p3$) que se mostraban en la Figura 4.36, en dos superficies mecanizadas, por variable a analizar.

Primero se utilizó el portapinzas mecánico, con conocimiento de antemano, que cuando el voladizo de herramienta fuese de 30 mm el apriete efectivo sería de 20 mm (debido a la longitud total de la herramienta de 50 mm). Con el portapinzas mecánico utilizado, la longitud mínima de apriete debería ser 35 mm, según información del fabricante del sistema de fijación (MST 2004a). Si no se cumple la longitud de apriete recomendada existe una falta de rigidez en el sistema de sujeción de la herramienta que repercutirá en el rendimiento de la herramienta en cuanto a rugosidad en la pieza y vida de la herramienta de corte. El experimento se repitió con el uso del portapinzas térmico que permite una longitud de apriete mínima de 18 mm.

4.3.4.2. Análisis de resultados.

En primer lugar se comprobó la excentricidad de las aristas de corte de la herramienta para las distintas condiciones de la experimentación. Se obtuvieron unos valores mayores de excentricidad con el portapinzas mecánico para ambas longitudes de voladizo (Tabla 4.21). En el portapinzas térmico la excentricidad de la herramienta es menor. El fabricante de los portapinzas MST para una longitud de voladizo máxima de la herramienta de 4 veces su diámetro de corte garantiza una excentricidad máxima de $5 \mu\text{m}$ (MST 2004a). Para la longitud de voladizo, $L_v = 30 \text{ mm}$, este ratio implica 5 veces su diámetro de corte, $D = 6 \text{ mm}$.

Tabla 4.21. Excentricidad de la herramienta con diferente portapinzas y longitud de voladizo L_v .

Excentricidad [μm]	L_v [mm]	
	15	30
<i>Portapinzas mecánico</i>	3	5,5
<i>Portapinzas térmico</i>	2,5	4,5

Los resultados del experimento con el portapinzas mecánico se muestran en la Tabla 4.22. Con el doble de voladizo de herramienta, igual a $L_v = 30 \text{ mm}$, lo que representa un ratio $L_v/D = 5$, se obtuvo una rugosidad R_a , casi 7 veces mayor respecto a la rugosidad obtenida a $L_v = 15 \text{ mm}$. También la

rugosidad RSm a mayor voladizo se aleja del valor esperado (próximo a $240 \mu\text{m}$), en función del avance por revolución considerado ($0,24 \text{ mm/rev}$).

Tabla 4.22. Influencia de L_v , en la rugosidad, con portapinzas mecánico.

	L_v [mm]			
	15		30	
Rugosidad	\bar{x}_m	s_m	\bar{x}_m	s_m
Ra [μm]	0,48	0,02	3,27	0,80
RSm [μm]	234	2	328	6

En la Figura 4.55 se muestra el acabado superficial obtenido, con un voladizo de 30 mm. Aparecen unas marcas de vibración o líneas a 45° que coinciden con el ángulo de hélice de la herramienta y cuya distancia entre ellas refleja el avance por revolución considerado, tal como se aprecia en la Figura 4.55(a). En la imagen ampliada de la Figura 4.55(b), se aprecia también un rayado intercalado entre las líneas anteriores que reflejan el avance por diente programado de la herramienta de corte.

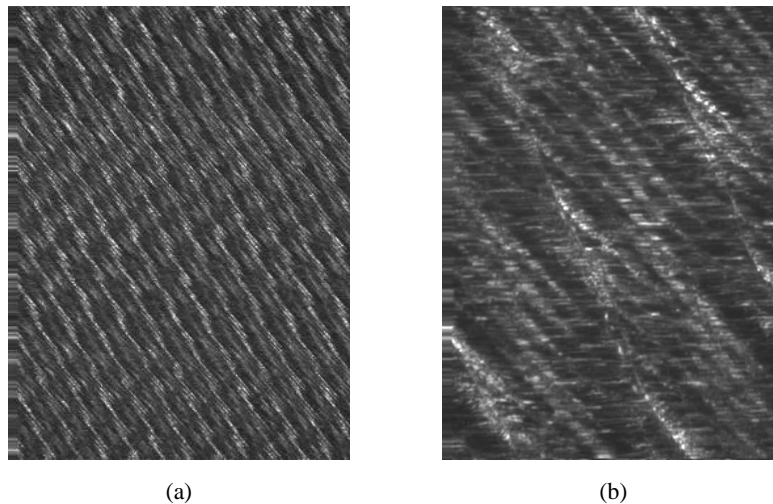


Figura 4.55. Fotografías ampliadas de la superficie con $L_v = 30 \text{ mm}$. Portapinzas mecánico.

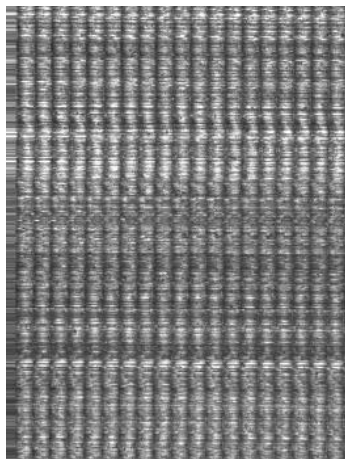
Ampliación: (a) 36X y (b) 216X.

Los resultados de los experimentos con el portapinzas térmico se muestran en la Tabla 4.23 y en la Figura 4.56. En este caso, con el doble de voladizo de herramienta, $L_v = 30 \text{ mm}$, se redujo a la mitad la rugosidad Ra , obtenida respecto al portapinzas mecánico. Con $L_v = 30 \text{ mm}$, se obtuvo una rugosidad Ra , superior a 6 veces, respecto a la rugosidad obtenida con la mitad del voladizo, a $L_v = 15 \text{ mm}$.

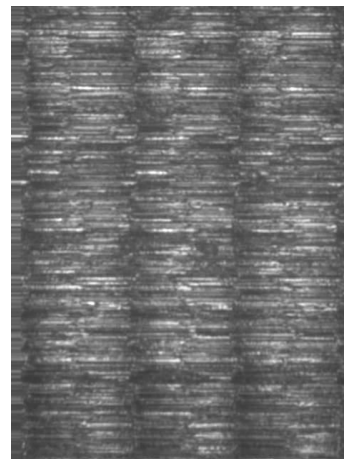
La rugosidad RSm , también a mayor voladizo, se aleja del valor óptimo aproximado de $240 \mu\text{m}$, que corresponde al avance por revolución ($0,24 \text{ mm/rev}$), con una reducción de la anchura promedio del perfil de rugosidad.

Tabla 4.23. Influencia de L_v , en la rugosidad, con portapinzas térmico.

	L_v [mm]			
	15		30	
Rugosidad	\bar{x}_m	s_m	\bar{x}_m	s_m
Ra [μm]	0,27	0,03	1,62	0,23
RSm [μm]	226	4	198	4



(a)



(b)

Figura 4.56. Fotografías ampliadas de la superficie con $L_v = 15 \text{ mm}$. Portapinzas térmico.

Ampliación: (a) 36X y (b) 216X.

Los resultados comparativos respecto a la longitud de voladizo (15 y 30 mm) y tipo de portapinzas (mecánico y térmico) se muestran en la Figura 4.57. En esta figura quedan en evidencia los mejores resultados obtenidos con el portapinzas térmico, para la experimentación realizada.

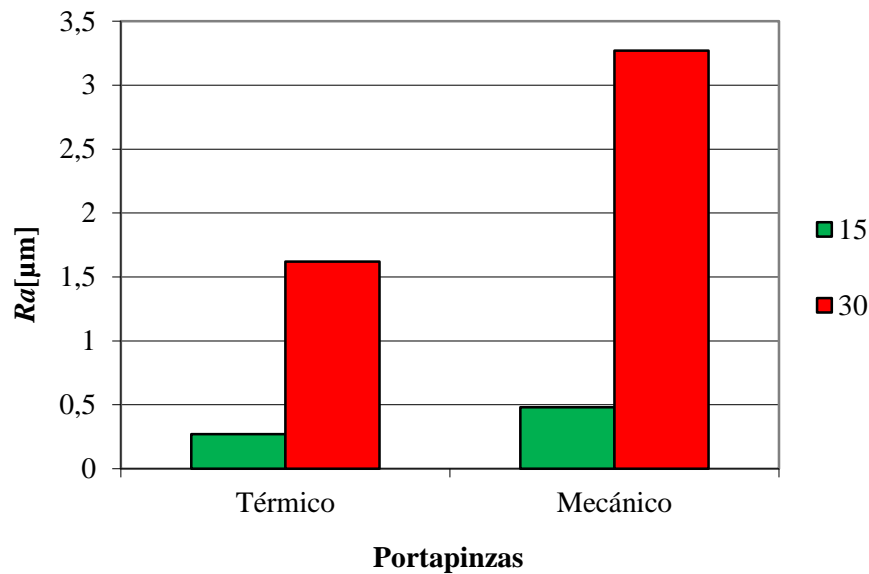


Figura 4.57. Comparativa Ra versus longitud voladizo L_v [mm] de herramienta y tipo de portapinzas.

En este punto es necesario destacar la relación entre la flexión que se produce en la herramienta al ser sometida un esfuerzo de corte y las características geométricas de la herramienta. Una ecuación básica que relaciona estas variables se presenta en la Ec 4.3 (Tungaloy 2014).

$$\delta = \frac{64 \cdot F_c \cdot L_v^3}{3\pi \cdot E \cdot D^4} \quad \text{Ec. 4.3}$$

Donde

δ [mm]: Flexión de la herramienta;

D [mm]: Diámetro de la herramienta de corte;

F_c [N]: Fuerza de corte;

L_v [mm]: longitud de voladizo de la herramienta;

E [MPa]: Módulo de Young, para metal duro igual a 560.000 MPa.

En la experimentación realizada, todas las variables de la Ec. 4.3 se mantienen constantes, a excepción de la longitud de voladizo. Según la Ec. 4.3, al doblar la L_v , la flexión que se produce en la herramienta se multiplica por 8. Este hecho junto a una mayor excentricidad con mayor voladizo ayuda a explicar la diferencia de rugosidad obtenida en la experimentación, entre ambas longitudes de voladizo.

4.3.4.3. Conclusiones.

A partir de los resultados expuestos anteriormente pueden extraerse las siguientes conclusiones:

- Debe reducirse siempre, lo máximo posible, el voladizo de la herramienta de corte para obtener un valor de rugosidad inferior, más estable, con menor variabilidad.
- En relación con el portapinzas mecánico, el portapinzas térmico permite obtener menos excentricidad de la herramienta y menor rugosidad, para diferentes longitudes de voladizo.
- En general, si es posible deben establecerse las limitaciones establecidas por el fabricante del sistema de sujeción, para garantizar las prestaciones que certifica, en concreto, respecto a la excentricidad de la herramienta de corte.

4.3.5. Influencia del equilibrado del sistema de sujeción de herramienta sobre el acabado.

A continuación se explica el desarrollo experimental realizado para comprobar la influencia sobre el acabado superficial en función del nivel de equilibrado del sistema de sujeción de la herramienta de corte.

4.3.5.1. Materiales y métodos.

La experimentación se realiza con un nuevo portapinzas mecánico equilibrable D'ANDREA (modelo TOPRUN ref. DIN69871-A40 ER25.70, con pinza de precisión de 3 μm , ref. ER25 HP+ 6,0 mm) de similares características al portapinzas mecánico utilizado en experimentos anteriores (D'ANDREA 2002). En la Figura 4.58 se muestra el portapinzas equilibrable instalado en el husillo del centro de mecanizado. Se utilizó un aparato portátil analizador de vibraciones y equilibrado del fabricante CEMB-HOFMANN, modelo N32. Se plantearon dos estados de equilibrado en el sistema de sujeción y se realizaron las mediciones de vibraciones y de rugosidad de los parámetros Ra y RSm .

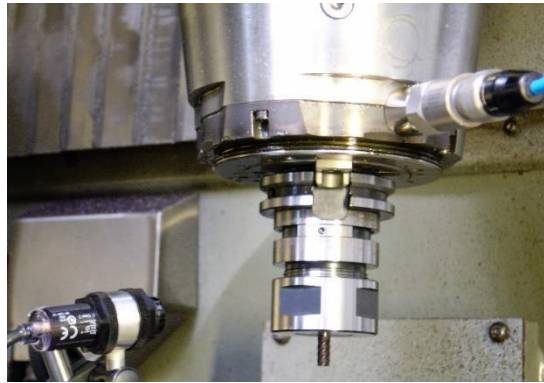


Figura 4.58. Portapinzas equilibrable y sensores de medición de vibración.

Al igual que la experiencia anterior, la medición de rugosidad se realizó sobre 3 medidas equidistantes a profundidad de corte axial, A_d de 2, 4 y 6 mm, en el punto medio de la superficie mecanizada (puntos $p1$, $p2$ y $p3$ de la Figura 4.36). Los experimentos se realizaron en las siguientes condiciones de mecanizado:

- Operación: Contorneado en fase acabado.
- Herramienta de corte: Mitsubishi VFSD D6 mm, estabilizada a una longitud de 250 mm.
- Voladizo de herramienta: 15 mm.
- Método de corte: En concordancia.
- Lubricación: Aire a presión.
- Material de trabajo: Acero Böhler W302 (W. Nr. 1.2344) templado y revenido a 52 HRC.

Condiciones de corte:

- $V_c = 300$ m/min, $f_z = 0,04$ mm/diente ($S = 15.916$ min⁻¹, $F = 3.819$ mm/min),
- Profundidades de corte: $A_d = 8$ mm, $R_d = 0,1$ mm.

4.3.5.2. Análisis de resultados.

En la Tabla 4.24 se muestran los valores de la excentricidad o salto de la herramienta, valores medidos para cada uno de los experimentos a realizar, 2 superficies con portapinzas con equilibrado mínimo EQ. (A, C) y 2 superficies con portapinzas con equilibrado máximo, DESEQ. (B, D).

Tabla 4.24. Medida de la excentricidad en cada uno de los experimentos.

Portapinzas	EQ.	DESEQ.	EQ.	DESEQ.
Salto [μm]	3	6	4	5
Sup. Mecanizada	A	B	C	D

La medida de la amplitud de la vibración se realizó respecto a la velocidad de desplazamiento [mm/s], con el portapinzas en los dos estados de equilibrado (EQ. y DESEQ.), en estado de vacío (con giro y avance sin mecanizar pieza) y en estado de corte (con giro y avance con mecanización de la pieza), Los resultados obtenidos mostrados en la Tabla 4.25 evidencian la mayor vibración existente con el portapinzas más desequilibrado en la fase de corte o mecanizado de la pieza.

Tabla 4.25. Amplitud de la vibración en función de la carga y estado de equilibrado.

Estado\Carga	Vacío [mm/s]	Corte [mm/s]
<i>Equilibrado</i>	0,03	0,20
<i>Desequilibrado</i>	1,71	1,80

En la Tabla 4.26 y en la Tabla 4.27 puede observarse como la variabilidad de los parámetros de rugosidad aumenta con el aumento del valor del desequilibrado. La rugosidad Ra aumenta casi un 30% y la rugosidad RSm más de un 10%, al aumentar el desequilibrio en 9 veces, en el proceso de corte.

Tabla 4.26. Rugosidad Ra en función del estado de equilibrado.

Estado	$Ra[\mu\text{m}]$		
	\bar{x}_m	s_m	R
<i>Equilibrado</i>	0,58	0,10	0,29
<i>Desequilibrado</i>	0,82	0,30	0,77

Tabla 4.27. Rugosidad RSm en función del estado de equilibrado.

Estado	$RSm [\mu\text{m}]$		
	\bar{x}_m	s_m	R
<i>Equilibrado</i>	252	23	52
<i>Desequilibrado</i>	287	65	131

En la Figura 4.59 se muestran imágenes ampliadas del acabado superficial obtenido con el portapinzas equilibrado, donde se aprecia la rugosidad y el rayado característico que aparecía en experimentos anteriores. Los parámetros de rugosidad en el punto medio $p2$ son, $Ra = 0,46 \mu\text{m}$ y $RSm = 235 \mu\text{m}$.

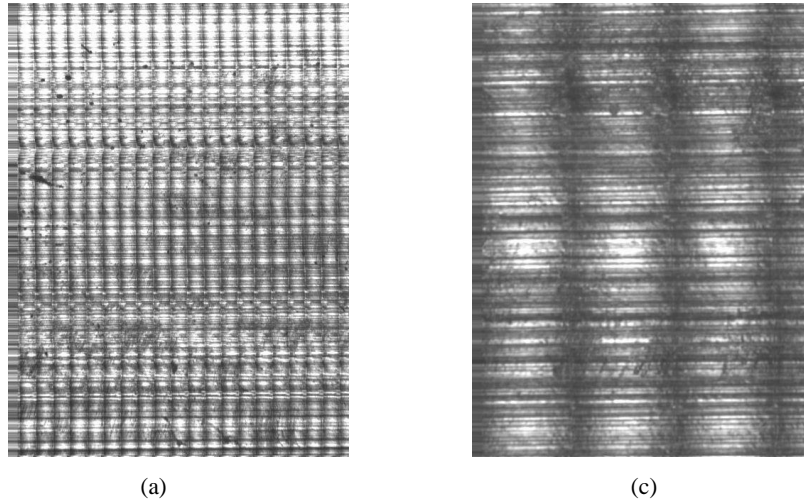


Figura 4.59. Fotografías ampliadas de la superficie mecanizada con el portapinzas equilibrado.
Ampliación: (a) 36X y (b) 216X.

En la Figura 4.60, también se muestran las imágenes ampliadas del acabado superficial obtenido con el portapinzas desequilibrado. En este caso, los parámetros de rugosidad en el punto medio $p2$ son, $Ra = 1,07 \mu\text{m}$ y $RSm = 352 \mu\text{m}$. En esta ocasión, aparece un rayado adicional y característico, son las conocidas “marcas de agua”, presentes en las operaciones de mecanizado, debido a la vibración producida por el desequilibrio existente.

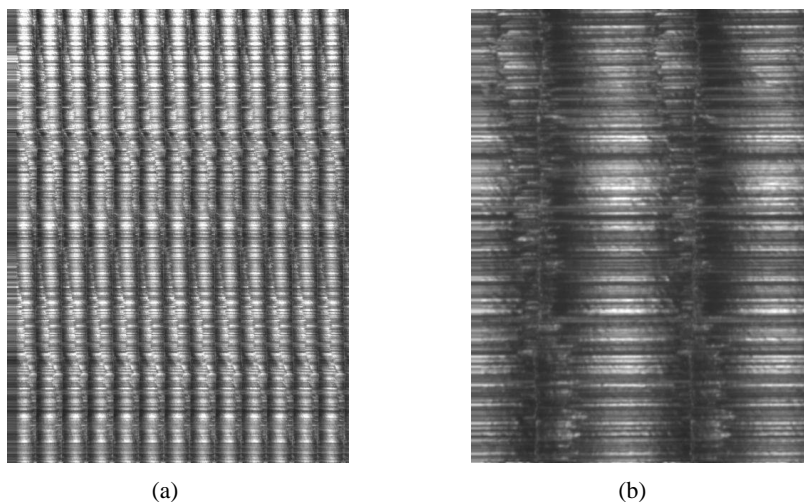


Figura 4.60. Fotografías ampliadas de la superficie mecanizada con el portapinzas desequilibrado.
Ampliación: (a) 36X y (b) 216X.

4.3.5.3. Conclusiones.

Con este estudio básico experimental de la influencia sobre el acabado superficial del nivel de equilibrado del sistema de sujeción de la herramienta se resumen las siguientes conclusiones:

- Se ha comprobado el nivel de aumento de la rugosidad en función del estado de equilibrado, para las condiciones experimentadas.
- En especial, es el parámetro de rugosidad Ra el parámetro más afectado. Cuando se aumentó el valor de desequilibrio 9 veces frente al valor de equilibrado mínimo, la rugosidad Ra aumentó cerca de un 30%.

4.3.6. Diseño de experimentos en operación de contorneado.

El objetivo de esta experimentación fue determinar el modelo predictivo de la rugosidad superficial en la operación de fresado, estrategia de contorneado, fase de acabado, sobre superficies planas, en acero de moldes templado, con la utilización de herramientas de punta plana, con el método de corte en concordancia.

4.3.6.1. Materiales y métodos.

El material empleado en la experimentación fue el acero de moldes Böhler W302 (W Nr. 1.2344) templado y revenido a 50-52 HRC. También se utilizó la misma herramienta de corte de punta plana de experimentos anteriores (ref. VFSDD0600).

En primer lugar se realizó un diseño de experimentos factorial, 2^4 con 2 niveles, 4 factores, tal como se muestra en la Tabla 4.28, con las condiciones de corte de la experimentación, tal como se muestra en la Tabla 4.29, con 4 réplicas en los puntos centrales (Tabla 4.30) y 8 experimentos adicionales para validación del modelo obtenido (Tabla 4.31).

En este caso se realizaron cinco medidas de rugosidad en cada superficie mecanizada, tal como se mostraba en la Figura 4.36. La rugosidad Ra se midió en el punto medio de la superficie, en 3 puntos equidistantes ($p1$, $p2$, $p3$) respecto la profundidad de corte en Z y en 2 puntos distanciados 10 mm del

extremo longitudinal de la superficie mecanizada ($p4$ y $p5$), uno en cada extremo y a profundidad de corte media, en eje Z.

Para considerar las variaciones del sistema como es el desgaste de la herramienta y las vibraciones presentes en el proceso, se realizaron 2 réplicas de la experimentación, por lo que el número de experimentos realizados fue de 56. El orden de ejecución de los experimentos fue aleatorizado.

Tabla 4.28. Factores y niveles del diseño de experimentos para contorneado de acero de moldes.

Factores / Niveles	Mín.	Máy.
Prof. de corte axial: A_d [mm]	5	11
Prof. de corte radial: R_d [mm]	0,05	0,20
Avance por diente: f_z [mm/diente]	0,02	0,06
Velocidad de corte: V_c [m/min]	150	300

Los niveles de los factores mostrados en la Tabla 4.28 se seleccionaron en función de la información hallada previamente en la bibliografía y la experiencia acumulada.

4.3.6.2. Resultados de la experimentación.

En la Tabla 4.29 se muestran las condiciones de corte establecidas y el valor del promedio de la rugosidad R_a , desviación típica y repetibilidad correspondiente a las 5 medidas de rugosidad realizadas en cada superficie, en cada experimento y su réplica.

De igual forma se establecieron 4 experimentos replicados en los puntos centrales del diseño de experimentos, como se muestra en la Tabla 4.30. También se establecieron los valores estadísticos para estas 4 réplicas, donde destaca el error de repetibilidad, $R = 0,06 \mu\text{m}$ para el promedio de la rugosidad $R_a = 0,54 \mu\text{m}$ (Tabla 4.30).

Tabla 4.29. Condiciones de corte en el diseño de experimentos en pieza prismática.

N	Ad [mm]	Rd [mm]	fz [mm]	Vc [m/min]	\bar{x}_m [μm]	s_m [μm]	R [μm]
1	5	0,05	0,02	150	0,17	0,02	0,02
2	11	0,05	0,02	150	0,18	0,00	0,00
3	5	0,2	0,02	150	0,19	0,01	0,02
4	11	0,2	0,02	150	0,17	0,02	0,02
5	5	0,05	0,06	150	0,79	0,29	0,41
6	11	0,05	0,06	150	0,52	0,14	0,20
7	5	0,2	0,06	150	0,73	0,05	0,07
8	11	0,2	0,06	150	0,56	0,06	0,09
9	5	0,05	0,02	300	0,18	0,00	0,00
10	11	0,05	0,02	300	0,28	0,13	0,18
11	5	0,2	0,02	300	0,18	0,00	0,01
12	11	0,2	0,02	300	0,17	0,02	0,02
13	5	0,05	0,06	300	0,74	0,47	0,66
14	11	0,05	0,06	300	0,65	0,55	0,77
15	5	0,2	0,06	300	0,63	0,46	0,64
16	11	0,2	0,06	300	0,65	0,52	0,73

Tabla 4.30. Experimentos en los 4 puntos centrales del diseño de experimentos en pieza prismática.

N	Ad [mm]	Rd [mm]	fz [mm]	Vc [m/min]	\bar{x}_m [μm]	s_m [μm]	R [μm]
17	8	0,125	0,04	225	0,57	0,03	0,05
18	8	0,125	0,04	225	0,54	0,00	0,01
19	8	0,125	0,04	225	0,55	0,04	0,05
20	8	0,125	0,04	225	0,51	0,01	0,02
				\bar{x}_m	0,54	0,02	0,03
				s_m	0,02	0,02	0,02
				R	0,06	0,03	0,04

En previsión de que el modelo no fuera lineal, tal como se comprobó en la tabla ANOVA (Tabla 4.32) se establecieron 8 experimentos adicionales, 8 puntos estrella para comprobación del modelo establecido (Tabla 4.31).

Tabla 4.31. Experimentos en 8 puntos estrella del diseño de experimentos en pieza prismática.

N	Ad [mm]	Rd [mm]	fz [mm]	Vc [m/min]	\bar{x}_m [μm]	s_m [μm]	R [μm]
21	5	0,125	0,04	225	0,61	0,08	0,11
22	11	0,125	0,04	225	0,49	0,07	0,11
23	8	0,050	0,04	225	0,53	0,02	0,02
24	8	0,200	0,04	225	0,53	0,07	0,09
25	8	0,125	0,02	225	0,19	0,01	0,02
26	8	0,125	0,06	225	0,79	0,06	0,08
27	8	0,125	0,04	150	0,46	0,07	0,10
28	8	0,125	0,04	300	0,53	0,06	0,09

En las siguientes tablas y figuras se muestran los resultados obtenidos mediante el programa MINITAB versión 14, en el desarrollo del diseño de experimentos para la obtención del modelo con los términos significativos. En un análisis de regresión inicial, con los factores seleccionados y las correspondientes interacciones de primer orden, sólo este parámetro fz es significativo, con un valor P inferior al 5% y con un ajuste R^2 del modelo de regresión bajo, con un valor del 56,86% (Tabla 4.32).

Tabla 4.32. Análisis de regresión inicial con factores e interacciones de segundo orden.

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		0,43438	0,03270	13,28	0,000
Ad	-0,03625	-0,01813	0,03270	-0,55	0,584
Rd	-0,04875	-0,02438	0,03270	-0,75	0,462
fz	0,49000	0,24500	0,03270	7,49	0,000
Vc	0,04125	0,02062	0,03270	0,63	0,533
Ad*Rd	-0,01125	-0,00563	0,03270	-0,17	0,865
Ad*fz	-0,05000	-0,02500	0,03270	-0,76	0,451
Ad*Vc	0,07875	0,03938	0,03270	1,20	0,239
Rd*fz	-0,02750	-0,01375	0,03270	-0,42	0,677
Rd*Vc	-0,04875	-0,02438	0,03270	-0,75	0,462
fz*Vc	0,01750	0,00875	0,03270	0,27	0,791
Ct Pt		0,10688	0,07312	1,46	0,155

S = 0,184990 R-Sq = 69,02% R-Sq(adj) = 56,86%

Con el diagrama de Pareto que se muestra en la Figura 4.61, se comprueba de forma comparativa entre los distintos factores, cuál es el parámetro más significativo, el avance por diente, fz .

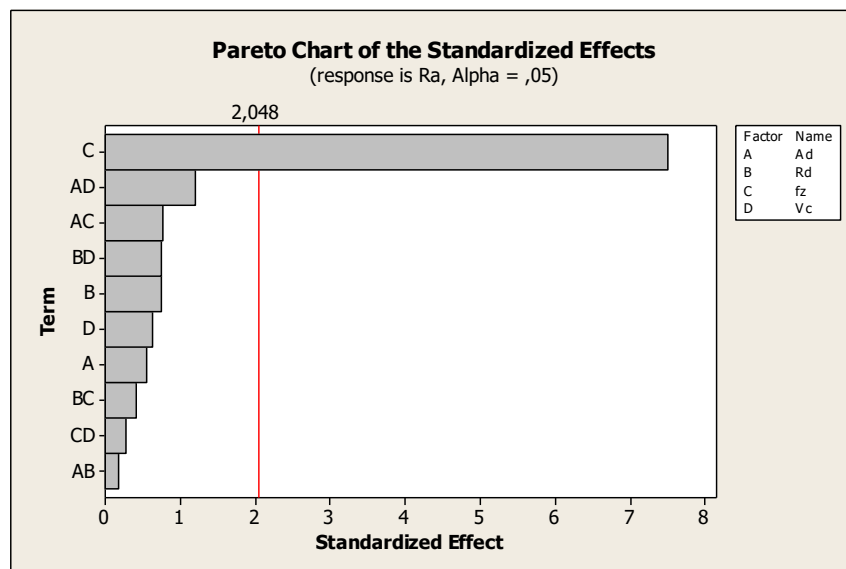


Figura 4.61. Diagrama de Pareto con la indicación de la significación de factores e interacciones.

En la Tabla 4.33, se presenta el análisis de regresión de segundo orden, más simplificado, con el único factor estadísticamente significativo, el parámetro avance por diente, fz , con el ajuste R^2 del modelo de regresión bajo, con un valor 62,5%, pero mayor al anterior.

Tabla 4.33. Análisis de regresión de segundo orden.

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P	
Constant		0,4344	0,03047	14,25	0,000	
fz	0,4900	0,2450	0,03047	8,04	0,000	
Ct Pt		0,1069	0,06814	1,57	0,125	
S = 0,172382 R-Sq = 64,46% R-Sq(adj) = 62,54%						
Analysis of Variance for Ra (coded units)						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	1	1,92080	1,92080	1,92080	64,64	0,000
Curvature	1	0,07310	0,07310	0,07310	2,46	0,125
Residual Error	37	1,09948	1,09948	0,02972		
Pure Error	37	1,09948	1,09948	0,02972		
Total	39	3,09338				

En la Figura 4.62 se muestra la gráfica de la probabilidad normal de los residuos y en la Figura 4.63 se muestra los residuos versus el número de observaciones. Ambas gráficas muestran un comportamiento satisfactorio, los residuos se comportan en forma aleatoria en torno a cero.

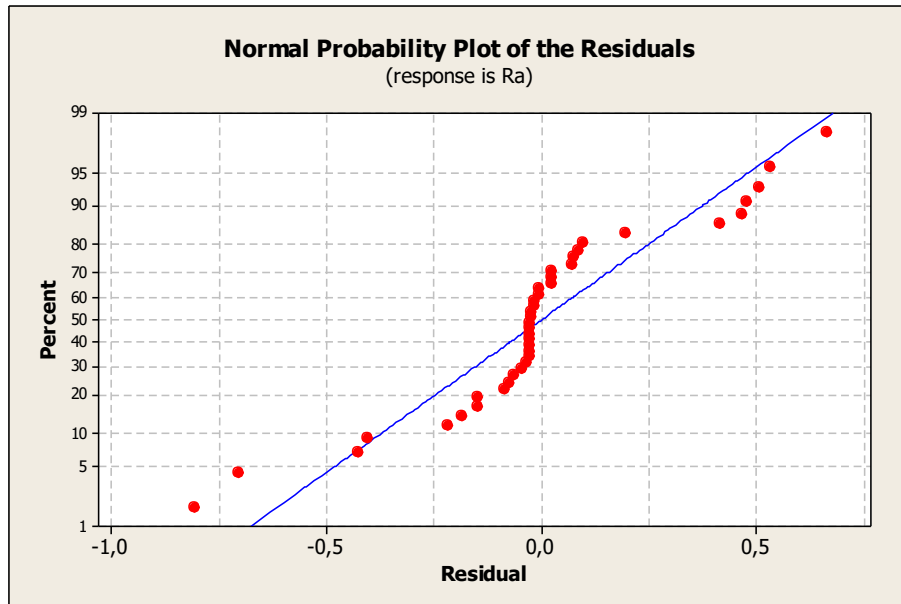


Figura 4.62. Probabilidad normal de los residuos.

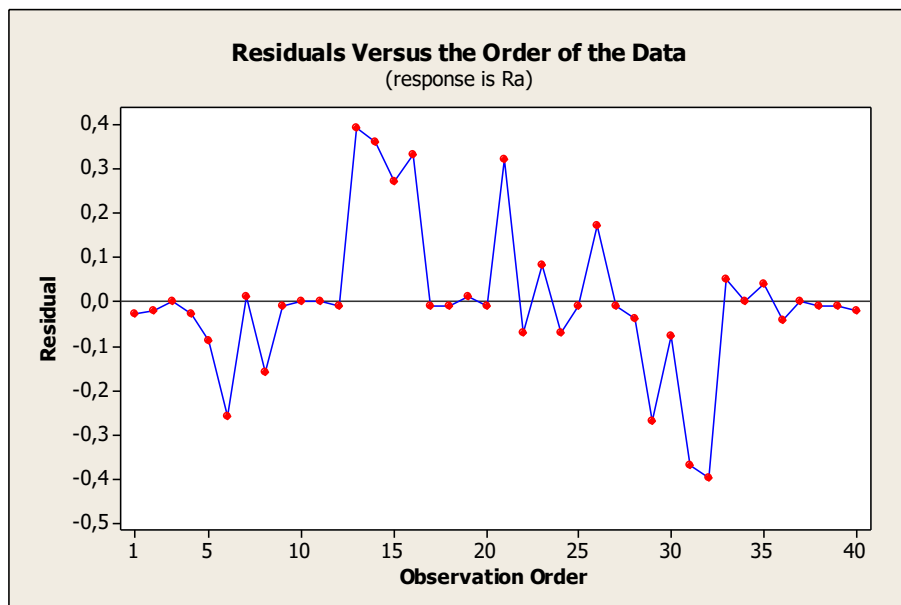


Figura 4.63. Residuos versus nº de observaciones.

Para determinar la ecuación que mejor se ajusta a los datos experimentales se plantearon varias regresiones lineales y no lineales. En la Tabla 4.34 se muestran las diferentes ecuaciones utilizadas en este análisis. Una vez obtenidos los diferentes modelos, se determina la varianza residual de cada uno de ellos y se aplica el Test de Fisher, para aceptar o rechazar la hipótesis de linealidad, a cada uno de los modelos. El propósito de aplicar el test de Fisher es analizar si la transformación aplicada hace lineales los datos observados.

Tabla 4.34. Ecuaciones de regresión lineales y no lineales.

Ecuación	Variancia residual	Test de Fisher
$Ra = a \cdot fz + b$	0,06	No admite hipótesis de linealidad
$\ln(Ra) = a \cdot \ln(fz) + \ln(b)$	0,71	No admite hipótesis de linealidad
$\ln(Ra) = a \cdot fz + b$	0,10	No admite hipótesis de linealidad
$\sqrt{Ra} = a \cdot fz + b$	0,06	No admite hipótesis de linealidad
$Ra^2 = a \cdot fz + b$	0,06	Admite hipótesis de linealidad

Sólo una transformación, $(Ra)^2$, linealiza los datos observados. Por lo tanto, sólo se utiliza esta ecuación para predecir la rugosidad Ra . También, se observa en la Tabla 4.34 que la varianza residual igual a 0,06 para esta ecuación está entre las menores encontradas.

Finalmente se obtiene la Ec. 4.4 del modelo predictivo para esta diseño de experimentos, donde si se aplican los valores de fz , empleados en la experimentación, se obtiene el valor medio de Ra y sus valores máximos y mínimos ($Ra_{máx}$ y $Ra_{mín}$) mostrados en la Tabla 4.35. Valores mostrados también en la Figura 4.64, donde se observa como la diferencia de rugosidad $Ra_{máx}$, respecto al valor medio, para los distintos avances por diente es menor a la diferencia de rugosidad $Ra_{mín}$.

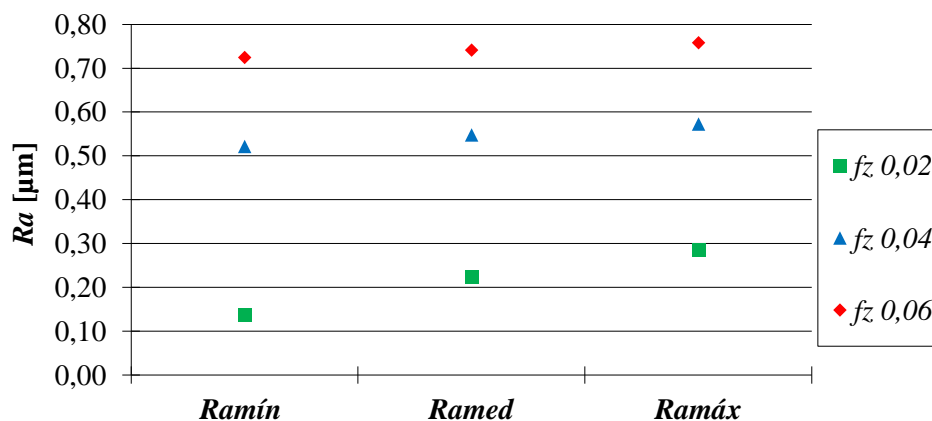
$$Ra = \sqrt{12,5^{\pm 0,17} fz - 0,2^{\pm 0,035}}$$

Ec. 4.4

Tabla 4.35. Valores de rugosidad Ra , según el modelo predictivo calculado.

fz [mm/diente]	Ra_{\min} [μm]	Ra_{medio} [μm]	Ra_{\max} [μm]
0,02	0,14	0,22	0,29
0,04	0,52	0,55	0,57
0,06	0,72	0,74	0,76

En la Figura 4.64, se observa claramente la variabilidad de la medida de la rugosidad Ra , dentro del intervalo establecido por el modelo matemático hallado y dentro de las condiciones de la experimentación impuestas, para el mismo nivel del factor significativo, el avance por diente fz . Se aprecia una menor variabilidad, para el avance por diente más alto, $fz = 0,06$ mm/diente.

**Figura 4.64.** Valores de rugosidad Ra según el modelo para distintos fz [mm/diente].

4.3.6.3. Validación del modelo predictivo calculado

Para la validación de la ecuación del modelo predictivo calculado anteriormente (Ec. 4.4), se utilizaron 8 puntos estrella del diseño de experimentos mostrados en la Tabla 4.31.

En la Figura 4.65 se muestran los errores o residuos estandarizados calculados a partir de la Ec. 3.11, como diferencia de los valores de rugosidad Ra obtenidos en los puntos estrella del diseño de experimentos y los valores de la rugosidad media $Ramed$ dados por la ecuación del modelo global (Ec. 4.4), para cada uno de los valores de profundidad de corte radial Rd ensayado, tal como se mostraba

en la Tabla 4.31. Se observa un comportamiento aleatorio en torno a cero, con un valor máximo del 18,0% para la rugosidad $R_{med} = 0,55 \mu\text{m}$ y $fz = 0,04 \text{ mm/diente}$, por lo que se considera un comportamiento de los residuos satisfactorio. En este valor máximo del residuo para R_{med} , debe tenerse en cuenta la variabilidad del resultado del modelo predictivo que aporta un valor de rugosidad máxima ($R_{m\acute{a}x} = 0,57 \mu\text{m}$) y un valor de rugosidad mínimo ($R_{m\acute{i}n} = 0,52 \mu\text{m}$), lo que aporta un valor de residuo máximo ($erm\acute{a}x = 23,5 \%$) y un valor de residuo mínimo ($erm\acute{i}n = 12,4 \%$).

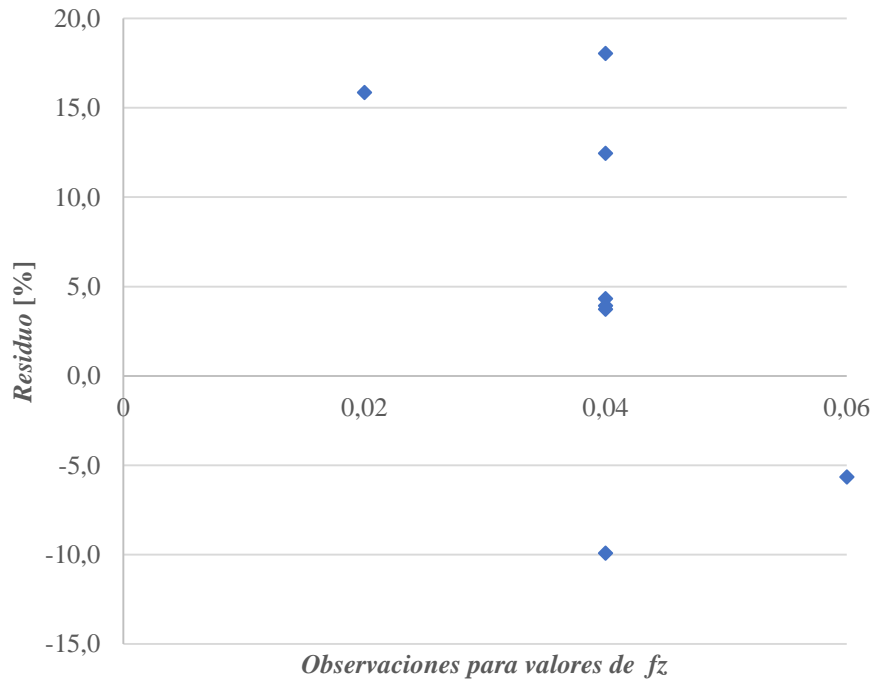


Figura 4.65. Residuos en puntos estrella en función de fz [mm/diente].

4.3.6.4. Conclusiones.

A partir del diseño de experimentos elaborado se ha obtenido un modelo matemático válido para el campo de experimentación de las condiciones de corte seleccionadas.

- Según el modelo hallado, la rugosidad Ra sólo depende de forma significativa del avance por diente programado, dentro de un intervalo para cada valor de esta variable, tal como se muestra en la Tabla 4.35, a partir de la Ec. 4.4.
- El valor de rugosidad Ra mínimo, $Ra = 0,17 \mu\text{m}$, se obtuvo en las condiciones de corte mínimas en cuanto a velocidad de corte y avance por diente, en los dos niveles seleccionados para las profundidades corte axial y radial.

- Los mayores errores de repetibilidad de la rugosidad Ra se produjeron en las condiciones de corte máximas en cuanto a velocidad de corte y avance por diente.

4.3.7. Conclusiones generales de los estudios realizados.

Las conclusiones generales de los estudios realizados en los apartados anteriores, pueden resumirse en los siguientes puntos:

- En relación a los distintos aceros de moldes y sistemas de lubricación, se ha observado una mayor dispersión de los valores en los aceros inoxidables, para los distintos métodos de lubricación y métodos de corte.
- En corte en concordancia existe un solapamiento claro de todos los intervalos de rugosidad en los distintos sistemas de lubricación. Se obtiene los valores de rugosidad mayores con microlubricación y los valores de rugosidad menores con aire.
- En corte en oposición existe un solapamiento ligero entre los intervalos de rugosidad en los distintos sistemas de lubricación. Se obtiene los valores de rugosidad mayores con aire (similar a los valores obtenidos con microlubricación, en concordancia) y los valores de rugosidad menores con aire frío.
- El acero inoxidable M333 obtuvo los valores mayores de rugosidad Ra , para todos los sistemas de lubricación y con corte en concordancia. El acero W302 ha obtenido los valores menores de rugosidad Ra , para todos los sistemas de lubricación, con corte en oposición, con un valor medio de $Ra = 0,25 \mu\text{m}$.
- Se ha comprobado un desgaste mínimo de la herramienta, en los experimentos realizados para comprobar la afectación del desgaste en la rugosidad, hasta una longitud mecanizada de 16 m. El corte en concordancia ofrece una menor rugosidad, Ra y RSm , aunque su variabilidad (desviación tipo y error de repetibilidad) sea mayor, para el valor medio de todas las longitudes de mecanizado analizadas.
- En relación al tipo de portapinzas se comprobó como con el portapinzas de sujeción térmica se redujo de forma notable la rugosidad en ambas condiciones de longitud de voladizo de la herramienta, respecto al portapinzas de sujeción mecánica. Para el mismo portapinzas se ha comprobado el hecho de que si se dobla la longitud de voladizo se aumenta por 6, el valor de la rugosidad Ra .

- En relación al nivel de equilibrado del sistema de sujeción, se ha comprobado que un aumento del desequilibrio del portapinzas de 9 veces, aumenta en un 30% el valor de la rugosidad Ra , en las condiciones experimentadas.
- A partir del diseño de experimentos elaborado se ha obtenido un modelo predictivo que depende principalmente del avance por diente f_z , dentro del campo de experimentación ensayado.

5. ESTUDIOS EXPERIMENTALES SOBRE ACEROS DE MATRICES

En este capítulo se desarrollan diferentes estudios en relación al acabado superficial obtenido mediante fresado en alta velocidad, en la fase de acabado, con herramienta cilíndrica de punta plana, en la operación de contorneado. En el apartado 5.1 se detallan los materiales y métodos empleados para la realización de la experimentación posterior.

El objetivo del primer estudio detallado en el apartado 5.2 fue comprobar experimentalmente la influencia del método de corte sobre el acabado superficial y comparar los resultados obtenidos en 3 aceros de matrices del fabricante Böhler (K340, K110 y K390).

El objetivo del segundo estudio detallado en el apartado 5.3 fue obtener un primer modelo matemático del acabado superficial, para el parámetro de rugosidad Ra , mediante diseño de experimentos, sobre uno de los aceros de matrices anteriores (acero de trabajo en frío, del fabricante Böhler K340 Ecostar).

5.1. Materiales y métodos.

En este apartado se detallan las características de los materiales y métodos empleados en los estudios experimentales realizados en este capítulo. En cuanto a materiales se mecanizaron unas probetas de 3 aceros de matrices del fabricante Böhler (K340, K110 y K390), cuyas propiedades se explicarán a continuación.

El acero Böhler K110 puede alcanzar durezas entre 58-63 HRC, en función de las temperaturas empleadas en los tratamientos térmicos. El proceso de temple se realiza entre 1.020-1.040 °C y el proceso de revenido entre 500-550 °C. Este acero se suministra inicialmente con una dureza máxima de 235 HB, después del proceso de recocido blando (Böhler 2000).

El acero Böhler K340 Ecostar puede alcanzar durezas entre 61-63 HRC. El proceso de temple se realiza entre 1.040-1.080 °C y el proceso de revenido entre 500-550 °C. Este acero se suministra inicialmente con una dureza máxima de 235 HB, después del proceso de recocido blando. Según la información técnica consultada y reuniones con técnicos de Böhler, este acero es el sustituto actual en muchas aplicaciones del acero W. Nr. 1.2379 (Böhler K110), ya que para igual dureza ofrece una

mayor tenacidad, una mayor resistencia al desgaste y un mayor rendimiento en el proceso de estampación en frío (Böhler 2009).

También se realizaron unos experimentos con el acero pulvimetalúrgico K390 PM Microclean, material templado y revenido que puede alcanzar durezas entre 62-66 HRC. El proceso de temple se realiza entre 1.030-1.180 °C y el proceso de revenido entre 500-550 °C. A diferencia de los materiales anteriores, este material ofrece una mayor resistencia al desgaste abrasivo y adhesivo, una mayor estabilidad dimensional en el tratamiento térmico (Tabla 5.2), pero una peor maquinabilidad y está muy indicado para obtener pulidos de alto brillo, en operaciones posteriores de rectificado.

En la Tabla 5.1, se muestra la composición química aproximada en porcentaje, de estos 3 materiales y sus principales propiedades físicas (a temperatura ambiente, 20°C), a través de los datos proporcionados por el fabricante de aceros Böhler (Böhler 2009).

Tabla 5.1. Composición química [%] y propiedades de aceros de matrices. Fte.: (Böhler 2009).

Material	C [%]	Si	Mn	Cr	Mo	V	Densidad [kg/dm³]	Cond. térmica [W/(m·K)]
K110	1,55	0,25	0,35	11,8	0,8	0,95	7,7	20
K340	1,1	0,9	0,4	8,3	2,1	0,5	7,68	20
K390	2,47	0,55	0,4	4,2	3,8	9	7,51	20

Respecto al material estudiado en el capítulo anterior sobre aceros de molde, de trabajo en caliente (como el acero W302), estos aceros de trabajo en frío (K110 y K340) tienen un mayor porcentaje de carbono y cromo, lo que implica una reducción de la maquinabilidad y de la conductividad térmica. El acero pulvimetalúrgico K390, tiene el mayor porcentaje de carbono, además de añadir otros elementos a la aleación, como el cobalto (2%) y el wolframio (1%).

Tabla 5.2. Comparacion en porcentaje [%] de las propiedades de aceros de matrices. Fte.: (Böhler 2009).

Material	Resist. desgaste abrasivo	Resist. Desgaste adhesivo	Resist. compresión	Tenacidad	Estabilidad Dimensional Tratam. Térmico
K110	100	50	35	35	75
K340	100	100	100	100	100
K390	120	110	110	110	110

Respecto a los datos aportados en la Tabla 5.2, el material K390 ofrece las mejores propiedades mecánicas, pero su maquinabilidad es inferior y su coste superior, por lo que es un material utilizado en aplicaciones puntuales donde sea necesario optimizar la producción de una serie de piezas.

En estos estudios para obtener el acabado superficial se realizó la operación de contorneado (Figura 5.1), en la fase de acabado, con herramienta cilíndrica de punta plana (Figura 5.2), con diferentes condiciones de corte. Por ejemplo, en la Figura 5.1 se indican las profundidades de corte radial (a_e) y axial (a_p)

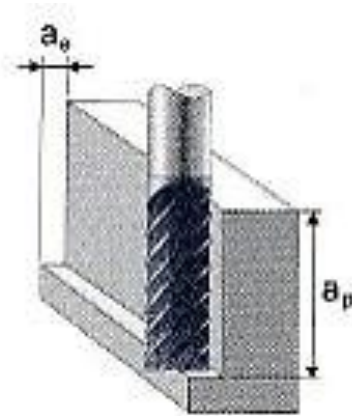


Figura 5.1. Contorneado con fresa de punta plana. Fte.: (Hitachi 2003).

La herramienta de corte utilizada en estos estudios experimentales fue una fresa integral diseñada para el fresado de materiales endurecidos en operaciones de acabado, de metal duro submicrograno (tamaño de grano de $0,3 \mu\text{m}$), serie media de longitud de corte, con punta plana, con 6 labios, con referencia VCMDD0600 (diámetro de corte $D = 6 \text{ mm}$), del fabricante MMC Kobelco. En la Figura 5.2 se muestra una imagen de la herramienta utilizada y en la Figura 5.3 se muestra una vista frontal de la misma.

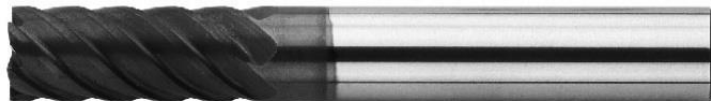


Figura 5.2. Herramienta ref. VCMDD0600. Fte.: (Kobelco 2002).

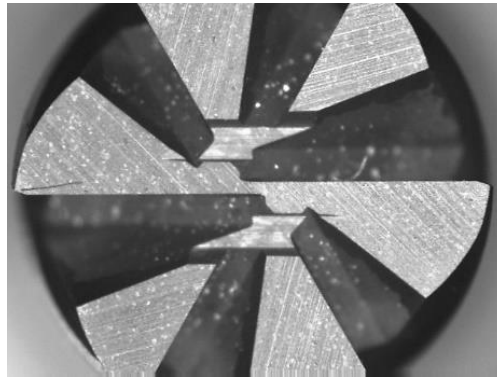


Figura 5.3. Vista frontal de la herramienta ref. VCMDD0600.

Las características geométricas principales de esta herramienta de corte son las siguientes (Kobelco 2002):

- Diámetro de corte = 6 mm, diámetro de mango = 6 mm, con corte al centro.
- Longitud de corte = 13 mm, longitud total = 50 mm.
- Ángulo de hélice = 45° y ángulo de desprendimiento = -13° .
- Tolerancia del diámetro de corte entre -0,015 y -0,038 mm.
- Tolerancia del diámetro de mango h6 (entre 0 y -0,008 mm).

La herramienta tiene un recubrimiento (Al, Ti, Si)N de la serie MIRACLE para mecanizar material templado con alta velocidad (Dureza Vickers 3.200 HV y temperatura de oxidación 1.160 °C). El fabricante de las herramientas en su catálogo, para esta referencia, material y operación en concreto, da una serie de consejos (Kobelco 2002):

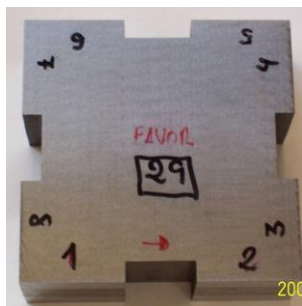
- Mecanizado en corte en concordancia;
- Alta presión de refrigerante con flujo de aire;
- No exceder de profundidad radial, $Rd < 0,3$ mm y axial, $Ad < 1,5 \cdot D$.

El sistema de fijación de la pieza a la mesa de la máquina utilizado fue la mordaza hidráulica del fabricante Crucelegui, referencia CH-1. El sistema de fijación de la herramienta fue el portapinzas mecánico, preequilibrado del fabricante MST, referencia DN40AD-CTH20-75 (Figura 5.4). La herramienta de corte se instaló con el mínimo voladizo, de 15 mm y por lo tanto, con la máxima fijación de amarre de la herramienta.

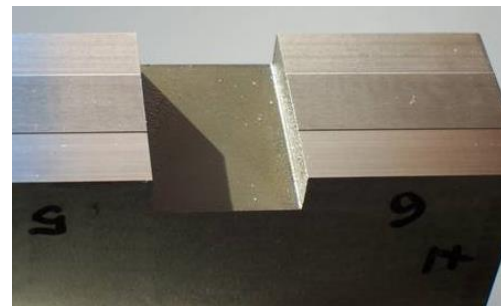


Figura 5.4. Sistema de fijación de la experimentación.

Las piezas de trabajo (probetas tipo 3) fueron preparadas a partir de bloques prismáticos de 80 mm x 80 mm x 29 mm. Cada superficie lateral estaba ranurada de tal forma que permitió realizar 16 experimentos en cada pieza, con una longitud de mecanizado por experimento de 30 mm, tal como se aprecia en la Figura 5.5, con la vista en planta de la probeta en la Figura 5.5(a) y en la vista lateral de la Figura 5.5(b) donde se observan las superficies mecanizadas. 8 experimentos se mecanizaron mediante el método de corte en concordancia (superficie superior, Figura 5.5(a)) y 8 experimentos mediante corte en oposición (superficie inferior).



(a) Vista en planta probeta



(b) Vista superficies mecanizadas

Figura 5.5. Experimentos sobre pieza prismática tipo 3.

Tras preparar la forma de la pieza, se realizó el proceso de templado y posterior rectificado de todas las superficies exteriores para evitar cualquier distorsión en las medidas y superficies de la pieza. La rugosidad Ra previa a la fase de acabado fue de $0,24 \mu\text{m}$. En cada experimento la herramienta realizó la operación de contorneado, en acabado, en la dirección del eje Y de la máquina.

Para cada experimento se tomaron tres medidas de la rugosidad superficial (parámetros Ra y RSm) mediante el rugosímetro portátil S.M. modelo RT-10, con resolución $0,01 \mu\text{m}$, electronic filter

Gaussian según *standard* ISO 11502 y parámetros de rugosidad calculados según la norma ISO 4287:1997, con longitud de evaluación: 4,8 mm; longitud de muestreo: 0,8 mm.

5.2. Influencia del método de corte en aceros de matrices.

En los siguientes experimentos, se estudió el acabado superficial obtenido en función del uso de distintos aceros aleados de matrices templados y revenidos (a las durezas correspondientes para cada material), con los dos métodos de corte (en concordancia o en oposición).

5.2.1. Materiales y métodos

Las condiciones de corte seleccionadas son las que permiten, en principio, obtener uno de los valores de rugosidad más bajos y un buen acabado superficial, a partir del conocimiento de los experimentos realizados en la operación de contorneado con aceros de moldes. Así se establece una velocidad de corte alta y avance por diente bajo:

- $V_c = 150$ m/min (Velocidad de giro, $S = 7.958$ min⁻¹),
- $f_z = 0,02$ mm/diente (avance, $F = 955$ mm/min; avance por revolución, $f = 0,12$ mm/rev),
- Profundidades de corte axial, $Ad = 9,0$ mm y radial, $Rd = 0,1$ mm.

Con estas condiciones de corte se emplean los 3 aceros de matrices detallados en el apartado 5.1. Las propiedades de estos materiales se encuentran detalladas en la Tabla 5.1 y la Tabla 5.2.

5.2.2. Analisis de resultados

En la Tabla 5.3 se presenta la variabilidad de las medidas obtenidas, con la diferenciación de los materiales de trabajo y con el método de corte en concordancia, a partir de 24 medidas de la rugosidad Ra , para cada material (8 superficies mecanizadas x 3 medidas por superficie). En este caso el valor del estadístico t ($n = 24$ medidas, $IC = 95\%$) = 2,07.

Tabla 5.3. Rugosidad, R_a para fresado en concordancia según el tipo de acero.

Material	\bar{x}_m	s_m	R	$\varepsilon_T \cdot t$	$x_{mín} - x_{máx}$
K340	0,19	0,02	0,08	0,008	0,18 - 0,20
K110	0,19	0,01	0,04	0,004	0,19 - 0,19
K390	0,18	0,01	0,04	0,004	0,18 - 0,18

Con esta consideración, la diferencia de rugosidad entre los diferentes materiales no es significativa. Para analizar los resultados presentados en la Tabla 5.3 se plantearon diversas pruebas de hipótesis para comprobar la igualdad de medias y variancias. Por ejemplo para comparar los resultados obtenidos entre los aceros K340 y K110 se calculan los siguientes valores:

- Test de igualdad de variancias: F -test = 1,33 y P -valor = 0,504
- Test de igualdad de medias: T -test = -0,26 y P -valor = 0,794

Con estos resultados, puede afirmarse que no existe influencia en la rugosidad R_a , entre los distintos materiales ensayados, es decir, puede aceptarse la igualdad de variancias y medias para el total de los experimentos realizados mediante el mecanizado en concordancia.

Con el corte en oposición (Tabla 5.4), no puede afirmarse la igualdad de variancias entre los tres materiales, con las diferencias obtenidas en las mediciones de la rugosidad, debidas a la heterogeneidad de la superficie mecanizada. En especial se obtuvo un mayor valor de rugosidad en el material más utilizado habitualmente en el sector, el acero K110 (W Nr. 1.2379).

Tabla 5.4. Rugosidad, R_a [μm] para fresado en oposición según el tipo de acero.

Material	\bar{x}_m	s_m	R	$\varepsilon_T \cdot t$	$x_{mín} - x_{máx}$
K340	0,28	0,07	0,21	0,029	0,25 - 0,31
K110	0,46	0,14	0,43	0,058	0,40 - 0,52
K390	0,30	0,11	0,46	0,046	0,25 - 0,35

Como se observa en la Tabla 5.4, en comparación con la Tabla 5.3, sí existe una variación importante del valor de la rugosidad R_a , entre los dos métodos de corte, con unos valores de rugosidad R_a

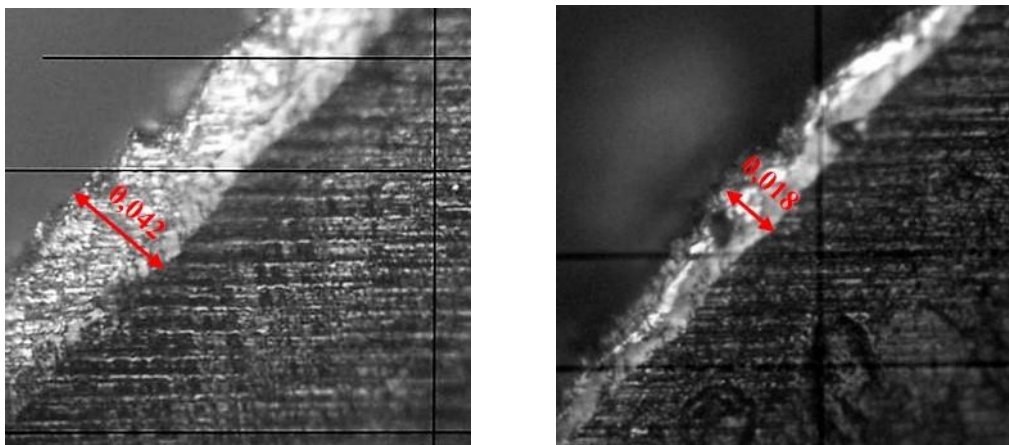
mayores con el corte en oposición, así como una mayor dispersión de los resultados para todos los materiales ensayados.

5.3. Influencia del desgaste de herramienta.

En este apartado se estudia la influencia sobre la rugosidad superficial, del desgaste de la herramienta de corte en función de la longitud mecanizado y el método de corte. Para este estudio se emplean los mismos materiales y condiciones de corte detallados en el apartado 5.2.1.

5.3.1. Análisis de resultados

En las herramientas de corte utilizadas con el método de corte de fresado en oposición, se comprobó una mayor adhesión de material en la arista de corte y un mayor desgaste en la cara de incidencia de la herramienta de corte ($VB_{máx} = 0,042$ mm), tal como se muestra en la Figura 5.6, comparado con el fresado en concordancia ($VB_{máx} = 0,018$ mm), para una longitud de mecanizado $L_m = 720$ mm.



(a) Desgaste con corte en oposición

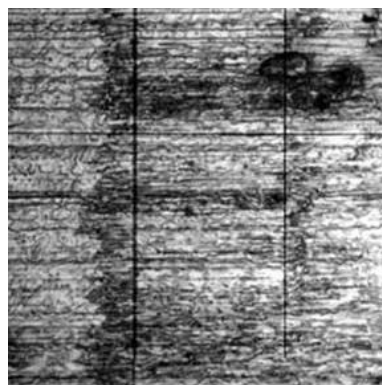
(b) Desgaste con corte en concordancia

Figura 5.6. Desgaste herramienta en cara de incidencia con los dos métodos de corte para $L_m = 720$ mm.

El rayado horizontal que aparece en la Figura 5.6 es causado por la forma del perfil de la cara de incidencia de la arista de corte de la herramienta. La forma y rugosidad de este perfil está determinada por la operación de rectificado realizada durante la fabricación de la herramienta (calidad y tipo de grano de la muela de diamante y avance relativo respecto la herramienta). Este rayado característico de la superficie de incidencia de la herramienta se replica en la superficie de la pieza mecanizada, tal como se puede apreciar en la Figura 5.7, para ambos métodos de corte. Las imágenes de la Figura 5.6 y de la Figura 5.7 se tomaron con un microscopio Wetzlar y aumento de la lente 20:1.

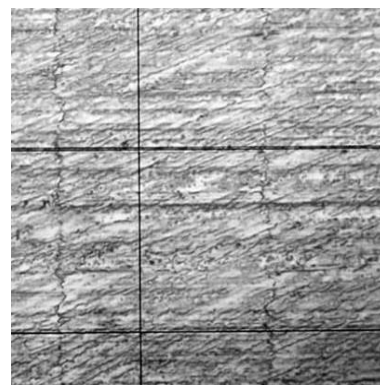
Es importante considerar el desgaste de la herramienta de corte, especialmente para su aplicabilidad a nivel industrial, pues en estos casos, para la sustitución de la herramienta, debe considerarse un criterio de vida de la misma, ya sea con el control del desgaste sufrido en la cara de incidencia, o por el mecanizado de un determinado número de piezas, o por la longitud de corte mecanizada.

En la Figura 5.7 se muestran imágenes de las superficies mecanizadas, para el acero pulvimetalúrgico K390, según el método de corte en oposición, Figura 5.7(a) y el corte en concordancia, Figura 5.7(b). En estas figuras puede observarse dos líneas verticales, con una distancia entre ellas próxima al avance por revolución ($f = 0,12$ mm/rev). Los valores de la rugosidad RSm son similares al avance por revolución, lo que sugiere que la superficie es regular.



(a) Corte en oposición

$Ra = 0,29 \mu\text{m}$, $RSm = 131 \mu\text{m}$



(b) Corte en concordancia

$Ra = 0,17 \mu\text{m}$, $RSm = 117 \mu\text{m}$

Figura 5.7. Superficies mecanizadas según el método de corte para el acero K390.

5.4. Diseño de experimentos para operación contorneado de acero de matrices.

A continuación se presenta el estudio realizado para obtener el modelo predictivo de la operación de mecanizado experimentada a partir de un diseño de experimentos en la operación de contorneado en fase de acabado y con el método de corte en concordancia.

5.4.1. Materiales y métodos.

El material de las probetas (pieza tipo 3) a ensayar fue el acero K340, cuyas propiedades se mostraron anteriormente en la Tabla 5.1.

En este caso, para reducir el nivel de experimentos, se desarrolló un diseño de experimentos factorial fraccionado, 2^{4-1} , a dos niveles, con 4 factores (Velocidad de corte, V_c ; avance por diente, f_z ; profundidades de corte axial, Ad y radial, Rd). Inicialmente se realizaron 8 experimentos, más 3 réplicas en los puntos centrales.

En la Tabla 5.5 se muestran los niveles y factores considerados, así como las condiciones de programación de la máquina (velocidad de giro S y avance lineal F).

Tabla 5.5. Factores y niveles seleccionados para operación de contorneado.

Factor/ Nivel	Ad [mm]	Rd [mm]	f_z [mm/diente]	V_c [m/min]	S [min⁻¹]	F [mm/min]
Mín.	6	0,05	0,02	75	3.979	478
Máx.	12	0,3	0,06	150	7.958	2.865
Central	9	0,175	0,04	112,5	5.968	1.432

5.4.2. Analisis de resultados.

En la Tabla 5.6 se muestran los distintos experimentos realizados (8 experimentos del diseño factorial más 3 experimentos en los puntos centrales), con los resultados de rugosidad obtenidos, (Ra , RSm).

Tabla 5.6. Matriz del Diseño de Experimentos para operación de contorneado.

Nº	<i>Ad</i> [mm]	<i>Rd</i> [mm]	<i>fz</i> [mm/diente]	<i>Vc</i> [m/min]	<i>Ra</i> [µm]	<i>RSm</i> [µm]
1	6	0,05	0,02	75	0,24	78
2	12	0,05	0,02	150	0,16	124
3	6	0,30	0,02	150	0,19	124
4	12	0,30	0,02	75	0,26	64
5	6	0,05	0,06	150	1,20	358
6	12	0,05	0,06	75	1,10	278
7	6	0,30	0,06	75	1,64	94
8	12	0,30	0,06	150	0,67	363
9	9	0,175	0,04	112,5	0,62	241
10	9	0,175	0,04	112,5	0,53	242
11	9	0,175	0,04	112,5	0,63	240

Los resultados obtenidos en las réplicas de los 3 experimentos en los puntos centrales (nº 9, 10 y 11) nos permiten observar la variabilidad del proceso para las condiciones de corte seleccionadas, tal como se muestra en la Tabla 5.7, para la rugosidad *Ra* y *RSm*. Al ser una muestra pequeña, si se establece un intervalo de confianza del 95%, se halla el estadístico *t*-Student ($t = 4,30$) y se calcula la medida total \bar{x} , con sus valores extremos ($x_{mín} - x_{máx}$), con el intervalo entre el valor máximo y mínimo, donde puede encontrarse el valor verdadero de la medición.

Tabla 5.7. Variabilidad de la medida de rugosidad operación contorneado, en puntos centrales

Rugosidad	\bar{x}_m	s_m	<i>R</i>	$\varepsilon_T \cdot t$	$x_{mín} - x_{máx}$
<i>Ra</i> [µm]	0,60	0,05	0,10	0,13	0,47 - 0,73
<i>RSm</i> [µm]	241	1	2	3	238 - 244

A la experimentación mostrada en la tabla anterior (Tabla 5.6) se añadieron una serie de experimentos adicionales (8 experimentos estrella), para la posterior validación del modelo (Tabla 5.8). En ambas tablas se señalan los valores máximos (color rojo) y mínimos (color verde) de rugosidad, *Ra* y *RSm*.

Tabla 5.8. Experimentación adicional operación contorneado.

N	<i>Ad</i> [mm]	<i>Rd</i> [mm]	<i>fz</i> [mm/diente]	<i>Vc</i> [m/min]	<i>Ra</i> [μm]	<i>RSm</i> [μm]
12	6	0,175	0,04	112,5	0,67	226
13	12	0,175	0,04	112,5	0,53	239
14	9	0,05	0,04	112,5	0,59	241
15	9	0,30	0,04	112,5	0,54	242
16	9	0,175	0,02	112,5	0,20	102
17	9	0,175	0,06	112,5	0,97	360
18	9	0,175	0,04	75	0,75	93
19	9	0,175	0,04	150	0,62	240

Una vez realizado el estudio de la significación de los distintos términos, con el análisis de la variancia para la rugosidad *Ra* (Tabla 5.9), se obtienen 3 efectos y dos interacciones significativas para un nivel de confianza del 95%, con un *P*-valor inferior a 0,05.

La Tabla 5.9 y las figuras presentadas a continuación se obtuvieron con el programa STATGRAPHICS®.

Tabla 5.9. Analisis de variancia para rugosidad *Ra*, con términos significativos definitivos.

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Ad	0,145800	1	0,145800	48,70	0,0202
fz	1,767200	1	1,767200	582,59	0,0017
Vc	0,130050	1	0,130050	42,87	0,0225
Ad·fz	0,140450	1	0,140450	46,30	0,0209
fz·Vc	0,064800	1	0,064800	21,36	0,0438
Lack-of-fit	0,017997	3	0,005999	1,98	0,3532
Pure error	0,006067	2	0,003033		

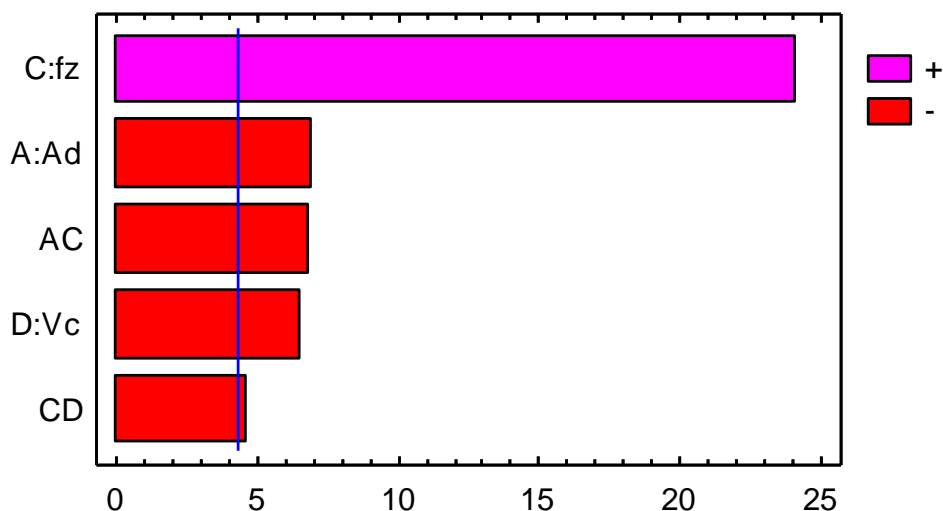


Figura 5.8. Diagrama de Pareto con los términos significativos de la experimentación.

En la Figura 5.8 se muestra el diagrama de Pareto con los efectos e interacciones significativos (AC: $Ad \cdot fz$, CD: $fz \cdot Vc$), donde se aprecia que el término más significativo es el avance por diente, fz y el menos significativo, la interacción entre $fz \cdot Vc$. El valor estadístico de R^2 (*R-Squared statistic*) indica que el modelo ajustado obtenido explica el 98,94 % de la variabilidad en Ra y el valor estadístico de R^2 ajustado (*adjusted R-squared statistic*) indica que el modelo ajustado explica el 97,88 %.

Tal como se muestra en la Ec. 5.1, se obtuvo un modelo ajustado, una expresión predictiva del parámetro de rugosidad, Ra para la operación de mecanizado de contorneado sobre la pieza tipo prismática, nº 3.

$$R_a = -0,8293 + 0,0433 \cdot A_d + 56,8750 \cdot f_z + 0,0014 \cdot V_c - 2,2083 \cdot A_d \cdot f_z - 0,1200 \cdot f_z \cdot V_c \quad \text{Ec. 5.1}$$

Tal como se muestra en la Figura 5.9, este modelo predictivo depende principalmente del avance por diente, fz , seguido de la profundidad de corte axial Ad y de la velocidad de corte Vc . Aunque para el intervalo de los parámetros de corte ensayado, la profundidad de corte radial (Rd) no sea significativa, está debe mantenerse dentro de unos límites, para un corte óptimo. Se recomienda emplear un valor mínimo tal que se respete un espesor mínimo de viruta y un valor máximo limitado por la dureza del material a mecanizar, por la rigidez de la máquina y por las características de la herramienta de corte. En esta experimentación el valor de Rd se limitó dentro del intervalo 0,05-0,30 mm. Los valores de espesor medio de viruta son muy bajos en toda la experimentación, con un valor mínimo $hm = 0,002$ mm y un valor máximo $hm = 0,013$ mm (valores de hm obtenidos a partir de la Ec. 1.6).

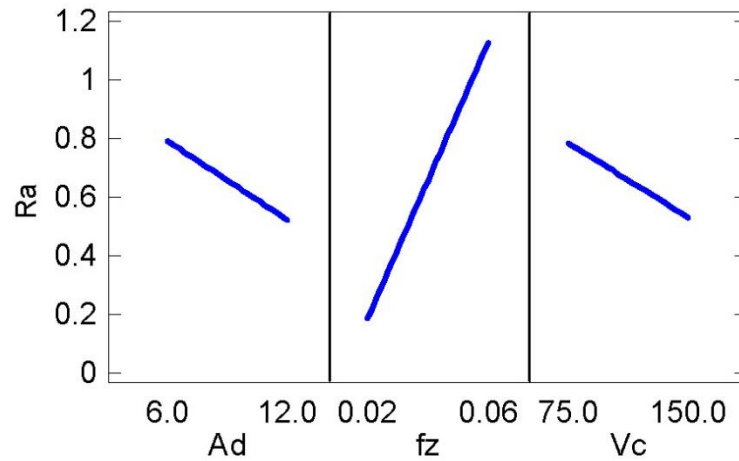


Figura 5.9. Gráficas de los efectos principales para rugosidad, Ra en operación de contorneado.

En la Figura 5.10, en la gráfica de interacción $Ad \cdot fz$ vs Ra , se aprecia como no hay cambio del efecto del factor Ad , al cambiar de nivel, para un fz mínimo. En cambio se reduce la rugosidad, para el valor máximo de Rd y fz . En la gráfica de interacción $fz \cdot Vc$ vs Ra el comportamiento del efecto del factor fz , es casi paralelo y muy próximo para ambos niveles del factor Vc , con una ligera reducción de la rugosidad para la Vc mayor.

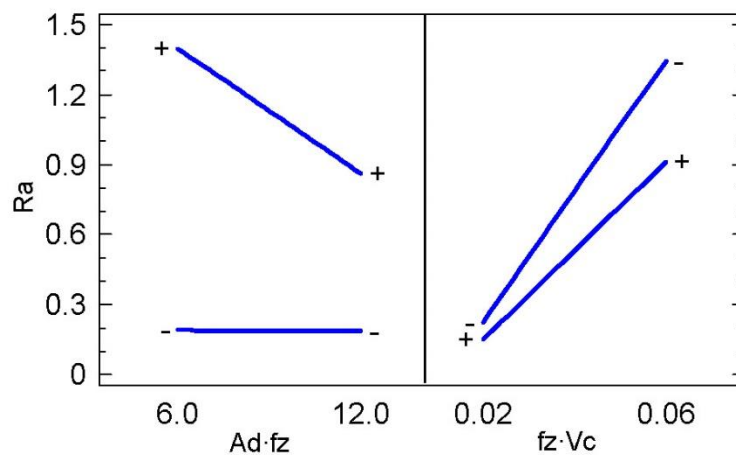


Figura 5.10. Gráficas de interacciones para rugosidad, Ra en operación de contorneado.

En la Figura 5.11 se muestra la superficie respuesta de la rugosidad Ra , obtenida tras el desarrollo del diseño de experimentos, para la velocidad de corte constante de 150 m/min, y las variables Ad , y fz dentro de los intervalos de experimentación. En esta Figura 5.11 se aprecia también como el factor fz es el más significativo.

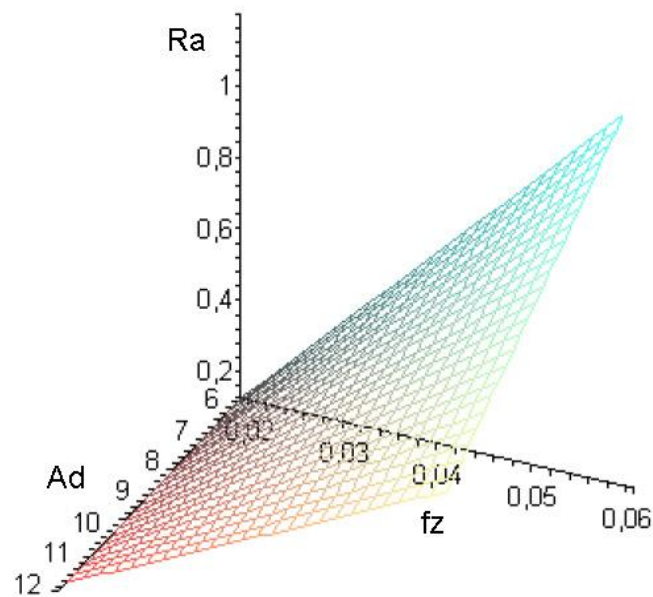


Figura 5.11. Superficie respuesta de la rugosidad Ra versus Ad y fz , para $Vc = 150$ m/min.

En la Figura 5.12, se muestra un ejemplo del acabado superficial obtenido en el experimento n° 8, a distintas ampliaciones. La flecha azul indica el sentido del avance F . Este experimento se realizó con las condiciones de corte más elevadas:

- $Vc = 150$ m/min (velocidad de giro, $S = 7.958$ min⁻¹);
- $fz = 0,06$ mm/diente (avance lineal, $F = 2.865$ mm/min);
- Profundidades de corte axial, $Ad = 12$ mm y radial, $Rd = 0,3$ mm. Estas profundidades de corte son más elevadas que las recomendadas inicialmente por el fabricante de la herramienta ($Rd < 0,2$ mm y $Ad < 6$ mm).

Los valores de los parámetros de rugosidad obtenidos para el experimento 8 fueron los siguientes: $Ra = 0,67$ μ m y $RSm = 363$ μ m. A pesar de utilizar las condiciones de corte más elevadas de toda la experimentación, en el experimento 8 no se obtuvo la máxima rugosidad Ra .

En cambio, en el experimento 7 con condiciones de corte mínimas respecto a las variables Ad y Vc se obtuvo el valor máximo de Ra respecto a los valores obtenidos en el resto de la experimentación ($Ra = 1,64$ μ m).

En esta operación de fresado cabe destacar que cuando la superficie mecanizada es homogénea, la distancia entre las líneas verticales presentes es similar al valor del avance por revolución ($f = 0,36$ mm/rev) y puede aproximarse al parámetro de rugosidad RSm , como sucede en el experimento 8. Estas líneas verticales representan los picos del perfil de rugosidad obtenido.

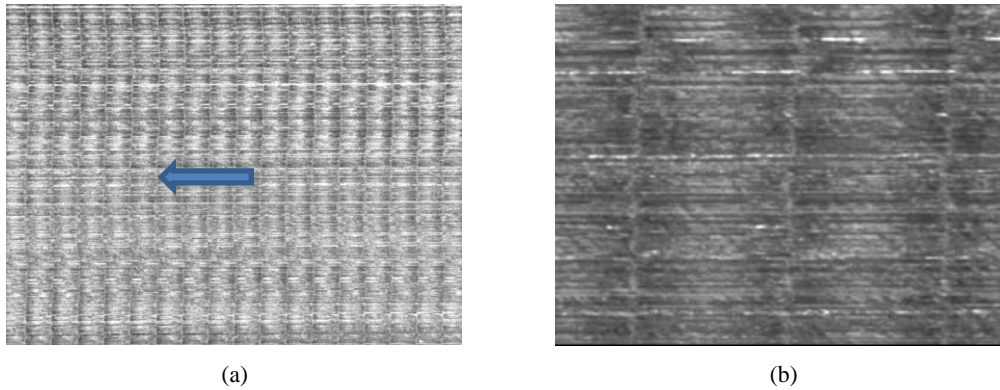


Figura 5.12. Acabado superficial obtenido en la probeta K340-8.
Ampliación: (a) 36X y (b) 216X.

En la Figura 5.13 se muestra un ejemplo del acabado superficial del experimento n° 2, donde se obtuvo el valor mínimo de rugosidad Ra . El experimento se realizó con los valores mínimos de fz y Rd , y los valores máximos de Vc y Ad , con las siguientes condiciones de corte:

- $Vc = 150$ m/min (velocidad de giro, $S = 7.958$ min^{-1});
- $fz = 0,02$ mm/diente (avance lineal, $F = 955$ mm/min);
- Profundidades de corte axial, $Ad = 12$ mm y radial, $Rd = 0,05$ mm.

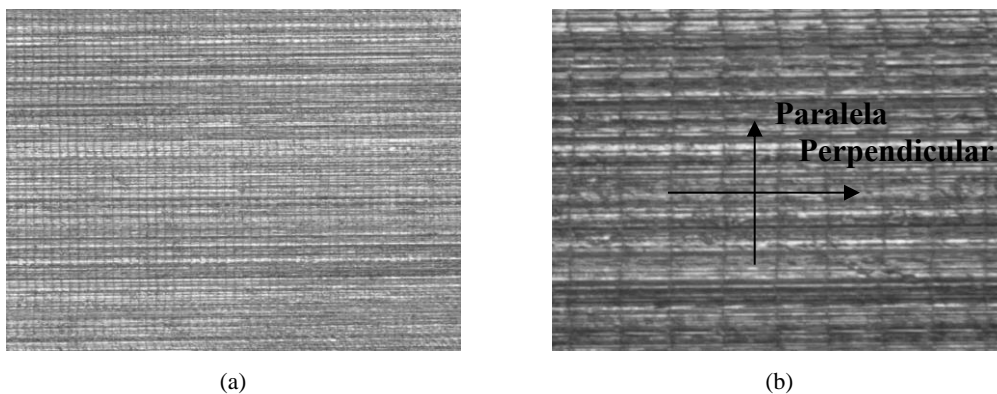


Figura 5.13. Acabado superficial obtenido en la probeta K340-2.
Ampliación: (a) 36X y (b) 216X.

Los valores de los parámetros de rugosidad obtenidos para este experimento fueron los siguientes: $Ra = 0,16 \mu\text{m}$ y $RSm = 124 \mu\text{m}$. En este caso también se obtuvo una superficie mecanizada homogénea, con una distancia entre las líneas verticales presentes similar al valor del avance por revolución ($f = 0,12 \text{ mm/rev}$).

Salvo indicación contraria, como medición estándar de la rugosidad el palpador del rugosímetro siempre debe desplazarse en la dirección perpendicular al rayado característico y principal que se observa en la Figura 5.12(a) y Figura 5.13(a). Pero en el sentido paralelo a este rayado principal, también existe un rayado secundario. En las imágenes ampliadas de la Figura 5.12(b) y Figura 5.13(b) también se aprecian unas líneas horizontales en la textura de la superficie mecanizada. Estas líneas son el reflejo o réplica del perfil de la arista de corte de la herramienta.

Para el experimento nº 5 mostrado en la Tabla 5.6 se tomaron medidas de rugosidad adicionales para comprobar la diferencia de rugosidad medida según fuera la dirección de desplazamiento del palpador del rugosímetro. Los valores de rugosidad obtenidos en el punto medio de la superficie mecanizada se muestran en la Tabla 5.10.

Tabla 5.10. Variación de la rugosidad en función de la dirección de medición.

Rugosidad	<i>Perpendicular</i>	<i>Paralela</i>
<i>Ra</i> [μm]	1,27	0,46
<i>RSm</i> [μm]	350	80

En la Figura 5.14 y en la Figura 5.15 se muestran los perfiles de rugosidad que corresponden a la medición perpendicular y paralela, respectivamente, del punto medio de la superficie mecanizada (punto $p2$) en el experimento nº 5. En la Figura 5.14 se observa una textura homogénea, con un valor de RSm próximo al valor del avance por revolución ($0,36 \text{ mm/rev}$). En cambio en la Figura 5.15 se observa una textura muy heterogénea, con unos valores de rugosidad menores.

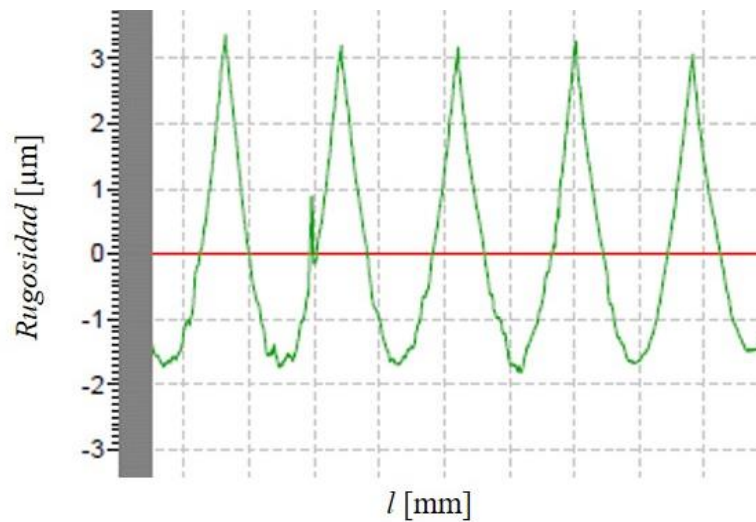


Figura 5.14. Perfil de rugosidad medición perpendicular, punto $p2$, experimento nº 5.

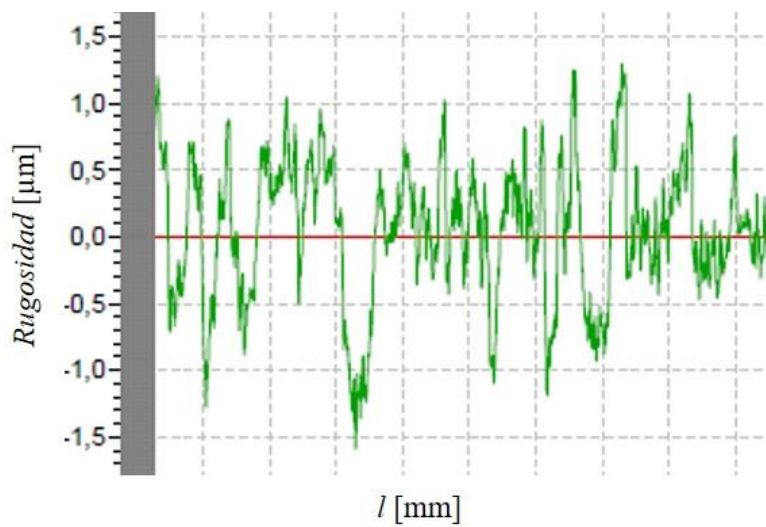


Figura 5.15. Perfil de rugosidad medición paralela, punto $p2$, experimento nº 5.

La arista de corte definitiva de la herramienta se obtiene mediante una operación de rectificado. En función de las distintas variables que intervienen en el proceso, se obtiene una arista más o menos precisa, cuya geometría se replicará en la superficie mecanizada, tal como se observa en la Figura 5.15.

5.4.3. Validación del modelo para aceros de matrices.

Para la validación de la ecuación del modelo calculado anteriormente, dado por la Ec. 5.1, se utilizaron los resultados obtenidos en los 8 experimentos adicionales mostrados en la Tabla 5.8. En la Figura 5.16 se muestran los residuos estandarizados calculados a partir de la Ec. 3.11, para cada uno de los valores de avance por diente f_z ensayados. Se observa un comportamiento aleatorio en torno a cero, con valor máximo de $er = 21,8\%$ para $Rd = 0,04$ mm, por lo que el comportamiento de los residuos puede considerarse satisfactorio.

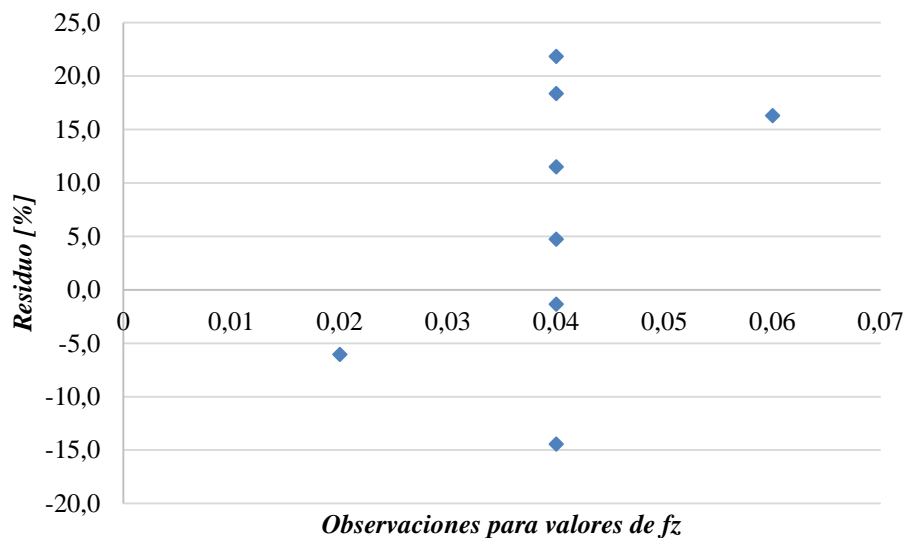


Figura 5.16. Residuos en experimentos adicionales en función de f_z [mm/diente].

5.5. Conclusiones de los estudios para aceros de matrices.

Las conclusiones principales de los estudios realizados en el fresado de aceros de matrices en la operación de contorneado se detallan a continuación:

- A partir de las condiciones de corte, los materiales ensayados y número de experimentos realizados, con las pruebas de hipótesis planteadas para analizar la igualdad de medias y variancias, puede afirmarse que no existe influencia en la rugosidad Ra debido a los materiales experimentados para el método de corte en concordancia.

- Con la estrategia de mecanizado en concordancia se obtiene un valor menor de rugosidad, Ra , una variabilidad de la medida menor y un acabado más uniforme, sin la presencia de defectos superficiales.
- En cambio con el método de corte en oposición no puede confirmarse la igualdad de medias y variancias. Con este método se obtiene el mayor valor de rugosidad, Ra con el acero K110, con una diferencia notable con respecto al resto de aceros analizados) el acabado es más heterogéneo, con aparición de marcas que evidencian un corte de la herramienta desigual, debido entre otras causas, a una mayor adhesión de viruta en el filo de corte, lo que ha provocado también un mayor desgaste de herramienta.
- En el diseño de experimentos realizado con el acero K340, con el método de corte en concordancia, el factor más significativo para el parámetro de rugosidad Ra ha sido el avance por diente fz de la herramienta, seguido de la profundidad de corte axial Ad y la velocidad de corte Vc .
- Por otra parte, se constata que el avance por revolución obtenido puede aproximarse al parámetro de rugosidad RSm si en la superficie no aparecen irregularidades.
- La rugosidad más elevada, $Ra = 1,64 \mu\text{m}$, se obtuvo en las condiciones más elevadas de Rd y fz , pero mínimas de Ad y Vc . En este caso, el valor de rugosidad $RSm = 94 \mu\text{m}$, no se aproxima al valor esperado de $RSm \approx 360 \mu\text{m}$, que debería ser similar al valor del avance por revolución, $f = 0,36 \text{ mm/rev}$.
- La rugosidad de menor valor, $Ra = 0,16 \mu\text{m}$, se obtuvo en las condiciones mínimas de Rd y fz , pero más elevadas de Ad y Vc . En este caso, el valor de rugosidad $RSm = 124 \mu\text{m}$, si se aproxima al valor esperado de $RSm \approx 120 \mu\text{m}$.
- Para las condiciones de corte establecidas en esta experimentación, se obtuvo un intervalo de rugosidad Ra , entre $0,16-1,60 \mu\text{m}$.

6. ESTUDIO EN PIEZA TEST COMPLEJA.

A partir de los resultados iniciales obtenidos en las piezas tipo anteriores, se realizaron diferentes experimentos en una pieza test más compleja (Figura 6.1), para emplear unas condiciones similares a las del proceso de mecanizado de moldes.

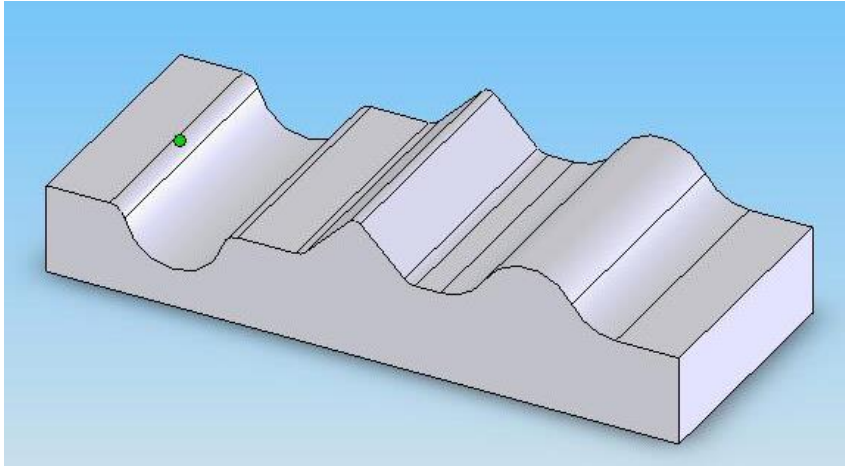


Figura 6.1. Pieza test compleja.

En el apartado 6.1 se explican los materiales y métodos generales empleados en este capítulo. En el apartado 6.2 se desarrolla la metodología del diseño de experimentos para obtener un modelo predictivo de la rugosidad Ra , promedio de todas las superficies analizadas. En el apartado 6.3 se presentan distintos ensayos experimentales en 3 centros de mecanizado, con sus controles numéricos correspondientes, gracias a la colaboración de empresas como Tecnoperfil (moldista), el centro tecnológico de la Fundació ASCAMM y la Fundació CIM. En el apartado 6.3.1 se estudia la influencia de los 3 centros de mecanizados, con 3 niveles de tolerancia cordal. En el apartado 6.3.2 se estudia la influencia de 3 programas de mecanizado, con 3 niveles de tolerancia cordal.

6.1. Materiales y métodos.

En toda la experimentación se realizó la operación de copiado por planos paralelos sobre la pieza test compleja, en la fase de acabado, con el método de corte en concordancia.

El material de las piezas test fue el acero de moldes del fabricante *Böhler*, con referencia W302 (W. Nr. 1.2344) templado y revenido a 50-52 HRC. Las piezas fueron templadas a 1.030 °C, en horno de vacío, con enfriamiento en nitrógeno a presión de 3 bar y se han revenido a 180-200 °C (condiciones usuales para aceros de moldes de inyección de plástico).

Como paso previo a la experimentación en estudio en la fase de acabado final, sobre unas placas con una dimensiones iniciales de 250 mm x 100 mm x 60 mm, se realizaron las operaciones de fresado en las fases de desbaste, semidesbaste. Con la geometría requerida para la realización de todos los experimentos se mecanizaron y rectificaron 7 placas de acero de moldes W302 con dureza 230 HB (antes del proceso de templado).

Para realizar la fase de semidesbaste se emplearon herramientas de Mitsubishi de la serie IMPACT MIRACLE ref. VF2SBR0500S10. Fresa integral de metal duro recubierta, con 2 labios, con punta esférica de diámetro de corte $D = 10$ mm y tolerancia de corte radial, $\pm 0,010$ mm. Las condiciones de corte en esta fase fueron las siguientes: $V_c = 200$ m/min y $fz = 0,08$ mm/diente ($S = 6.300$ min⁻¹ y $F = 1.000$ mm/min); profundidades de corte, $Ad = 0,5$ mm y $Rd = 0,5$ mm. Las placas quedan así preparadas para realizar en una única pasada de la profundidad de corte axial Ad , la operación de acabado final.

En la Figura 6.2 se muestra una imagen, donde la herramienta estaba realizando la operación de copiado en la fase de semidesbaste. También se observa la posición del manguito para la lubricación externa con aire a presión.



Figura 6.2. Pieza test en proceso de mecanizado, fase semiacabado.

En la Figura 6.3 se muestra la geometría de la pieza test elaborada. En esta pieza existen diferentes puntos de medición para el control de la rugosidad (1-11), en función de la geometría concreta a controlar.

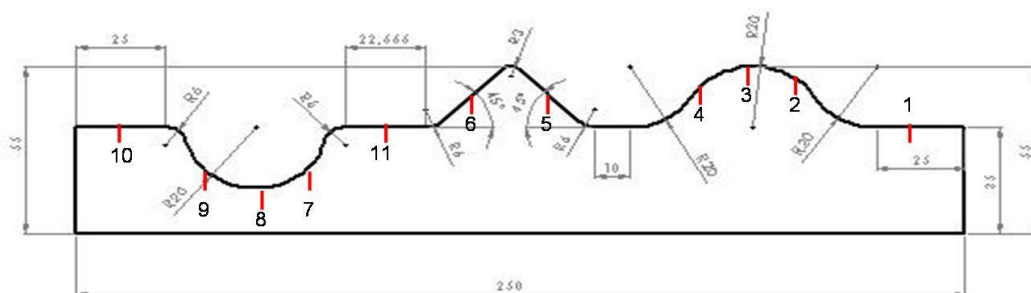


Figura 6.3. Placa material ref. W302-X de la pieza test compleja.

Tal como se observa en la Figura 6.2 y se detalla en la Tabla 6.1, por una parte, se plantearon zonas con superficies planas con inclinación a 0° y a 45° , con respecto a la línea horizontal. Por otro lado se mecanizaron zonas con superficies curvas cóncavas y convexas, de igual radio de curvatura $R_c = 20$ mm. Zonas con trayectorias ascendentes (subidas) y descendentes (bajadas) para cada condición de corte, entre los puntos de control (1-11).

Tabla 6.1. Puntos de control de medición de rugosidad en pieza test.

1	Zona plana a la entrada de pieza
10	Zona plana a la salida de pieza
2,3,4	Zona curva convexa: 2-subida, 3-centro, 4-bajada
5,6	Zona inclinada 45° : 5-subida, 6-bajada
7,8,9	Zona curva cóncava: 7-bajada, 8-centro, 9-subida
11	Zona plana intermedia

Para cada experimento se mecanizó un ancho de corte sobre la pieza de 10 mm, de esta forma se podían realizar 10 experimentos por pieza. La longitud de mecanizado por pasada (por profundidad de corte radial), a lo largo del eje Y , fue de unos 293,2 mm. Las placas se colocaron en máquina, con la disposición tal como se muestra en la Figura 6.4.

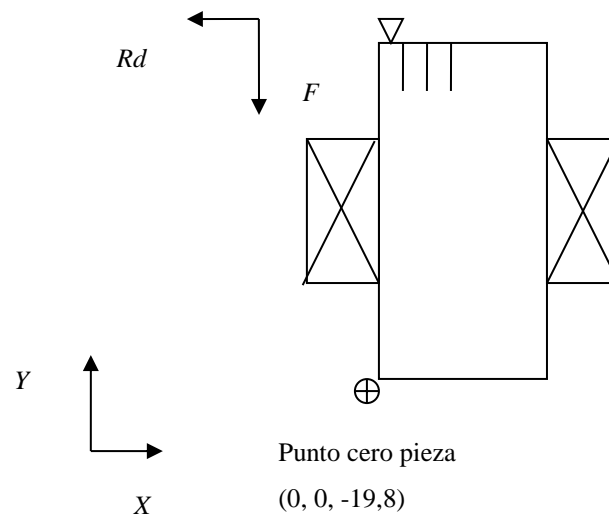


Figura 6.4. Posicionamiento de la pieza test en máquina.

Otras especificaciones básicas de los experimentos realizados en la fase de acabado fueron las siguientes:

- Portapinzas térmico MST A63-SLK12-75 CON PINZA CR12-6-35.
- Herramienta de corte del fabricante Mitsubishi:
 - Fresa integral de metal duro de 2 labios, con punta esférica, $D = 6$ mm, ref. VF2SBR0300S06.
 - Fresa con nanorecubrimiento IMPACT MIRACLE, base (Al, Ti, Si)N.
 - Tolerancia de corte radial: $\pm 0,005$ mm.
- Verificación del salto de los 2 labios de la herramienta a 45° menor a $0,005$ mm.
- Voladizo de herramienta: 22,5 mm.
- Lubricación: aire a presión mediante manguito externo.
- Longitud de amarre de placa: ancho de 200 mm y altura de 20 mm.
- Longitud de entrada, antes de tocar pieza, fijada en 30 mm, donde se aplicó el avance programado.
- Programa CAM: POWERMILL v.6.
- Tolerancia cordal: 0,01 mm.

Por otra parte se realizaron experimentos en 3 centros de mecanizado diferentes. Las especificaciones concretas de los experimentos realizados fueron las siguientes:

- a) En Centro tecnológico ASCAMM. Ref. probeta W302-6:
- Máquina: Centro de mecanizado *Deckel Maho 105V linear* con CN *Heidenhain iTNC530*. Tiempo de proceso de bloque de programa: 1 ms.
 - Mordaza hidráulica *Arnold MAT 125*.

En la Figura 6.5 se muestra la máquina, el posicionamiento de la mordaza en el centro de la mesa de trabajo de la máquina y la posición de una placa de ensayo.



Figura 6.5. Centro de mecanizado Deckel DMC 105 V linear F. ASCAMM.

- b) En la empresa moldista TECNOPERFIL. Ref. probeta W302-7:
- Máquina: Centro de mecanizado Makino V33, $S_{m\acute{a}x} = 20.000 \text{ min}^{-1}$, con CN FANUC PROF.6.
 - Mordaza hidráulica *Arnold MAT 125*. Tiempo de proceso de bloque de programa: 1 ms.
- c) En la Fundació CIM. Ref. probeta W302-4:
- Máquina: Centro de mecanizado *Deckel Maho modelo DMU 50 eVolution*, $S_{m\acute{a}x} = 18.000 \text{ min}^{-1}$, con CN *Heidenhain iTNC430*. Tiempo de proceso de bloque de programa: 4 ms.
 - Mordaza mecánica *Gerardi 125*.

Para visualizar y comparar el acabado superficial obtenido en la experimentación se utilizó el microscopio Mitutoyo QUICK VISION. En la Figura 6.6 se muestra un ejemplo de la colocación de la pieza test en el microscopio para la toma de imágenes del punto de medición 4.

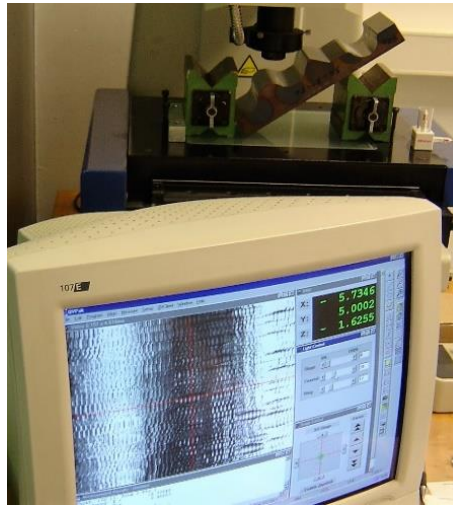


Figura 6.6. Toma de imágenes del acabado superficial.

6.2. Diseño de experimentos en pieza test.

En primer lugar se realizó un diseño de experimentos factorial, 2^4 con 2 niveles, 4 factores, tal como se muestra en la Tabla 6.2, con las distintas condiciones de corte de la experimentación, tal como se muestra en la Tabla 6.3, con los 16 experimentos principales. Además se añadieron 4 puntos centrales (Tabla 6.4) y 8 puntos centrados en los extremos (Tabla 6.5). Para considerar las variaciones del sistema como es el desgaste de la herramienta y las vibraciones, se realizaron 2 réplicas, por lo que el número de experimentos realizados fue de 56.

Tabla 6.2. Condiciones de corte del diseño de experimentos pieza test.

Factores / Niveles	Mín.	Máx.
Prof. de corte axial: Ad [mm]	0,05	0,20
Prof. de corte radial: Rd [mm]	0,05	0,20
Avance por diente: f_z [mm/diente]	0,02	0,06
Velocidad de corte: Vc [m/min]	150	300

En la Tabla 6.3, Tabla 6.4 y Tabla 6.5 se muestran las condiciones de corte para cada experimento y se presentan los resultados de la rugosidad Ra media (\bar{x}_m , promedio de los 11 puntos de medición de control). Se muestra también su desviación estándar, s_m y el error de repetibilidad, R .

Tabla 6.3. Condiciones de corte y resultados de Ra , en el diseño de experimentos de la pieza test.

N	Ad [mm]	Rd [mm]	fz [mm/diente]	Vc [m/min]	\bar{x}_m [μm]	s_m [μm]	R [μm]
1	0,05	0,05	0,02	150	0,38	0,2	0,65
2	0,2	0,05	0,02	150	0,29	0,15	0,61
3	0,05	0,2	0,02	150	0,59	0,18	0,68
4	0,2	0,2	0,02	150	0,68	0,3	1,01
5	0,05	0,05	0,06	150	0,34	0,1	0,41
6	0,2	0,05	0,06	150	0,35	0,08	0,27
7	0,05	0,2	0,06	150	0,51	0,07	0,33
8	0,2	0,2	0,06	150	0,61	0,16	0,6
9	0,05	0,05	0,02	300	0,32	0,13	0,51
10	0,2	0,05	0,02	300	0,31	0,13	0,55
11	0,05	0,2	0,02	300	0,55	0,12	0,56
12	0,2	0,2	0,02	300	0,59	0,22	0,78
13	0,05	0,05	0,06	300	0,29	0,07	0,26
14	0,2	0,05	0,06	300	0,26	0,06	0,25
15	0,05	0,2	0,06	300	0,59	0,2	0,75
16	0,2	0,2	0,06	300	0,59	0,22	0,94

Tabla 6.4. Condiciones y resultados de Ra para los experimentos en los 4 puntos centrales del diseño de experimentos.

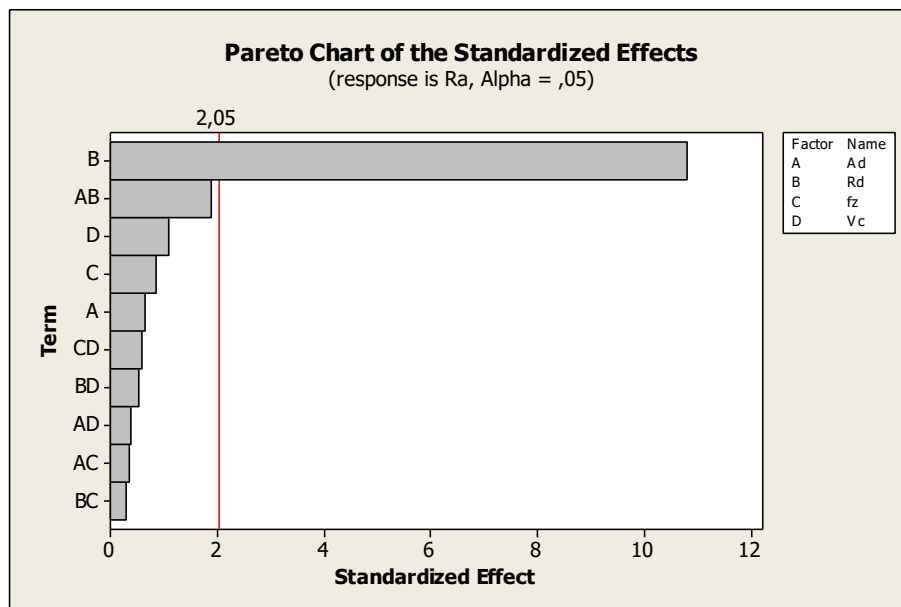
N	Ad [mm]	Rd [mm]	fz [mm/diente]	Vc [m/min]	\bar{x}_m [μm]	s_m [μm]	R [μm]	
17	0,125	0,125	0,04	225	0,4	0,11	0,31	
18	0,125	0,125	0,04	225	0,4	0,12	0,39	
19	0,125	0,125	0,04	225	0,39	0,12	0,4	
20	0,125	0,125	0,04	225	0,37	0,13	0,62	
					\bar{x}_m	0,39	0,12	0,43
					s_m	0,01	0,01	0,13
					R	0,03	0,02	0,31

Tabla 6.5. Condiciones y resultados de Ra para los experimentos en 5 puntos centrados del diseño de experimentos.

N	Ad [mm]	Rd [mm]	fz [mm/diente]	Vc [m/min]	\bar{x}_m [μm]	s_m [μm]	R [μm]
21	0,05	0,125	0,04	225	0,40	0,10	0,35
22	0,20	0,125	0,04	225	0,35	0,13	0,53
23	0,125	0,05	0,04	225	0,30	0,12	0,55
24	0,125	0,20	0,04	225	0,56	0,12	0,59
25	0,125	0,125	0,02	225	0,41	0,17	0,65

6.2.1. Modelo predictivo global para la pieza test.

Con el análisis estadístico del diseño de experimentos, se obtuvo una expresión estimativa del parámetro de rugosidad, Ra promedio para todos los puntos de medición, al considerar las 2 réplicas. La primera aplicación del análisis de regresión considera los 4 factores principales y sus correspondientes 6 interacciones de dos factores. En la Figura 6.7 se muestra el diagrama de Pareto del análisis estadístico donde se comprueba como el factor significativo para este modelo es la profundidad de corte radial, Rd .

**Figura 6.7.** Diagrama de Pareto para los efectos e interacciones del modelo global.

En la Tabla 6.6 se comprueba también como sólo la profundidad de corte radial, Rd , tiene un significativo impacto sobre el parámetro de rugosidad, Ra y, con el análisis de regresión para los factores principales e interacciones, realizado a partir del uso del software MINITAB v.14.

Tabla 6.6. Análisis de regresión con todos los factores principales y las interacciones de segundo orden.

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		0,45563	0,01260	36,16	0,000
<i>Ad</i>	0,01625	0,00813	0,01260	0,64	0,524
<i>Rd</i>	0,27250	0,13625	0,01260	10,81	0,000
<i>fz</i>	-0,02125	-0,01062	0,01260	-0,84	0,406
<i>Vc</i>	-0,02750	-0,01375	0,01260	-1,09	0,285
<i>Ad*Rd</i>	0,04750	0,02375	0,01260	1,88	0,070
<i>Ad*fz</i>	0,00875	0,00437	0,01260	0,35	0,731
<i>Ad*Vc</i>	-0,01000	-0,00500	0,01260	-0,40	0,695
<i>Rd*fz</i>	-0,00750	-0,00375	0,01260	-0,30	0,768
<i>Rd*Vc</i>	0,01375	0,00688	0,01260	0,55	0,590
<i>fz*Vc</i>	0,01500	0,00750	0,01260	0,60	0,557
Ct Pt		-0,06313	0,02818	-2,24	0,033
S = 0,0712860		R-Sq = 82,14%		R-Sq(adj) = 75,13%	

Al considerar sólo el factor más significativo, se obtiene un modelo nuevo con un mejor ajuste R^2 del 77,8%, (Tabla 6.7) con una curvatura significativa, por lo cual un modelo cuadrático en función de la profundidad de corte radial *Rd*, puede predecir el valor de la rugosidad *Ra*, en el modelo global.

Tabla 6.7. Análisis de regresión final con el factor más significativo *Rd*.

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P	
Constant		0,45563	0,01224	37,23	0,000	
<i>Rd</i>	0,27250	0,13625	0,01224	11,13	0,000	
Ct Pt		-0,06313	0,02736	-2,31	0,027	
S = 0,0692211		R-Sq = 77,75%		R-Sq(adj) = 76,55%		
Analysis of Variance for <i>Ra</i> (coded units)						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	1	0,59405	0,59405	0,594050	123,98	0,000
Curvature	1	0,02550	0,02550	0,025503	5,32	0,027
Residual Error	37	0,17729	0,17729	0,004792		
Pure Error	37	0,17729	0,17729	0,004792		
Total	39	0,79684				

En la Figura 6.8 se muestra la gráfica de la probabilidad normal de los residuos y en la Figura 6.9 se muestra la gráfica de los residuos versus el número de observaciones del modelo global. Las dos gráficas muestran un comportamiento satisfactorio, los residuos se comportan en forma aleatoria en torno a cero.

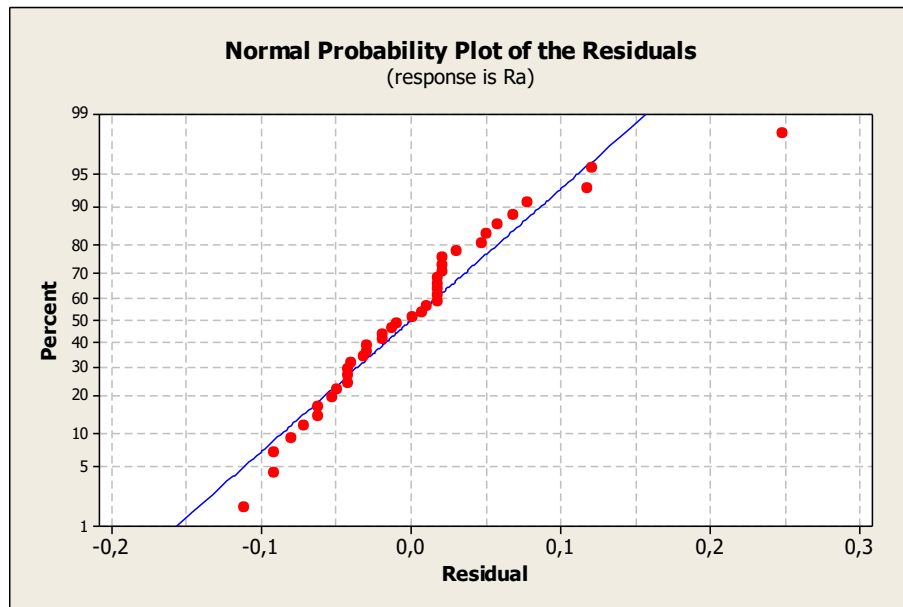


Figura 6.8. Gráfica de la Probabilidad normal de los residuos en modelo global.

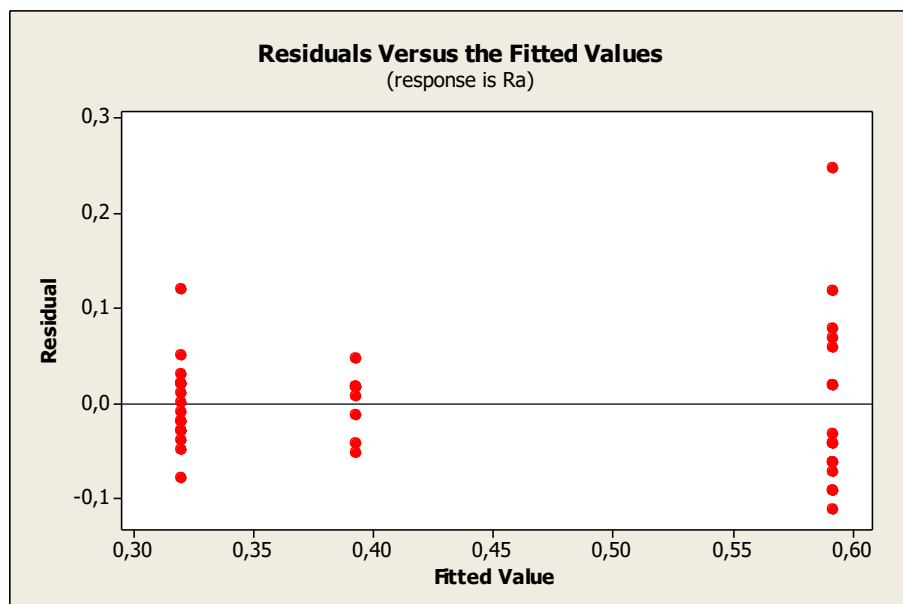


Figura 6.9. Gráfica de Residuos versus número de observaciones en modelo global.

De nuevo para determinar la ecuación que mejor se ajusta a los datos experimentales se plantearon varias regresiones lineales y no lineales. En la Tabla 6.8 se muestran las diferentes ecuaciones utilizadas en este análisis. Una vez obtenidos los diferentes modelos, se determina la varianza residual de cada uno de ellos y se aplica el test de Fisher, para aceptar o rechazar la hipótesis de linealidad, a cada uno de los modelos. El propósito de aplicar el test de Fisher es analizar si la transformación aplicada hace lineales los datos observados.

Tabla 6.8. Ecuaciones de regresión lineales y no lineales.

Nº	Ecuación	Variancia residual	Test de Fisher
1	$Ra = a \cdot Rd + b$	0,11	No admite hipótesis de linealidad
2	$\ln(Ra) = a \cdot \ln(Rd) + \ln(b)$	0,74	No admite hipótesis de linealidad
3	$\sqrt{Ra} = a \cdot Rd + b$	0,10	No admite hipótesis de linealidad
4	$Ra^2 = a \cdot Rd + b$	0,11	No admite hipótesis de linealidad
5	$Ra = a \cdot Rd^2 + b$	0,05	Admite hipótesis de linealidad

Sólo una transformación, $(Rd)^2$, linealiza los datos observados. Por lo tanto, sólo se utiliza esta ecuación para predecir la rugosidad Ra . También, se observa en la Tabla 6.8 que una varianza residual igual a 0,05 es la menor encontrada para esta ecuación. Finalmente se obtiene la Ec. 6.1 del modelo predictivo global, donde si se aplican los valores de Rd , empleados en la experimentación, se obtiene el valor medio de Ra (Ra_{med}) y sus valores máximos y mínimos ($Ra_{máx}$ y $Ra_{mín}$) mostrados en la Tabla 6.9 y en la Figura 6.10.

$$Ra = 7,330^{\pm 0,125} \cdot R_d^2 + 0,300^{\pm 0,020}$$

Ec. 6.1

Tabla 6.9. Valores de rugosidad Ra , según el modelo predictivo global.

Rd [mm]	$Ra_{mín}$ [μm]	Ra_{med} [μm]	$Ra_{máx}$ [μm]
0,05	0,30	0,32	0,34
0,125	0,39	0,41	0,44
0,20	0,57	0,59	0,62

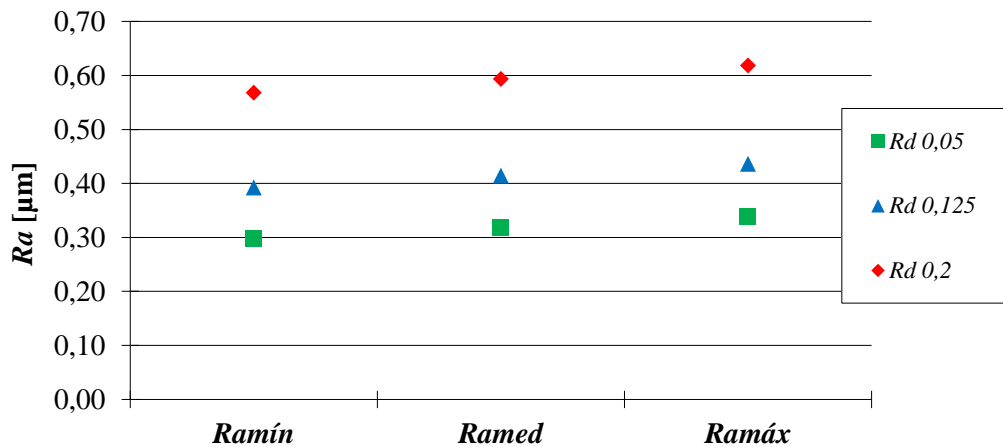


Figura 6.10 Valores de rugosidad Ra según el modelo para distintos Rd [mm].

6.2.2. Validación modelo global.

Para la validación de la ecuación del modelo global calculado anteriormente (Ec. 6.1), se utilizaron 5 puntos estrella del diseño de experimentos en la 1ª prueba y en su réplica (en total 10 puntos de observación), experimentos que no se utilizaron para obtener la Ec. 6.1.

En la Figura 6.11 se muestran los errores o residuos estandarizados calculados a partir de la Ec. 3.11, como diferencia de los valores de rugosidad Ra obtenidos en los puntos estrella del diseño de experimentos y los valores de $Ramed$ dados por la ecuación del modelo global (Ec. 6.1), para cada uno de los valores de profundidad de corte radial Rd ensayado, tal como se mostraba en la Tabla 6.9. Se observa un comportamiento aleatorio en torno a cero, con un valor máximo del residuo del 18,0% para la rugosidad $Ramed = 0,41 \mu\text{m}$ y $Rd = 0,125 \text{ mm}$, por lo que se considera un comportamiento de los residuos satisfactorio. En este valor máximo del residuo para $Ramed$, debe tenerse en cuenta la variabilidad del resultado del modelo predictivo que aporta un valor de rugosidad máxima ($Ramáx = 0,44 \mu\text{m}$) y un valor de rugosidad mínimo ($Ramín = 0,39 \mu\text{m}$), lo que aporta un valor de residuo máximo ($ermáx = 26,7 \%$) y un valor de residuo mínimo ($ermín = 12,3 \%$).

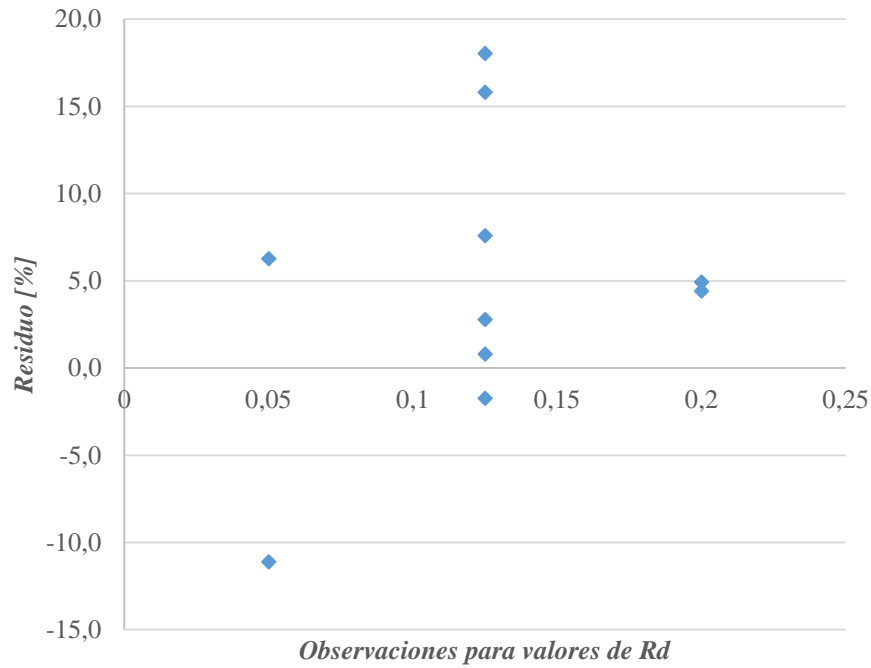


Figura 6.11. Residuos en puntos estrella en función de R_d [mm].

6.2.3. Análisis alternativo de los resultados obtenidos.

Un análisis alternativo y comparativo de los resultados obtenidos en el diseño de experimentos puede realizarse a partir de la Figura 6.12, donde se muestran los valores máximos, mínimos y medios que reflejan los intervalos de rugosidad, R_a para los 28 ensayos del diseño de experimentos, con los 11 puntos de medición de control por experimento, con los ensayos en la 1ª prueba y su réplica (tamaño de muestra igual a 22 valores, para cada experimentación).

En este caso se obtuvieron los intervalos ampliados de rugosidad R_a , con el valor medio y los extremos ($R_{amín}$, R_{amed} , $R_{amáx}$) con el factor de seguridad $t = 2,08$, estadístico hallado en las tablas de la prueba de t -Student, para un intervalo de confianza del 95%.

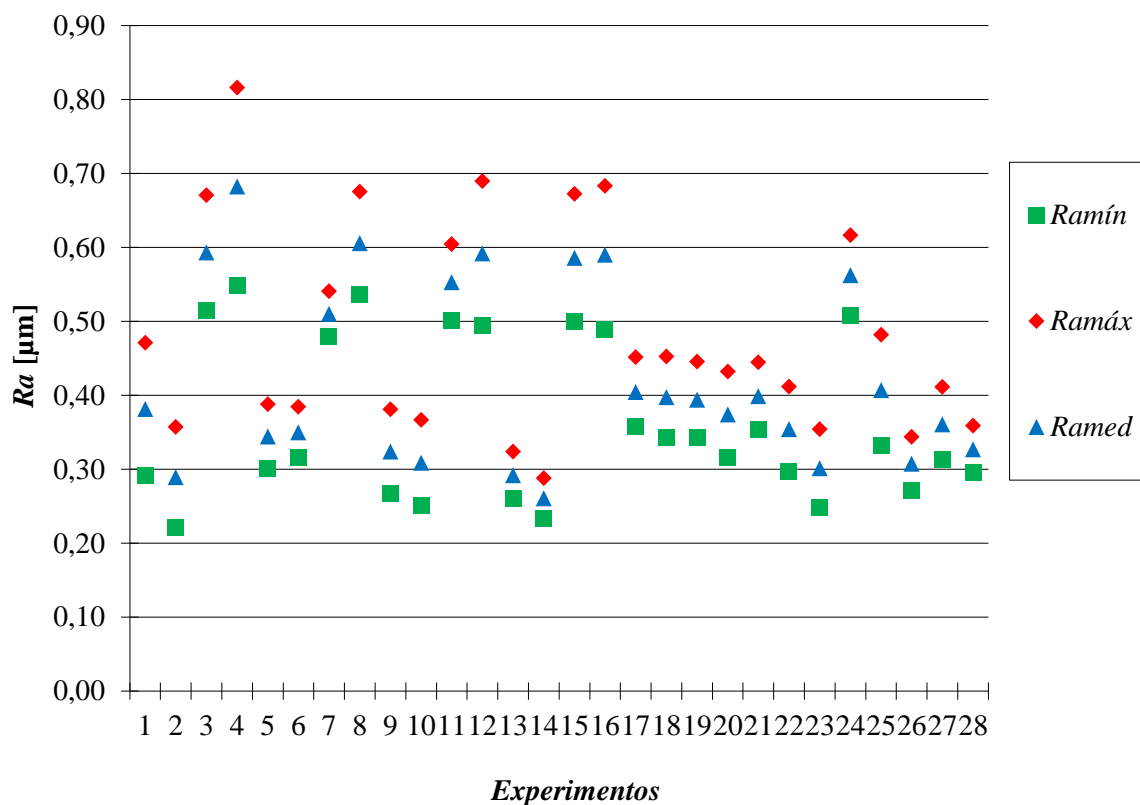


Figura 6.12. Valores máximos, medios y mínimos de Ra para los distintos experimentos.

En la Figura 6.12 pueden observarse, al menos 3 grupos diferenciados de intervalos de rugosidad solapados. Un primer grupo, de mayor rugosidad, conformado por los experimentos 3, 4, 7, 8, 11, 12, 15, 16, 24. Estos experimentos tienen en común, la profundidad de corte radial mayor, $Rd = 0,20$ mm. Dentro de este grupo, el experimento 4 (con las mayores profundidades de corte y menor avance por diente y menor velocidad de corte), obtuvo el mayor valor medio de rugosidad $Ra = 0,68 \mu\text{m}$, el mayor error de repetibilidad ($1,01 \mu\text{m}$), con el máximo valor de Ra (Punto 1 plano, réplica $Ra = 1,35 \mu\text{m}$). En este experimento se establecen las mayores diferencias entre la 1ª prueba y su réplica en los puntos planos horizontales 1, 10, 11 y en los puntos horizontales de las zonas curvas 3 y 8. En todos estos puntos se produce la coincidencia que la velocidad de corte efectiva es la mínima, en función de la profundidad de corte axial.

Un segundo grupo de ensayos, conformado por los experimentos 1, 2, 5, 6, 9, 10, 13, 14, 23. Estos experimentos tienen en común, la profundidad de corte radial menor, $Rd = 0,05$ mm. Dentro de este grupo, el experimento 14 (con la mayor profundidad de corte axial, avance por diente y velocidad de corte), obtuvo el menor valor medio de Ra ($0,26 \mu\text{m}$) y el menor error de repetibilidad ($0,25 \mu\text{m}$).

Respecto a los puntos de medición, en el punto plano 1, se obtuvo el valor de rugosidad más bajo, $Ra = 0,17 \mu\text{m}$. El experimento 1 obtuvo el mayor valor medio de Ra ($0,38 \mu\text{m}$) y el mayor error de repetibilidad ($R = 0,65 \mu\text{m}$), debido principalmente a la réplica de los puntos horizontales en la superficie curva convexa (punto 3, $Ra = 0,80 \mu\text{m}$) y cóncava (punto 8, $Ra = 0,83 \mu\text{m}$).

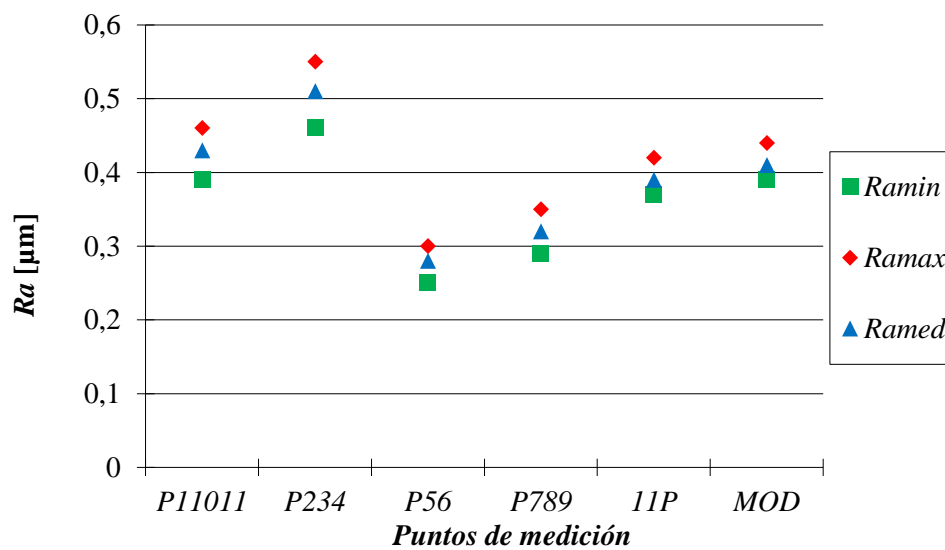
En un tercer grupo, con una profundidad de corte radial intermedia, $Rd = 0,125 \text{ mm}$, se encuentran los experimentos 17, 18, 19 y 20 (puntos centrales del diseño de experimentos), con iguales condiciones de corte, y los experimentos 21, 22, 26, 27, 28 (puntos estrella del diseño de experimentos). Dentro de este grupo, el experimento 26 (con condiciones de corte intermedias a excepción de un avance por diente alto), obtuvo el menor valor medio de rugosidad $Ra = 0,31 \mu\text{m}$ y el menor error de repetibilidad ($0,26 \mu\text{m}$). Respecto a los puntos de medición del experimento 26, en punto 1 plano y el punto 6 inclinado de bajada obtuvo el valor de rugosidad más bajo, $Ra = 0,21 \mu\text{m}$, seguido del punto 10 plano y el punto 7 (superficie cóncava de bajada) obtuvo el valor de rugosidad, $Ra = 0,22 \mu\text{m}$.

Con los datos obtenidos en los experimentos de los puntos centrales, se pueden calcular los datos estadísticos relevantes y obtener una visión de la variabilidad de la medida de la rugosidad, tal como se muestra en la Figura 6.12. Por ejemplo, la media o valor promedio de la rugosidad Ra , para los 4 experimentos, en los 11 de puntos de medición, con las 2 réplicas (88 puntos de medición), es $0,39 \mu\text{m}$ (Tabla 6.4). El error de repetibilidad global respecto a estos experimentos, de la media de rugosidad, Ra es de $0,43 \mu\text{m}$. Y el máximo error de repetibilidad entre todos los puntos medidos de $0,62 \mu\text{m}$.

Para esta pieza test, con todos los experimentos realizados en este diseño de experimentos se puede elaborar un modelo predictivo global para todos los puntos de medición controlados (puntos del 1 al 11) y se podrían elaborar unos modelos predictivos más adaptados a las características geométricas propias de los distintos puntos, tal como se indica en la Tabla 6.1: puntos en zonas planas (puntos 1, 10 y 11); puntos en zonas inclinadas planas (5, 6), puntos en zona curva convexa (2,3,4) y en curva concava (7, 8, 9). Para comprobar este hecho se ha elaborado la Tabla 6.10 y la Figura 6.13, en los 4 experimentos de los puntos centrales (experimentos 17, 18, 19 y 20), para los distintos grupos de puntos de medición geométricos, con los intervalos ampliados (valores de $R_{\text{mín}}$, R_{med} , $R_{\text{máx}}$) afectados por el factor de seguridad correspondiente a cada tamaño de muestra, para un intervalo de confianza del 95%, considerando los experimentos de la 1ª prueba y su réplica.

Tabla 6.10. Intervalos de rugosidad ampliados de Ra [μm] según los grupos de puntos de medición.

Puntos	<i>P11011</i>	<i>P234</i>	<i>P56</i>	<i>P789</i>	<i>11P</i>	<i>MOD</i>
<i>Ramín</i>	0,39	0,46	0,25	0,29	0,37	0,39
<i>Ramáx</i>	0,46	0,55	0,30	0,35	0,42	0,44
<i>Ramed</i>	0,43	0,51	0,28	0,32	0,39	0,41
<i>n</i>	24	24	16	24	88	
<i>t</i>	2,07	2,07	2,13	2,07	1,99	
ϵ_T	0,015	0,021	0,011	0,015	0,013	

**Figura 6.13.** Gráfica de intervalos de rugosidad ampliados según los grupos de puntos de medición.

Con la Tabla 6.10 y como se muestra en la Figura 6.13, queda claro el solapamiento de los intervalos de rugosidad Ra dados por el modelo (*MOD*), por los 11 puntos de medición (*11P*) y por los puntos planos (*P11011*). El grupo con los puntos de la superficie curva convexa (*P234*) tiene el intervalo con valores de rugosidad más elevado ($Ramáx = 0,55 \mu\text{m}$) y el grupo con los puntos planos de la superficie inclinada (*P56*) tiene el intervalo con valores de rugosidad más bajo ($Ramín = 0,25 \mu\text{m}$).

Si se utiliza el modelo predictivo hallado anteriormente en la pieza semicilindro (superficie curva convexa con radio $R_c \sim 20 \text{ mm}$, para corte en concordancia, mostrado en la Ec. 4.1, con las condiciones de corte de los experimentos centrales 17-20 ($Ad = 0,125 \text{ mm}$, $Rd = 0,125 \text{ mm}$, $fz = 0,04 \text{ mm/diente}$, $Vc = 225 \text{ m/min}$), se calcula una rugosidad $Ra(A) = 0,27 \mu\text{m}$. Este es un valor muy inferior al valor dado para el intervalo ampliado, mostrado en la Tabla 6.10, para los puntos de medición 2, 3, 4 (*P234*), donde el valor medio de rugosidad Ra es igual a $0,51 \mu\text{m} \pm 0,04 \mu\text{m}$.

6.3. Estudio de la influencia de otros parámetros de mecanizado.

A continuación se muestra el desarrollo de una batería de experimentos que permiten validar y/o contrastar el modelo analítico anterior y analizar los resultados en función de la influencia de los distintos parámetros de mecanizado evaluados.

En el presente estudio se planteó el experimento 16, con las condiciones de corte más elevadas establecidas en el diseño de experimentos desarrollado en el estudio anterior del apartado 6.2 (Tabla 6.11). Con estas condiciones de corte y para analizar otros parámetros de mecanizado (diferentes máquinas-herramienta y programas de mecanizado) se planteó variar la tolerancia cordal en tres niveles, en tres experimentos adicionales: 16-0,01mm; 16.1-0,001mm; 16.5-0,005 mm.

Con las condiciones de corte máximas mostradas en la Tabla 6.11, para una profundidad de corte radial, $Rd = 0,20$ mm, la rugosidad Ra del modelo global de la pieza test, como promedio a los 11 puntos de medición de rugosidad, $Ra_M = 0,59$ μm (Tabla 6.9), con valores mínimos y máximos de Ra_M , de $0,57$ μm y $0,62$ μm , respectivamente.

Tabla 6.11. Condiciones de corte del experimento 16.

V_c [m/min]	S [min ⁻¹]	f_z [mm/diente]	F [mm/min]	Rd [mm]	Ad [mm]
300	15.925	0,06	1.910	0,20	0,20

Al realizar el conjunto de los 3 experimentos con distinta tolerancia cordal sobre una placa, se comprueba que el desgaste de la herramienta en la cara de incidencia al finalizar todos los experimentos no es significativo. Aun así, se empleó una herramienta nueva en cada experimentación.

6.3.1. Influencia de distintos centros de mecanizado.

A continuación se analizan los resultados de los experimentos realizados en distintas empresas (Fundación ASCAMM, Moldista y Fundació CIM), con sus correspondientes centros de mecanizado,

tal como se detallaba en el apartado 6.1, con las condiciones de corte del experimento 16 (Tabla 6.11) y para los 3 niveles de tolerancia cordal establecidos.

6.3.1.1. Resultados en Fundació ASCAMM.

Respecto a las pruebas realizadas en Fundació ASCAMM, en el experimento 16 con tolerancia cordal, 0,01 mm, aparece un acabado superficial heterogéneo, con un rayado excepcional (Figura 6.14) en el sentido del avance lineal (flecha azul), en todas las superficies, especialmente en las superficies curvadas, con un acabado superficial no homogéneo en todos los experimentos, respecto a la rugosidad obtenida con otros centros de mecanizado. En la Figura 6.14(a), a la izquierda de las imágenes se encontraría el punto 2, con trayectoria ascendente de la herramienta, se pasa al punto 3 en el centro y a la derecha el punto 4, con trayectoria descendente de la herramienta.

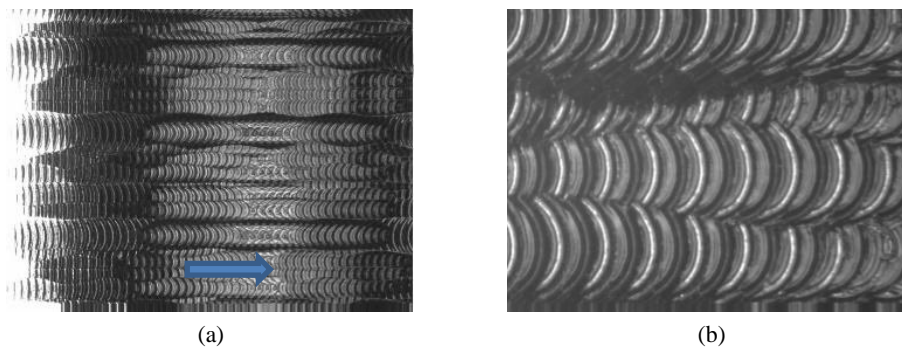


Figura 6.14. Fotografías superficie curva (punto 3) en experimento 16. F. ASCAMM.

$Ra = 1,81 \mu\text{m}$, $RSm = 667 \mu\text{m}$.
Ampliación: (a) 36X y (b) 216X.

En la Figura 6.14 se muestra también el valor de la rugosidad RSm , que pone en evidencia el acabado heterogéneo presente en la superficie curva de la pieza, ya que si el acabado fuera homogéneo, el valor de este parámetro de rugosidad debería ser aproximadamente de $200 \mu\text{m}$, tal como se aprecia en la Figura 6.15.

En el experimento 16.1, cuando se redujo la tolerancia cordal a $0,001 \text{ mm}$, desaparecieron todas las rayas y marcas excepcionales. Se consiguió un mejor acabado superficial, más homogéneo, con una reducción drástica del valor medio de Ra (Figura 6.15) y un valor de RSm , cercano al esperado igual a $200 \mu\text{m}$. Una vez eliminadas las irregularidades presentes en el caso anterior, el valor de Ra se ajusta al intervalo dado por el modelo ($0,57 \mu\text{m} - 0,62 \mu\text{m}$), tal como se indicaba en la Tabla 6.9.

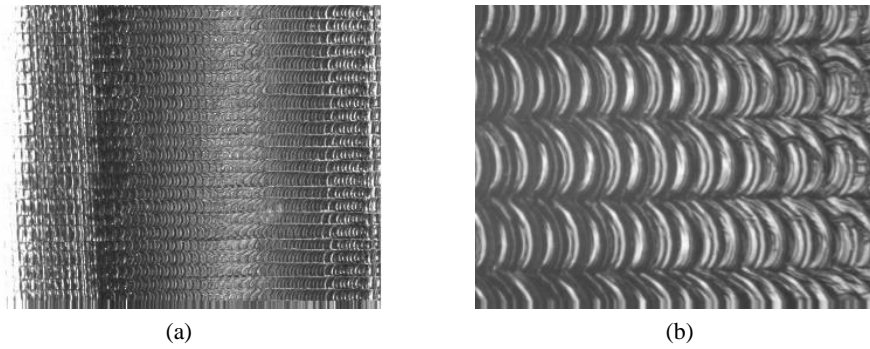


Figura 6.15. Fotografías superficie curva (punto 3) en el experimento 16.1. F. ASCAMM.

$Ra = 0,58 \mu\text{m}$, $RSm = 204 \mu\text{m}$.

Ampliación: (a) 36X y (b) 216X.

En su momento, en consulta, con los técnicos de la máquina y en especial del control numérico Heidenhain, no dieron una respuesta válida al problema expuesto. Pero tal como se comentó en el apartado 2.4, hay dos soluciones posibles delante de este problema. Por una parte, aplicar el ciclo 32 del control numérico Heidenhain, con una tolerancia cordal pequeña, en nuestro caso 0,001 mm. Por otra parte, el control numérico Heidenhain iTNC530 incorporó una función especial para resolver este problema, con la optimización del movimiento por el control (Figura 2.20), para que la superficie presente una rugosidad más homogénea.

En la Figura 6.16 se muestra el gráfico donde se relaciona la rugosidad Ra , frente a los diferentes puntos de medición, en los diferentes experimentos realizados en F. ASCAMM. Se observa la gran dispersión de los valores en los experimentos con tolerancia cordal 0,01 mm. El experimento más estable para todos los puntos de medición ha sido el experimento 16.1, con la tolerancia cordal menor de 0,001 mm.

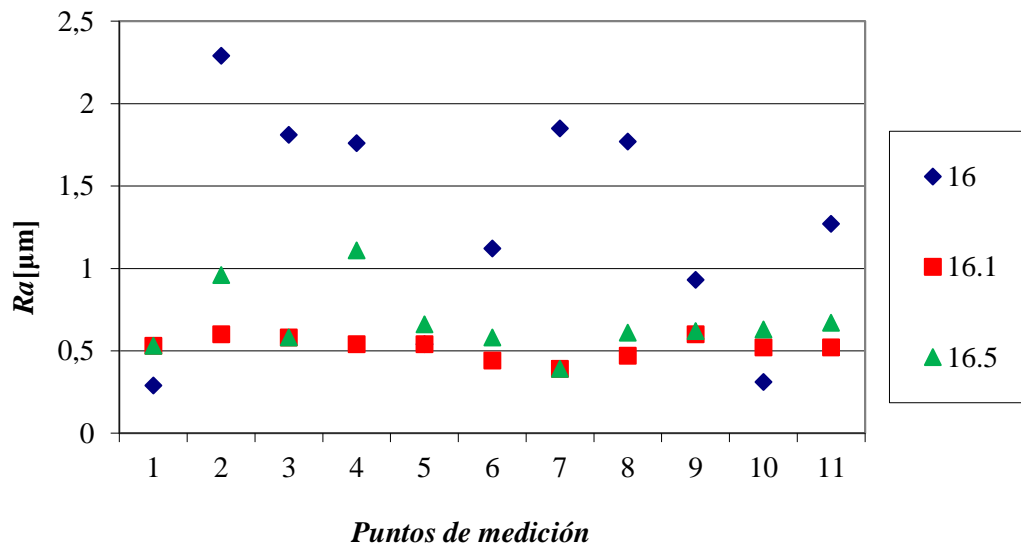


Figura 6.16. Rugosidad Ra en los puntos de medición, para los diferentes experimentos. F. ASCAMM.

En la Tabla 6.12 se observa como el valor mínimo del promedio de la rugosidad ($Ra = 0,52 \mu\text{m}$), desviación y error de repetibilidad de la rugosidad, corresponde al experimento con tolerancia cordal mínima (0,001 mm), con la desaparición total de marcas que aparecieron con tolerancia cordal de 0,005 mm y en mayor número, con la tolerancia cordal de 0,01 mm.

Tabla 6.12. Valores medios de rugosidad Ra [μm], en los puntos de medición. F. ASCAMM.

Exp.	\bar{x}_m	s_m	$x_{m\acute{a}x}$	$x_{m\acute{i}n}$	R
16	1,27	0,72	2,29	0,29	2,00
16.1	0,52	0,07	0,6	0,39	0,21
16.5	0,67	0,21	1,11	0,39	0,72

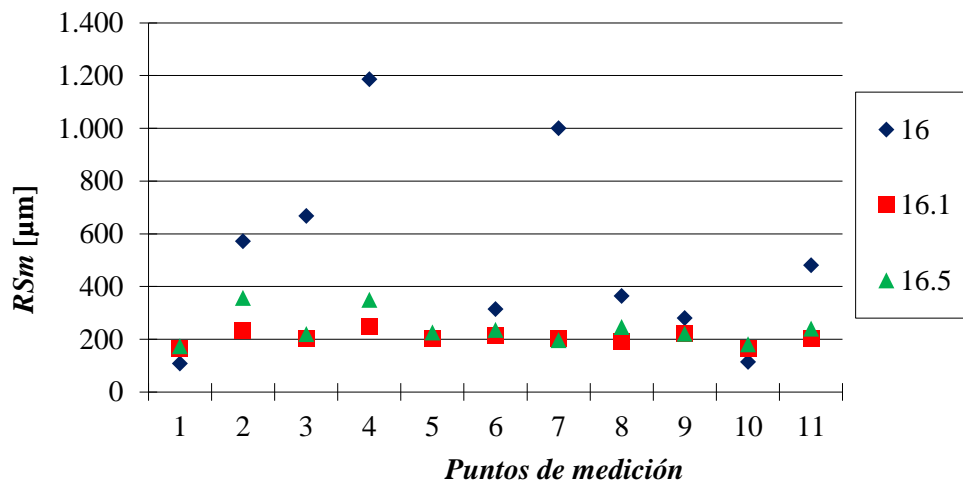


Figura 6.17. Rugosidad RSm en los puntos de medición, para los experimentos. F. ASCAMM.

En la Figura 6.17 y la Tabla 6.13, se observa el rendimiento anómalo de los experimentos con tolerancia cordal 0,01, con una variabilidad de los resultados muy elevada. En especial en el punto 4 y el punto 7

Tabla 6.13. Valores medios de rugosidad RSm [μm], en los puntos de medición. F. ASCAMM.

Exp.	\bar{x}_m	s_m	$x_{m\acute{a}x}$	$x_{m\acute{i}n}$	R
16	481	371	1.186	108	1.078
16.1	204	27	249	165	84
16.5	240	64	357	173	184

6.3.1.2. Resultados en Moldista.

En la Figura 6.18 se muestra el gráfico donde se relaciona la rugosidad Ra , frente a los diferentes puntos de medición, en los diferentes experimentos realizados en la empresa de moldes Tecnoperfil (Moldista).

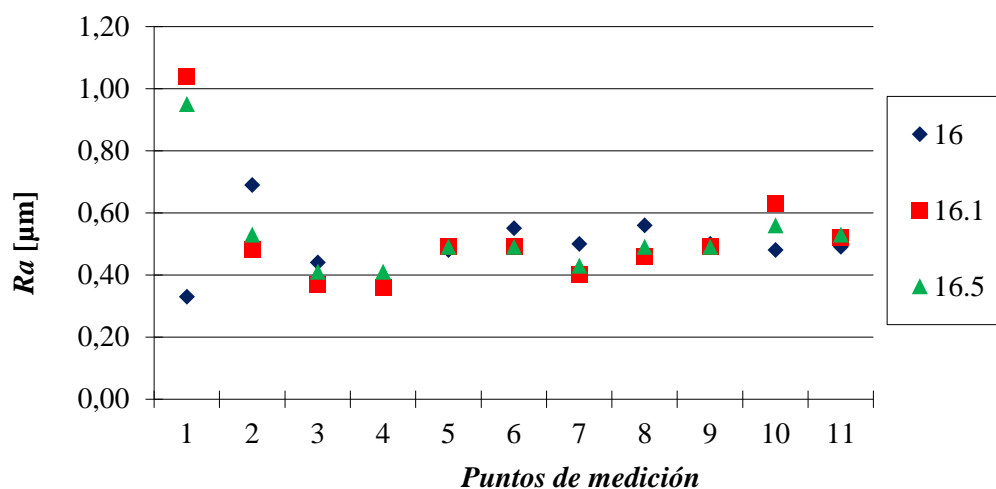


Figura 6.18. Rugosidad Ra en los puntos de medición, para los diferentes experimentos. Moldista.

En la Tabla 6.14 puede observarse como en los experimentos 16, 16.1 y 16.5 (con condiciones de corte iguales y diferentes tolerancias cordales), no existe una diferencia apreciable en los valores de rugosidad (salvo en el punto 1, con un valor máximo de $Ra = 1,04 \mu\text{m}$ en el experimento 16.1), en especial, por los errores de repetibilidad hallados en la experimentación. La dispersión de los valores de rugosidad en este centro de mecanizado son menores que en el caso anterior, y no aparecen las marcas evidentes en los experimentos con la tolerancia cordal de 0,01 mm. Con esta tolerancia cordal se ha obtenido el valor mínimo de $Ra = 0,33 \mu\text{m}$, en el punto 1.

A destacar el valor de rugosidad media $Ra = 1,27 \mu\text{m}$ obtenido en el experimento 16 (tolerancia cordal de 0,01 mm) en F. ASCAMM, mientras que en Moldista (Tabla 6.14), este valor se ha reducido más de un 60% ($Ra = 0,49 \mu\text{m}$).

Tabla 6.14. Valores medios de rugosidad Ra [μm] en los puntos de medición. Moldista.

Exp.	\bar{x}_m	s_m	$x_{m\acute{a}x}$	$x_{m\acute{i}n}$	R
16	0,49	0,10	0,69	0,33	0,36
16.1	0,52	0,20	0,63	0,36	0,27
16.5	0,53	0,16	0,95	0,41	0,54

En la Figura 6.19(b) se aprecia la causa de las marcas presentes en la superficie, en los experimentos con tolerancia cordal de 0,01 mm. De forma aleatoria y concreta la herramienta se introduce en la pieza unas centésimas de milimetro respecto la profundidad de corte axial programada, provocando una mayor anchura entre el rayado dejado por el paso de la herramienta. Defecto superficial que desaparece con la tolerancia cordal de 0,001 mm, tal como se muestra en la Figura 6.20, pero en este caso el valor de la rugosidad RSm está más alejado al valor esperado de $200 \mu\text{m}$ (Figura 6.22).

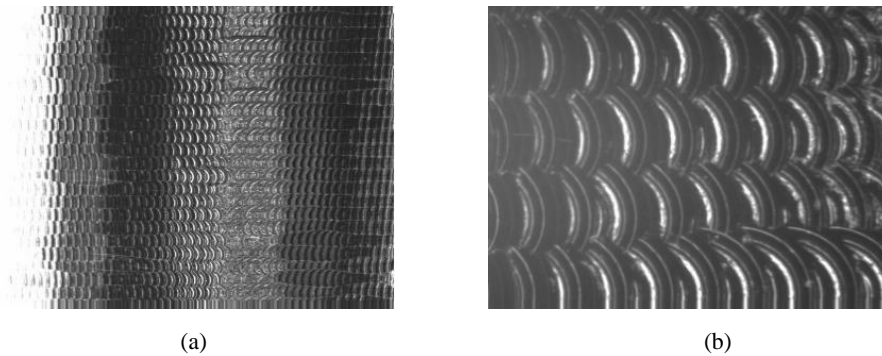


Figura 6.19. Fotografías superficie curva (punto 3) en el experimento 16. Moldista.

$Ra = 0,44 \mu\text{m}$, $RSm = 147 \mu\text{m}$
Ampliación: (a) 36X y (b) 216X.

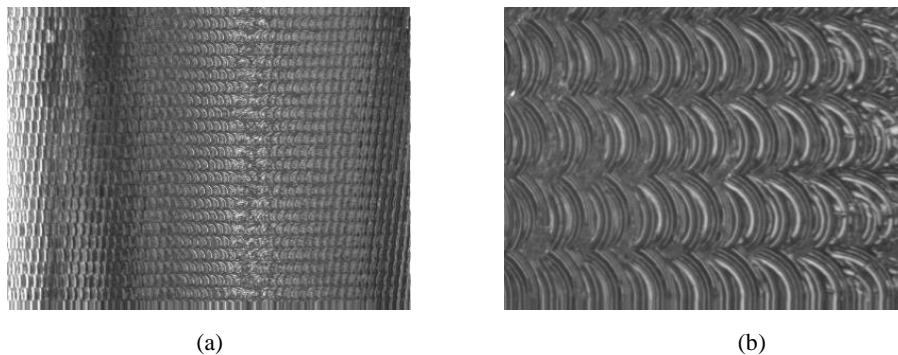


Figura 6.20. Fotografías superficie curva (punto 3) en el experimento 16.1. Moldista.

$Ra = 0,37 \mu\text{m}$, $RSm = 113 \mu\text{m}$
Ampliación: (a) 36X y (b) 216X.

Respecto a los experimentos mostrados en la Tabla 6.14, en la Figura 6.21, se muestran los valores máximos, mínimos y el valor medio que reflejan los intervalos de rugosidad ampliados del parámetro Ra , al ser afectada la medida total resultante, por el factor de seguridad $t = 2,23$ (en $n=11$ puntos de medición), para garantizar un intervalo de confianza del 95%. En la Figura 6.21 se observa claramente el solapamiento de los experimentos, para distintas tolerancias cordales, con una menor dispersión para el experimento 16, con tolerancia cordal 0,01 mm.

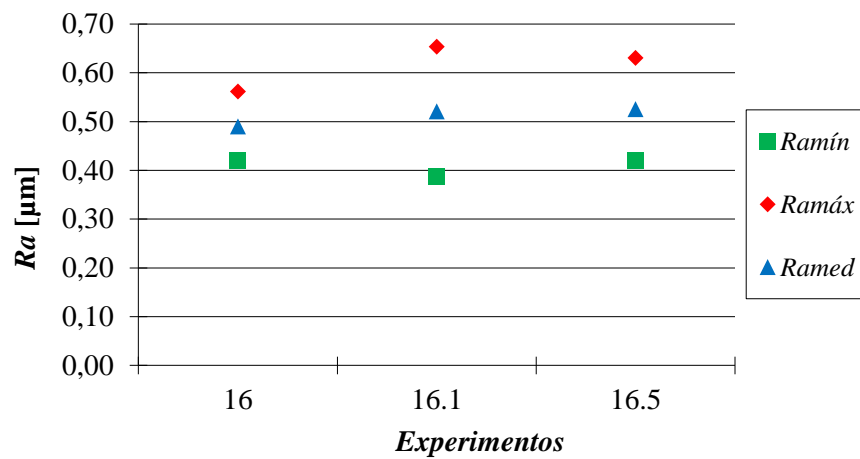


Figura 6.21. Intervalos ampliados de rugosidad Ra en los experimentos. Moldista.

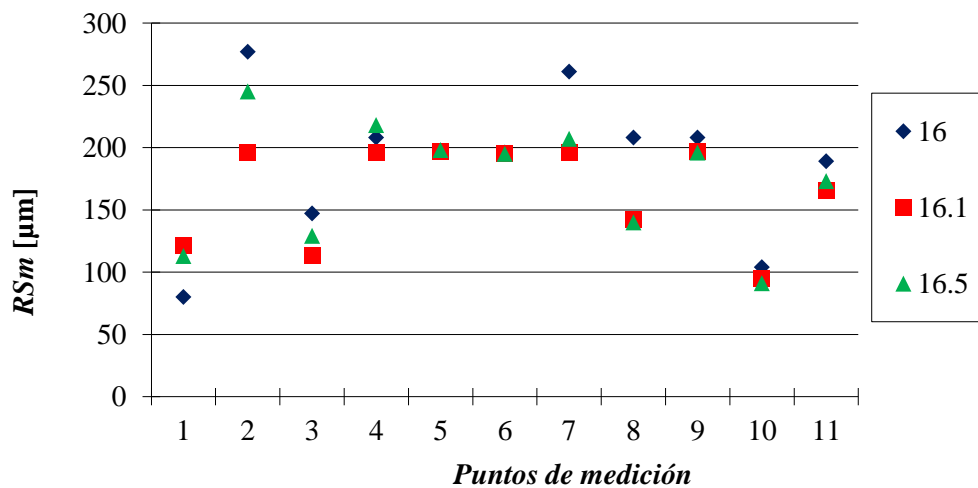


Figura 6.22. Rugosidad RSm en los puntos de medición para cada experimento. Moldista.

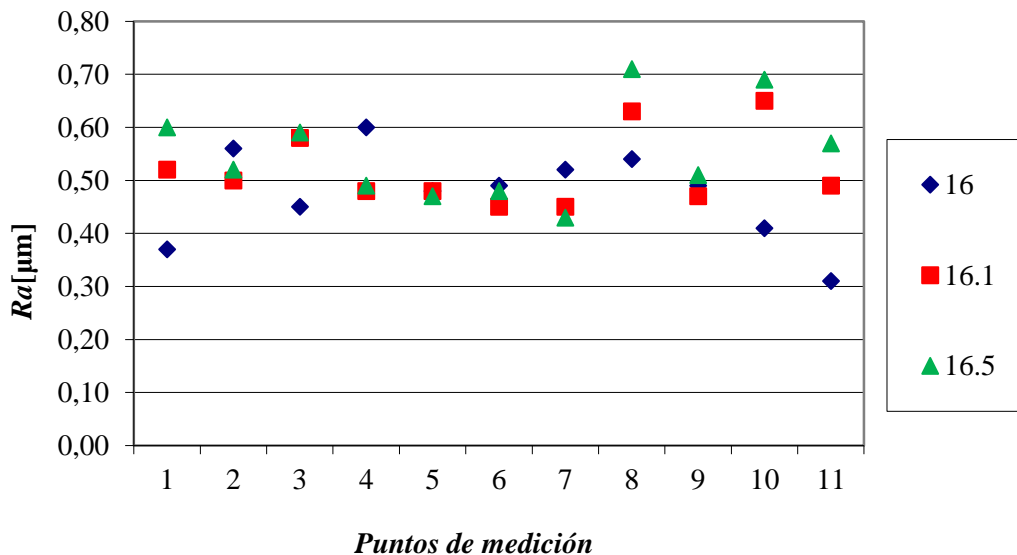
A partir de la observación de la Figura 6.22 y la Tabla 6.15 se comprueba la mayor variabilidad de la rugosidad RSm en el experimento 16, con tolerancia cordal de 0,01 mm, debido al elevado valor, de nuevo, en el punto 2 de la superficie curva convexa, en trayectoria ascendente (máxima rugosidad $RSm = 277 \mu\text{m}$). Por el contrario, el valor mínimo se obtiene con la tolerancia cordal de 0,01 mm, pero en el punto 1 de la superficie plana de entrada en pieza (mínima rugosidad $RSm = 80 \mu\text{m}$). Ambos valores de rugosidad RSm alejados del valor esperado de $200 \mu\text{m}$.

Tabla 6.15. Valores medios de rugosidad RS_m [μm] en los puntos de medición. Moldista.

Exp.	\bar{x}_m	s_m	$x_{m\acute{a}x}$	$x_{m\acute{i}n}$	R
16	189	62	277	80	197
16.1	165	42	197	95	102
16.5	173	51	245	91	154

6.3.1.3. Resultados en Fundació CIM.

En la Figura 6.23 se muestra el gráfico donde se relaciona la rugosidad Ra , frente a los diferentes puntos de medición, en los diferentes experimentos realizados en la Fundació CIM.

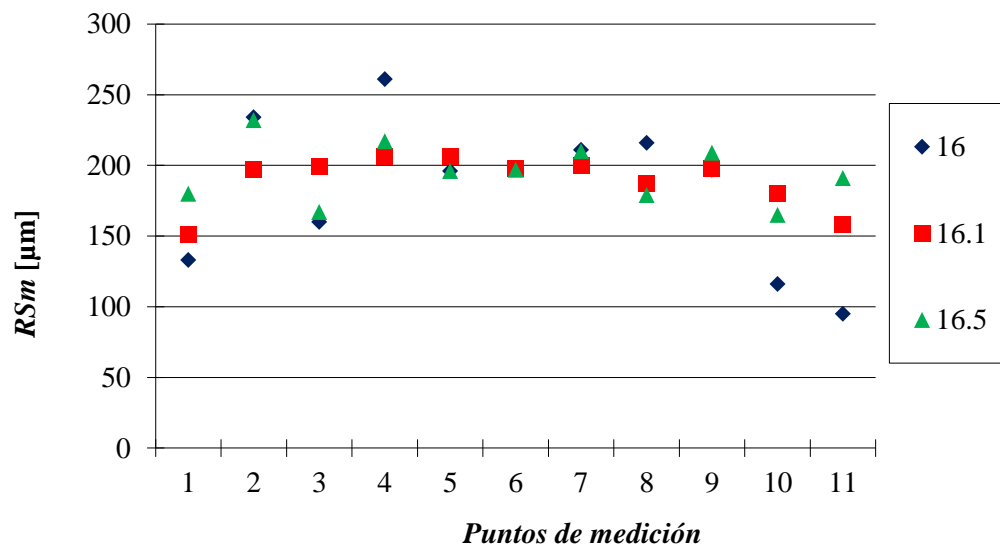
**Figura 6.23.** Rugosidad Ra en los puntos de medición para cada experimento. F. CIM.

En la Tabla 6.16 puede observarse como en este caso, en el experimentos 16.5 (con tolerancia cordal 0,005 mm), se obtiene la rugosidad Ra más elevada ($Ra = 0,71 \mu\text{m}$), en el punto 8 (punto más bajo de la superficie curva cóncava). Por otra parte no existe una diferencia apreciable en los valores de rugosidad Ra , si se tiene en cuenta la dispersión de los valores medidos y calculados.

Tabla 6.16. Valores medios de rugosidad Ra [μm] en los puntos de medición. F. CIM.

Exp.	\bar{x}_m	s_m	$x_{m\acute{a}x}$	$x_{m\acute{i}n}$	R
16	0,47	0,09	0,60	0,31	0,29
16.1	0,52	0,07	0,65	0,45	0,20
16.5	0,55	0,09	0,71	0,43	0,28

En la Figura 6.24 se muestra el gráfico donde se relaciona la rugosidad RSm , frente a los diferentes puntos de medición, en los diferentes experimentos realizados en la Fundació CIM.

**Figura 6.24.** Rugosidad RSm en los puntos de medición para cada experimento. F. CIM.

En cuanto a los resultados obtenidos con el parámetro de rugosidad RSm , mostrados en la Tabla 6.17 y Figura 6.24, cabe destacar la gran dispersión de los valores en el experimento 16, con un error de repetibilidad máximo $R = 166 \mu\text{m}$, para un valor medio de la rugosidad $RSm = 183 \mu\text{m}$. En la Figura 6.25 y Figura 6.26 se observan los acabados superficiales en el punto 3 para los experimentos 16 y 16.1, para la comparativa de disparidad de acabados con los otros centros de mecanizado.

Tabla 6.17. Valores medios de rugosidad RSm [μm] en los puntos de medición. F. CIM.

Exp.	\bar{x}_m	s_m	$x_{m\acute{a}x}$	$x_{m\acute{i}n}$	R
16	183	51	261	95	166
16.1	189	19	206	151	55
16.5	195	21	232	165	67

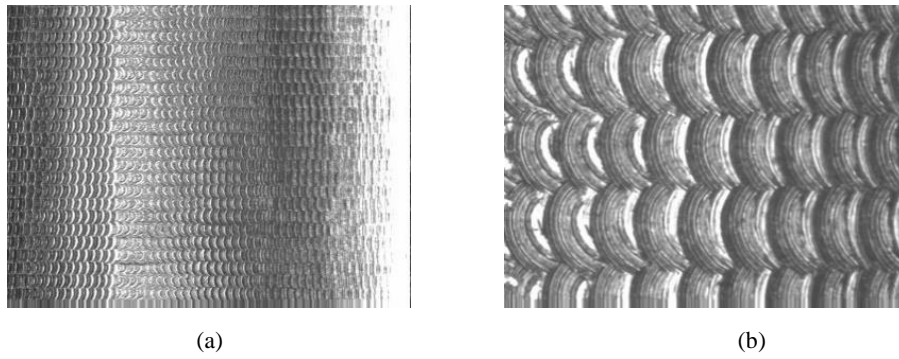


Figura 6.25. Fotografías superficie curva (punto 3) en el experimento 16. F. CIM.

$Ra = 0,45 \mu\text{m}$, $RSm = 160 \mu\text{m}$.
Ampliación: (a) 36X y (b) 216X.

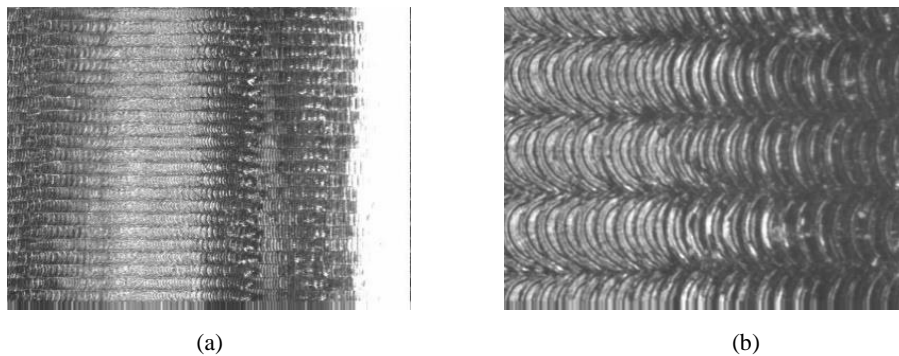


Figura 6.26. Fotografías superficie curva (punto 3) en el experimento 16.1. F. CIM.

$Ra = 0,58 \mu\text{m}$, $RSm = 199 \mu\text{m}$.

A diferencia de los resultados con los anteriores centros de mecanizado, en F. CIM el experimento 16, con tolerancia cordal 0,01 mm, obtiene valores de rugosidad más bajos, en el punto 3.

Por otra parte, existe un problema añadido al comparar distintos centros de mecanizado, con distintas prestaciones y diferentes ajustes de los controles numéricos propios de cada máquina. La velocidad de lectura de los bloques del programa de control numérico y la velocidad de respuesta en tiempo real de los servoaccionamientos en cada máquina son diferentes, por este motivo, los avances lineales reales en la ejecución de una pieza compleja, con superficies curvas son diferentes a los avances lineales programados inicialmente. Para el mismo centro de mecanizado, esta diferencia entre los avances lineales reales y los teóricos, está en relación al radio de curvatura y la tolerancia cordal establecida en el control.

Una mayor tolerancia cordal, permite un mayor avance lineal real, menor tiempo de mecanizado, pero la superficie obtenida tiene peor precisión dimensional y deja la superficie curva mecanizada con unas facetas mayores, tal como se explicaba en el apartado 2.4.

6.3.1.4. Relación de tolerancia cordal, avances lineales y radios de curvatura.

Para comprobar los avances lineales reales en función de la tolerancia cordal se realizó una experimentación básica, en el centro de mecanizado de la Fundació CIM. Este centro dispone de un control numérico con una velocidad de procesado cuatro veces inferior (4 ms/bloque), respecto a los otros dos centros de mecanizado ensayados.

En una operación de copiado, sobre una pieza con diferentes radios de curvatura R_c de 10, 20 y 40 mm, con unas revoluciones fijas de $S = 16.000 \text{ min}^{-1}$, se establecieron diferentes tolerancias cordales (TC), entre 0,001-0,03 mm y se comprobó en la información del control numérico el avance real máximo de la máquina ($F_{m\acute{a}x}$ [mm/min]) al realizar una trayectoria curvilínea con un determinado radio de curvatura, tal como se muestra en la Tabla 6.18 y en la Figura 6.27. Para un radio, $R_c = 20$ mm, la reducción a la mitad de la tolerancia cordal, provoca una reducción del avance real cercana al 30%, y si se reduce en 10 veces la tolerancia cordal (de 0,010 a 0,001 mm), la reducción del avance está próxima al 70%.

Tabla 6.18. $F_{m\acute{a}x}$ [mm/min] en relación tolerancia cordal y radios de curvatura de pieza.

$F_{m\acute{a}x}$	R_c [mm]		
TC [mm]	10	20	40
0,001	587	781	1.069
0,005	1.354	1.748	2.390
0,010	1.858	2.472	3.380
0,020	2.628	3.496	4.780

Los resultados mostrados en la Tabla 6.18 y en la Figura 6.27 nos muestran una relación lineal entre las tres variables (el avance lineal máximo, la tolerancia cordal y el radio de curvatura de la pieza) para las prestaciones de la máquina-herramienta y su control numérico ensayado. Y se observa como aumenta el avance lineal a mayor tolerancia cordal y como aumenta la diferencia entre los avances lineales en relación al radio de curvatura de la pieza.

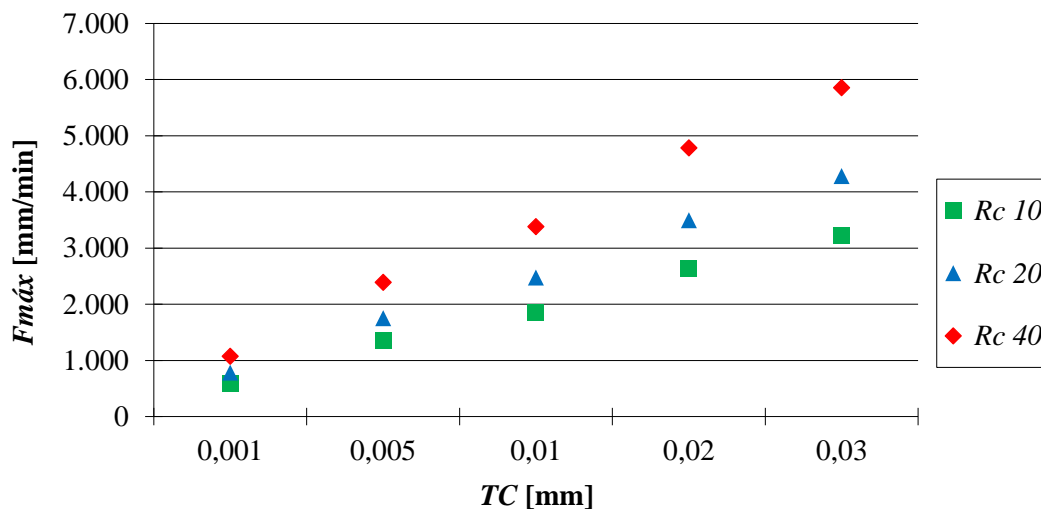


Figura 6.27. Tolerancia cordal y avance lineal máximo para diferentes radios de curvatura R_c [mm].

También es característico la visualización de unas facetas en la superficie de la pieza en función de la tolerancia cordal seleccionada. Una tolerancia cordal mayor implica mayor avance lineal, pero menor precisión dimensional, menor seguimiento de la trayectoria curvilínea de la superficie curva a mecanizar. En la Figura 6.28 (ampliación 36X) se observan estas facetas en la superficie curva convexa mecanizada en el experimento 16, punto 3 (punto central de la imagen) en el centro de mecanizado de F. ASCAMM.

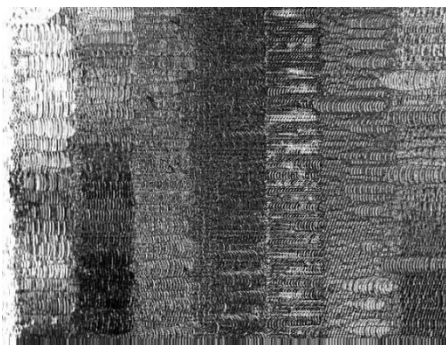


Figura 6.28. Facetas en superficie curva convexa (punto 3) en el experimento 16. F. ASCAMM.

$$Ra = 1,81 \mu\text{m}, RSm = 667 \mu\text{m}.$$

En la pieza test, las superficies curvas (convexa y cóncava) tenían un radio de curvatura $R_c = 20$ mm y en general la experimentación se ha realizado con una tolerancia cordal de 0,01 mm, con lo que el avance real de máquina en las operaciones de fresado ha sido $Fmáx = 2.472$ mm/min. Avance máximo que no se ha alcanzado en ninguno de los experimentos ensayados.

En la Tabla 6.19 se muestran las ecuaciones lineales que nos da el valor del avance lineal máximo para cada radio de curvatura, para las tolerancias cordales ensayadas, dentro del intervalo 0,001mm – 0,03 mm, con su correspondiente ajuste R^2 .

Tabla 6.19. Ecuaciones de la relación entre $F_{m\acute{a}x}$ y TC para cada R_c .

R_c [mm]	Ecuación lineal	R^2 [%]
10	$F_{m\acute{a}x} = 653,8 \cdot TC - 32,2$	99,66
20	$F_{m\acute{a}x} = 875 \cdot TC - 69,2$	99,78
40	$F_{m\acute{a}x} = 1196,2 \cdot TC - 93,8$	99,78

6.3.1.5. Comprobación de resultados respecto al modelo global de los centros de mecanizado y tolerancias cordales.

En relación a los ensayos realizados con distintos centros de mecanizado y diferentes tolerancias cordales, el mayor residuo estandarizado calculado a partir de la Ec. 3.11 ($e_r = -53,2\%$) se ha obtenido en el centro de mecanizado *Deckel linear* (F. ASCAMM), con la mayor tolerancia cordal de 0,01 mm (Figura 6.29). Con tolerancia cordal 0,005 mm, se obtiene el valor mínimo del residuo ($e_r = 7,7\%$), para el centro de mecanizado *Deckel DMU50* (F. CIM),

En la Figura 6.29 se observan errores positivos similares en todos los centros de mecanizado para la tolerancia cordal menor de 0,001 mm. El modelo teórico global se ajusta razonablemente bien, en todos los errores cordales, para el centro de mecanizado *Deckel DMU50* (F. CIM) y el centro de mecanizado Makino (Moldista).

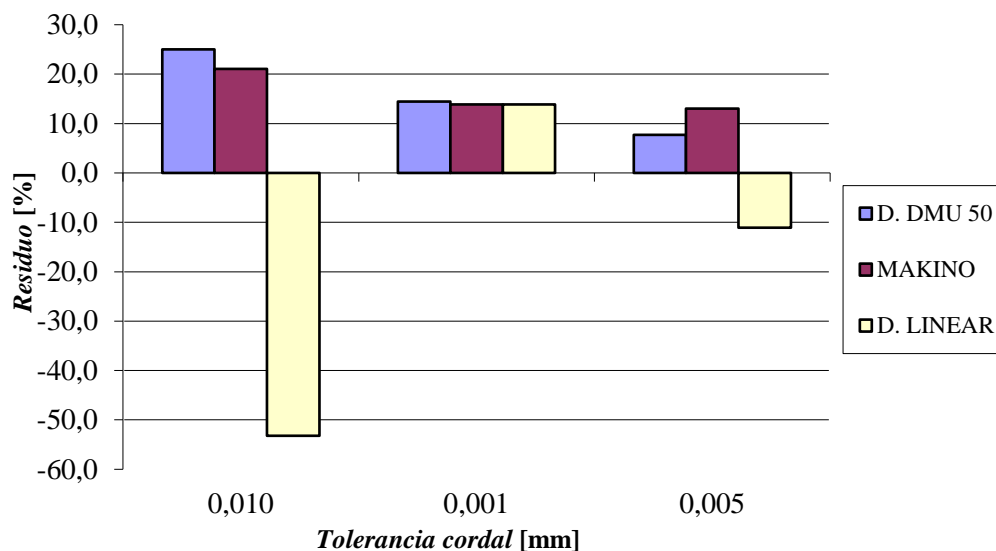


Figura 6.29. Gráfica de residuos del modelo teórico global versus tolerancia cordal y centros de mecanizado.

Las imperfecciones o irregularidades en la superficie detectadas en el centro de mecanizado de F. ASCAMM (D. LINEAR), quedan reflejadas en los resultados mostrados en el gráfico de residuos de la Figura 6.29, en especial para la tolerancia cordal 0,010 mm, con el valor del residuo de -53,2%.

6.3.2. Influencia de diferentes programas CAM.

En este estudio realizado en la Fundació CIM, se han ensayado los programas CAM de simulación de procesos de mecanizado, Powermill, Mastercam y Hypermill, en idénticas condiciones corte del experimento que se mostraba en la Tabla 6.11. Los dos primeros programas se encuentran en multitud de talleres de fabricación de moldes y matrices. El tercero con menor cuota de mercado ofrece unas prestaciones muy interesantes para el sector. Algunas de las novedades actuales del programa Hypermill han sido detalladas en el apartado 2.5.

6.3.2.1. Resultados con el programa Powermill.

La experimentación realizada en general, en esta tesis se realizó con el programa Powermill, en el centro de mecanizado de la Fundació CIM. Por este motivo, los resultados de los experimentos que corresponderían a este apartado, son los mismos que el apartado 6.3.1.3. Estos resultados se muestran

y analizan a partir de la Figura 6.23 y de la Tabla 6.16, para el parámetro de rugosidad Ra , y en la Figura 6.24 y la Tabla 6.17, para el parámetro de rugosidad RSm .

6.3.2.2. Resultados con el programa Hypermill.

Inicialmente, sin haber realizado la medición de rugosidad, se aprecia visualmente un hecho particular. Las marcas presentes en todas las experiencias ensayadas con el programa Powermill, con tolerancia cordal de 0,01 mm (con menor presencia también con $TC = 0,005$ mm), especialmente en las superficies curvas, han desaparecido con este programa de mecanizado. En este caso, en la Tabla 6.20 se muestra de forma clara, que la variación de la rugosidad en los experimentos con diferente tolerancia cordal (16, 16.1 y 16.5) no es significativa.

Por otra parte, no aparecieron las marcas presentes con el programa Powermill, especialmente en la experiencia 16 con tolerancia cordal de 0,01 mm. Para comparación con imágenes anteriores, en la Figura 6.30 se muestra el acabado en la superficie curva del punto 3, en el experimento 16.

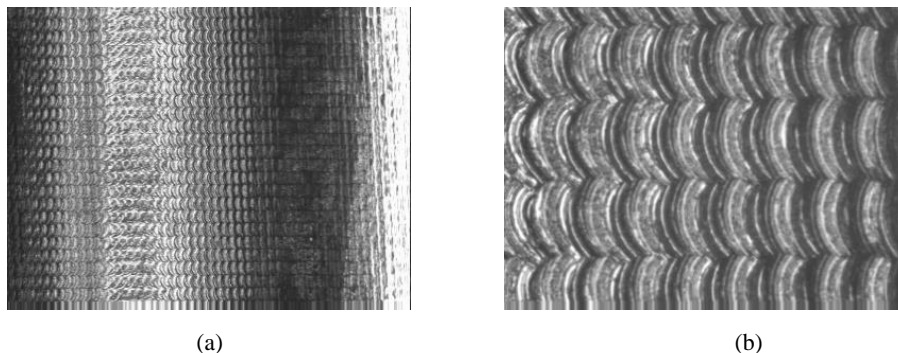


Figura 6.30. Fotografías superficie curva (punto 3) en el experimento 16. Hypermill.

$$Ra = 0,69 \mu\text{m}, RSm = 277 \mu\text{m}.$$

Ampliación: (a) 36X y (b) 216X.

En la Figura 6.31, junto con la Tabla 6.20 se observa el menor valor de rugosidad Ra con el experimento 16, en el punto 3 de superficie curva convexa ($Ra = 0,31 \mu\text{m}$). El máximo valor de rugosidad Ra se obtiene en el experimento 16.5, punto 8 ($Ra = 0,57 \mu\text{m}$), aunque es el experimento que más se acerca al valor medio de la rugosidad dada por el modelo global, $Ra_M = 0,59 \mu\text{m}$.

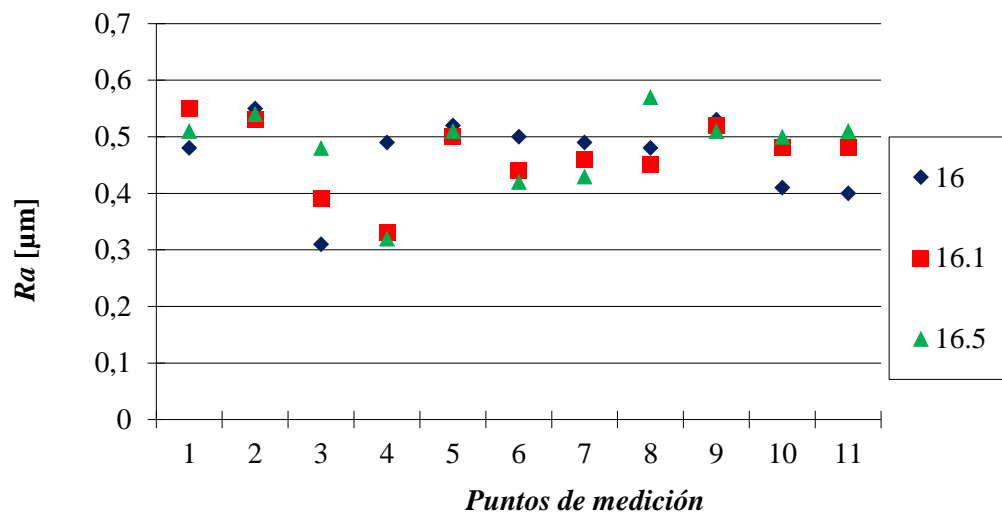


Figura 6.31. Rugosidad Ra en los puntos de medición, para los experimentos. Hypermill.

Tabla 6.20. Valores medios de rugosidad Ra [μm] en los puntos de medición. Hypermill.

Exp.	\bar{x}_m	s_m	$x_{m\acute{a}x}$	$x_{m\acute{m}n}$	R
16	0,47	0,07	0,55	0,31	0,24
16.1	0,47	0,06	0,55	0,33	0,22
16.5	0,48	0,07	0,57	0,32	0,25

Al observar la variabilidad de la medida de la rugosidad Ra en la Tabla 6.20, en los diferentes experimentos, puede destacarse que no es apreciable la diferencia de rugosidad entre diferentes tolerancias cordales con el programa Hypermill.

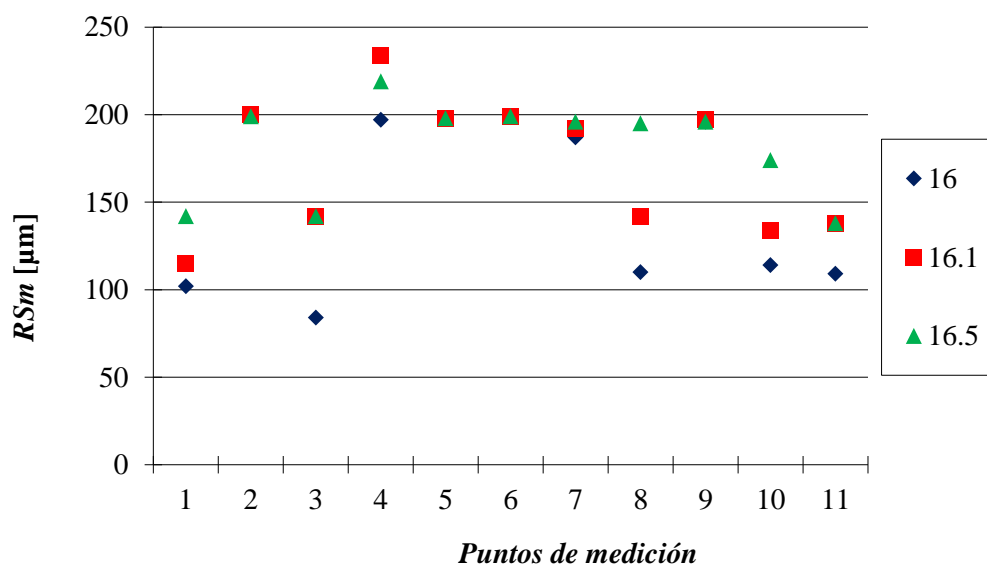


Figura 6.32. Rugosidad RSm en los puntos de medición, para los experimentos. Hypermill.

En comparación con los resultados con el programa Powermill, con los datos de la Tabla 6.20 y de la Tabla 6.21 se observa una menor dispersión de los valores medidos para los dos parámetros de rugosidad analizados (Ra y RSm), con el programa Hypermill.

Tabla 6.21. Valores medios de rugosidad RSm [μm] en los puntos de medición. Hypermill.

Exp.	\bar{x}_m	s_m	$x_{m\acute{a}x}$	$x_{m\acute{m}n}$	R
16	154	48,9	200	84	116
16.1	172	38,3	234	115	119
16.5	182	28,2	219	138	81

6.3.2.3. Resultados con el programa Mastercam.

Por último, se analizan los resultados de los experimentos realizados con el programa Mastercam. A partir de los datos aportados en la Figura 6.33 y en la Tabla 6.22, en el experimento 16 se obtuvo la menor rugosidad media $Ra = 0,23 \mu\text{m}$, pero con una elevada dispersión para todos los puntos de medición. En los 3 experimentos se aleja del valor medio de rugosidad Ra dado por el modelo global, $Ra_M = 0,59 \mu\text{m}$. Valores menores de rugosidad a los valores obtenidos con el programa Hypermill y Powermill.

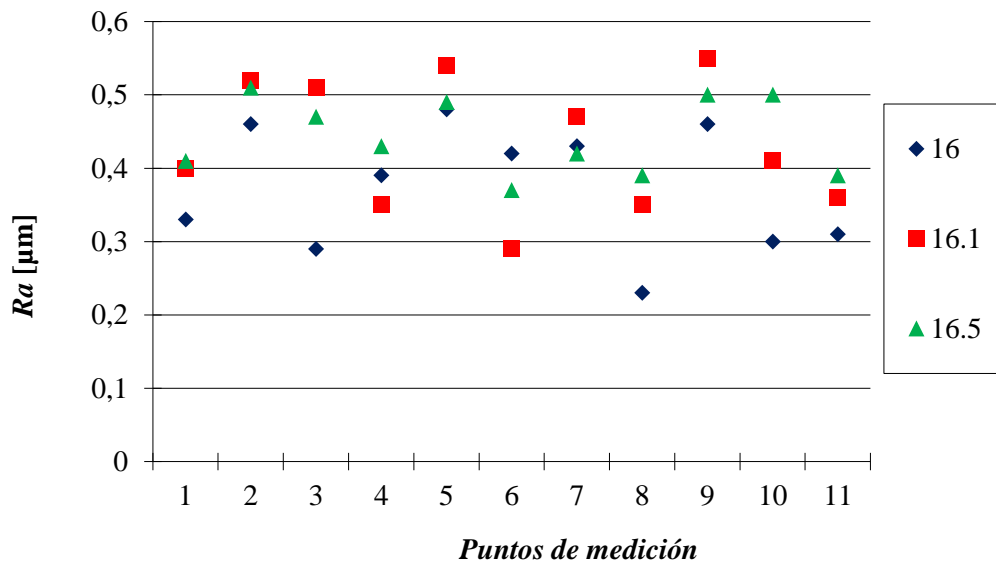


Figura 6.33. Rugosidad Ra en los puntos de medición, para los experimentos. Mastercam.

En estos experimentos se obtienen unos valores de rugosidad Ra inferiores al resto de programas, con un valor mínimo de rugosidad $Ra = 0,37 \mu\text{m}$ en experimento 16 y con una repetibilidad inferior ($R = 0,14 \mu\text{m}$, en experimento 16.5. Pero con un comportamiento más inestable en experimento 16.1 ($R = 0,26 \mu\text{m}$).

Tabla 6.22. Valores medios de la rugosidad Ra [μm] en los puntos de medición. Mastercam.

Exp.	\bar{x}_m	s_m	$x_{m\acute{a}x}$	$x_{m\acute{m}n}$	R
16	0,37	0,08	0,48	0,23	0,25
16.1	0,43	0,09	0,55	0,29	0,26
16.5	0,44	0,05	0,51	0,37	0,14

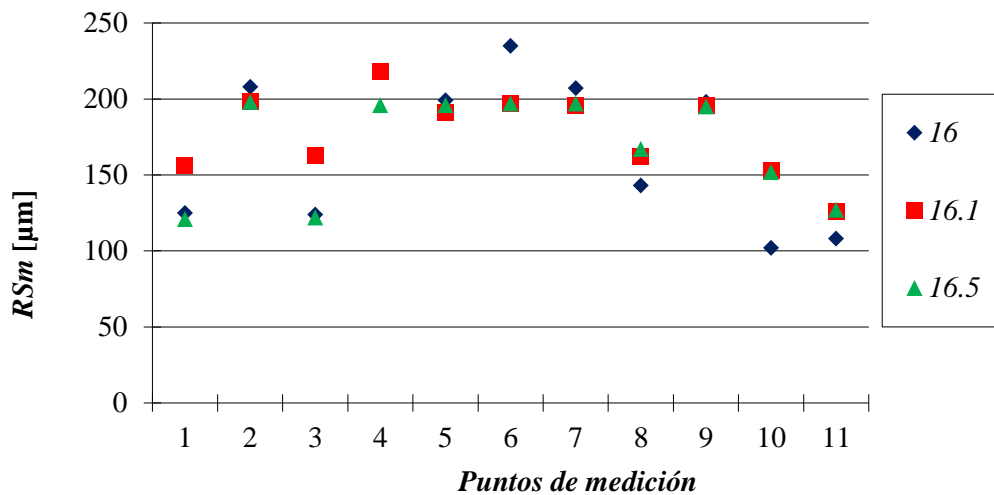


Figura 6.34. Rugosidad RSm en los puntos de medición, para los experimentos. Mastercam.

En comparación con los resultados de los programas CAM anteriores, con los datos de la Tabla 6.22 y de la Tabla 6.23, con el programa Mastercam se observa una menor dispersión de los valores medidos para los dos parámetros de rugosidad analizados (Ra y RSm), con tolerancia cordal de 0,005 mm. También se obtienen los menores valores de rugosidad Ra , para todos los experimentos alejándose de los valores dados por el modelo global.

Tabla 6.23. Valores medios de la rugosidad RSm [μm] en los puntos de medición. Mastercam.

Exp.	\bar{x}_m	s_m	$x_{m\acute{a}x}$	$x_{m\acute{i}n}$	R
16	170	49,3	235	102	133
16.1	178	27,3	218	126	92
16.5	170	33,3	198	121	77

6.3.2.4. Comprobación de resultados respecto diferentes programas CAM.

En relación con los resultados obtenidos del parámetro de rugosidad Ra , en la Figura 6.35 se observa como el menor residuo estandarizado ($e_r = 8\%$) se ha obtenido con el programa Powermill (programa con el que se ha desarrollado el modelo global), pero en la tolerancia cordal intermedia, de 0,005 mm. En cambio el mayor residuo estandarizado ($e_r = 59,2\%$) se ha obtenido con el programa Mastercam, con tolerancia cordal 0,01 mm, al obtener unos valores de rugosidad Ra menores a los valores obtenidos con el modelo global. Los residuos de Hypermill son similares para las distintas tolerancias cordales. El modelo global se ajusta razonablemente y mejor al utilizar el programa Powermill, a partir

del cual se estableció el modelo predictivo, seguido del programa Hypermill (más estable para las diferentes tolerancias cordales). Con el programa Mastercam se obtienen los peores resultados en todas las tolerancias cordales.

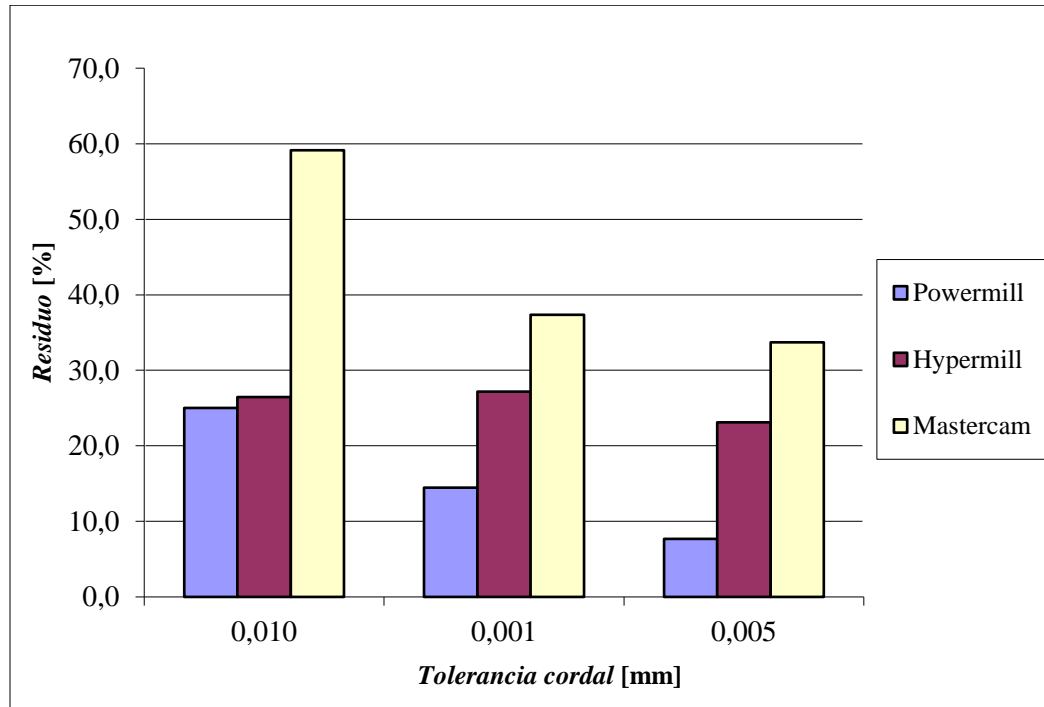


Figura 6.35. Gráfico de residuos del modelo global versus tolerancia cordal y programas CAM.

6.3.2.5. Conclusiones relación tolerancia cordal, programas de mecanizado.

A partir del análisis de resultados de la experimentación realizada, se pueden extraer diferentes conclusiones:

- En los experimentos con tolerancia cordal 0,01 mm, la irregularidad superficial presente con el programa Powermill (manifiesta en los valores de rugosidad RSm obtenidos), se ha reducido de forma notable con los programas Hypermill y Mastercam. Con el programa Powermill, sólo se han eliminado las irregularidades al reducir la tolerancia cordal a 0,001 mm.
- Con la tolerancia cordal de 0,001 mm se obtuvo una media de la rugosidad Ra para todos los puntos de medición idéntica para todos los centros de mecanizado ($Ra = 0,52 \mu m$). El mayor valor de la rugosidad se obtuvo en el centro de mecanizado de ASCAMM ($Ra = 1,27 \mu m$),

frente al menor valor obtenido en Fundació CIM ($Ra = 0,47 \mu\text{m}$). Una diferencia importante de estos dos valores de rugosidad obtenidos con la misma tolerancia cordal de 0,01 mm.

- En términos de rugosidad Ra , no se aprecia una diferencia de rugosidad entre diferentes tolerancias cordales con el programa Hypermill. En cambio la diferencia es importante con el programa Mastercam.
- En los experimentos realizados con condiciones de corte iguales pero diferente tolerancia cordal, en general, con la dispersión de los valores de rugosidad Ra obtenidos, para todos los puntos de medición, con el mismo centro de mecanizado, no se puede afirmar un mejor comportamiento de este parámetro, según la tolerancia cordal ensayada. .
- En función de las prestaciones del centro de mecanizado y de las características geométricas de la pieza a mecanizar debe ajustarse la tolerancia cordal, para conocer los avances lineales reales de mecanizado y reducir así los defectos superficiales que pueden aparecer en la pieza.

7. CONCLUSIONES FINALES Y TRABAJOS FUTUROS

En los diferentes capítulos de esta tesis se han mostrado las conclusiones parciales a los estudios realizados. En este capítulo se recogen las principales conclusiones expuestas anteriormente, así como otros aspectos a considerar respecto a la tesis realizada, como son los trabajos futuros que puedan realizarse a partir de este trabajo.

Con el estudio del estado del arte, se ha comprobado el interés de distintos investigadores (y por tanto, de los distintos grupos de investigación) por la temática presentada en esta tesis, en especial por la calidad superficial obtenida mediante distintos procesos y operaciones de fresado. Por la evolución constante de estos procesos y de las tecnologías implicadas, los estudios y análisis aquí presentados serán útiles para la realización de nuevos trabajos que actualicen el estado del arte y propongan nuevos métodos de mejora del acabado superficial.

Se ha cumplido con el objetivo de la obtención de diferentes modelos matemáticos, modelos predictivos del acabado superficial, centrados en el parámetro de rugosidad Ra , en distintas operaciones de mecanizado, con distintos métodos de corte (fresado en oposición y fresado en concordancia) dentro de los límites de la experimentación establecidos. Estos modelos están basados en la metodología del diseño de experimentos. A continuación se enumeran las características principales de cada modelo calculado:

- Modelos obtenidos con pieza semicilíndrica:
 - Operación de copiado en pieza con geometría convexa, con herramienta de punta esférica, para el acero de moldes W Nr. 1.2344 (acero Böhler W302-ISODISC), templado y revenido a una dureza entre 52-54 HRC. Lubricación con aire a presión.
 - Se obtienen 2 modelos diferenciados por el método de corte: Modelo 1A-corte en concordancia y modelo 1B-corte en oposición. Estos modelos dependen en distinta proporción de los 4 factores analizados en la experimentación, aunque el más significativo para ambos sea la profundidad de corte radial, Rd .

- Modelos obtenidos con piezas prismáticas:
 - Operación de contorneado, con herramienta de punta plana, para el acero de moldes W302-ISODISC, templado y revenido a una dureza entre 52-54 HRC. Lubricación con aire a presión. Se obtiene un modelo matemático para el método de corte en concordancia. Para la predicción del parámetro de rugosidad Ra , en este modelo el factor más significativo ha sido el avance por diente, fz .
 - Operación de contorneado, con herramienta de punta plana, para el acero de matrices K340-ECOSTAR, templado y revenido a una dureza entre 61-63 HRC. Lubricación con aire a presión. Se obtiene un modelo matemático para el método de corte en concordancia. Este modelo depende en distinta proporción de 3 factores (Ad , Vc y fz), aunque el más significativo ha sido el avance por diente, fz .

- Modelo obtenido en pieza test de superficies complejas:
 - Operación de copiado en pieza con geometría variable (con superficies planas de inclinación a 0° y 45° , zonas con superficies curvas cóncavas y convexas, de igual radio de curvatura), con herramienta de punta esférica, para el acero de moldes W302-ISODISC, templado y revenido a una dureza entre 52-54 HRC. Lubricación con aire a presión. Se obtiene un modelo matemático, un modelo predictivo global, a todos los puntos de medición obtenido con el método de corte en concordancia. Para la predicción del parámetro de rugosidad Ra , en este modelo el factor más significativo ha sido la profundidad de corte radial, Rd .

Los modelos matemáticos obtenidos no son extrapolables a otras operaciones de fresado, o condiciones de la experimentación, diferentes a las utilizadas en estos estudios. Sin embargo, a partir de los resultados es posible tener una idea del valor de magnitud de la rugosidad a obtener en operaciones de fresado sobre una superficie concreta de un determinado acero de molde o matriz.

En relación a los dos métodos de corte estudiados (corte en concordancia y corte en oposición) para las distintas operaciones de mecanizado experimentadas, en general, se ha obtenido un acabado superficial más heterogéneo y un mayor desgaste en la cara de incidencia de las herramientas, con el método de corte en oposición, comparado con el corte en concordancia. Es importante considerar este hecho, especialmente para su aplicación en un proceso productivo, para programar las trayectorias de la herramienta en los programas de mecanizado (CAM), de forma correcta y evitar así la sustitución

prematura de la herramienta y/o el rechazo de piezas defectuosas, con acabados superficiales no deseables.

En los procesos de fresado de acero de moldes templado (W. Nr. 1.2344), en operaciones de copiado con herramienta de punta esférica, los peores resultados se han obtenido durante el mecanizado en oposición en copiado ascendente, debido a diversas irregularidades presentes en la superficie, con una textura superficial heterogénea, no uniforme, en varios de los experimentos. Este tipo de mecanizado es más sensible a la variación y dirección de las fuerzas de corte, lo que afecta a la flexión de la herramienta e indirectamente al acabado superficial. Por otra parte, para las condiciones de corte experimentadas se ha obtenido un desgaste de la herramienta de punta esférica, $V_{Bmáx}$ inferior a 0,10 mm, para una longitud de mecanizado ensayada de 1.500 m, en la operación de copiado. Se ha observado que este desgaste no influye de forma apreciable en la rugosidad Ra , para el método de corte en concordancia, con aire a presión como lubricante.

Se ha comprobado la relación entre algunos parámetros de rugosidad y condiciones de corte, cuando se obtiene un perfil de rugosidad periódico. Por ejemplo, en operaciones de contorneado con herramienta de punta esférica, es posible aproximar el valor del parámetro de la rugosidad, RS_m , al valor del paso o profundidad de corte radial, Rd . En el caso de operaciones de contorneado con herramientas de punta plana, la rugosidad RS_m , se aproxima al valor del avance por revolución f . Por este motivo, con una inspección visual básica de la superficie de control y con el valor de la rugosidad RS_m se podría comprobar si los resultados de rugosidad obtenidos son satisfactorios o si existe alguna irregularidad en el acabado superficial.

Se ha comprobado la importancia del rectificado previo de la arista de corte de la herramienta, pues la geometría inicial de la herramienta se replica en la superficie mecanizada. En concreto, para una geometría nueva de las herramientas de punta plana fue necesario estabilizar la geometría de las aristas de corte, para que se produjera un cierto desgaste inicial, para una longitud de mecanizado determinada (alrededor de los 250 mm). De esta forma se obtuvo el acabado superficial esperado.

Se ha comprobado la influencia de distintos sistemas de lubricación (aire a presión, microlubricación, aire frío), sobre el acabado superficial, con distintos aceros de moldes a distintas durezas, con los dos métodos de corte (corte en oposición y corte en concordancia). No se han observado diferencias

significativas entre los distintos sistemas de lubricación, en cuanto al valor de rugosidad Ra obtenido, pero cabe destacar las siguientes consideraciones:

- Con corte en concordancia se obtienen los valores de rugosidad mayores con microlubricación y los valores de rugosidad menores con aire. Con corte en oposición se obtienen los valores de rugosidad mayores con aire (similar a los valores obtenidos con microlubricación, en corte en concordancia), y los valores de rugosidad menores con aire frío.
- A nivel de cada material existen pequeñas diferencias en la rugosidad obtenida con los distintos sistemas de lubricación ensayados, en función del método de corte empleado:
 - Con corte en concordancia: El acero inoxidable M333 (templado y revenido a 52-54 HRC) ha obtenido los valores mayores de rugosidad Ra , para todos los sistemas de lubricación.
 - Con corte en oposición: El acero W302 (W. Nr. 1.2344, templado y revenido a 52-54 HRC) ha obtenido los valores menores de rugosidad Ra , para todos los sistemas de lubricación.
- En cambio, cuando se analiza la rugosidad para una longitud de mecanizado elevada y con aire como lubricante, el corte en concordancia ofrece una menor rugosidad, Ra y RSm , con respecto al corte en oposición. El desgaste de la herramienta fue mínimo, para $Lm = 16$ m, de $VB_{máx} = 0,015$ mm.

En las operaciones de contorneado realizadas para los aceros de matrices ensayados (templados y revenidos a durezas entre 60-64 HRC) se han extraído las siguientes conclusiones, a partir de los resultados obtenidos en las mediciones de la rugosidad:

- No existe influencia significativa debido a los materiales experimentados del fabricante de aceros Böhler (K110, K340 y K390).
- Con la estrategia de mecanizado en concordancia se obtuvo un valor menor de rugosidad, Ra , una variabilidad de la medida menor y un acabado más uniforme, sin la presencia de defectos superficiales.
- En cambio con el mecanizado en oposición se obtuvo un valor mayor de rugosidad, Ra (con el acero K110, más del doble de diferencia) el acabado es más heterogéneo, con mayor dispersión de las medidas y con aparición de marcas que evidencian un corte de la herramienta

desigual, debido entre otras causas, a una mayor adhesión de viruta en el filo de corte, lo que ha provocado también un mayor desgaste de herramienta.

En la operación de copiado de la pieza test con superficies complejas, sobre el acero de moldes templado a 52-54 HRC (W. Nr. 1.2344) se ha comprobado la influencia en el acabado superficial, en relación la tolerancia cordal con 3 niveles (0,01mm, 0,005 mm y 0,001 mm), con 3 centros de mecanizado diferentes (en F. CIM, en F. ASCAMM y en empresa moldista) y con 3 programas de mecanizado (Powermill, Hypermill y Mastercam):

- Los defectos superficiales y variabilidad de la medida de rugosidad aparecidos con la tolerancia cordal mayor (0,01 mm) se eliminaron con la tolerancia cordal menor (0,001 mm). Estos defectos fueron más evidentes con el programa Powermill y en el centro de mecanizado Deckel Linear de la F. ASCAMM.
- Con el programa Hypermill, no existe diferencia apreciable de la rugosidad Ra , para las diferentes tolerancias cordales.
- En condiciones de corte en alta velocidad, debe tenerse en cuenta la tolerancia cordal en función de los radios de curvatura de la pieza a mecanizar pues es un factor limitante de los avances lineales reales de la herramienta de corte.

Los resultados obtenidos en esta tesis, así como las experiencias realizadas se podrán emplear para realizar futuros trabajos, con otras posibles metodologías diferentes al diseño de experimentos (algoritmos genéticos, redes neuronales, etc.) donde se podrían incluir el análisis de vibraciones, la deformación plástica del material o el rendimiento del molde o matriz, según el acabado superficial obtenido en la operación de mecanizado.

En los últimos años, la evolución de todas las tecnologías implicadas en los procesos de Fresado en Alta Velocidad (máquinas-herramientas, los controles numéricos, los programas de mecanizado, las herramientas de corte,...) se ha orientado principalmente en la mejora de los elementos o sistemas correspondientes para aportar acabados superficiales de mayor calidad y tolerancias más precisas. A destacar también en los últimos años, una mayor monitorización de los procesos y una mayor conectividad con las máquinas-herramienta que permiten una mayor productividad y una mayor sostenibilidad de los procesos de mecanizado. Todo ello podría tratarse en una posible continuación de la presente tesis.

En recientes ferias industriales del sector de fabricación se señalaba que el gran avance en máquinas-herramienta se ha producido en la aplicación de tecnologías híbridas de prototipado-mecanizado. Este avance tecnológico da una idea de otro de los temas de futuro a desarrollar a partir de esta tesis. En concreto, en las técnicas de fabricación aditiva, por aportación de material, mediante sinterización láser de materiales metálicos, en combinación con operaciones de fresado en alta velocidad, sobre las superficies donde se exige unos valores de rugosidad menores y unas tolerancias dimensionales o geométricas más precisas.

8. LISTA DE REFERENCIAS.

8.1. Artículos de investigación (por orden alfabético).

- Alauddin, M.; Baradie E.; Hashmi, M. *Computer-aided analysis of a surface-roughness model for end milling*. Journal of Materials Processing Technology 55, 1995, pp. 123-127.
- Albertí, M. *Contribución al desarrollo del proceso de selección de centros de mecanizado de alta velocidad, basado en parámetros tecnológicos y de productividad*. Tesis doctoral. Directores: de Ciurana, J. y Rodríguez C. Universitat de Girona, 2010.
- Altan, T.; Lilly, B.; Yen, Y.C. *Manufacturing of Dies and Molds*. Annals of the CIRP, Vol. (50/2), 2003, pp. 155-167.
- Aranceta, J. [et al.]. *Controles numéricos de nueva generación*. Artículo del libro: Fresado a Alta Velocidad, Ed. Izaro, 1999, pp. 99-107.
- Arrazola P. J. [et al.]. *Fresado a alta velocidad de aceros templados*. Artículo del libro: Fresado a Alta Velocidad, Ed. Izaro, 1999, pp. 35-43.
- Axinte, D.A.; Dewes, R. C. *Surface integrity of hot work tool steel after high speed milling- experimental data and empirical models*. Journal of Materials Processing Technology 127, 2002, pp. 325-335.
- Benardos, P. G.; Vosniakos, G. C. *Predicting surface roughness in machining: a review*. International Journal Machine Tools and Manufacture, Vol. 43, Issue 8, 2003, pp. 833-844.
- Brooks, R. *"Multi-Task Machining" now includes Additive Manufacturing*. American Machinist. October 2014.
- Brooks, R; Hessman, T. *New Technologies for Automation, Connectivity and Precision at IMTS 2016*. American Machinist. [Consulta: septiembre 2016]. Disponible en: <https://goo.gl/EvdfXK>.
- Buj, I; Vivancos, J.; Gonzalez H.A. *Roughness variation caused by grinding errors of cutting edges in side milling*. Machining science and technology, vol, 17-4, 2013, pp. 575-592.
- Byrne, G; Dornfeld, D.; Denkena, B. *Advancing Cutting Technology*. Annals of the CIRP, Vol. (52/2), 2003, pp. 483-507.
- Cantano, J. [et al.]. *Magnetic chuck failure prediction: towards the use of non-conventional clamping in milling operations*. Procedia Engineering 132, 2015, pp. 419-426.
- Celaya, A. [et al.]. *Análisis teórico y experimental del efecto del lubricante micropulverizado en el fresado a alta velocidad*. XIV Congreso de Máquinas-Herramienta y Tecnologías de Fabricación. Vol. I, 2002, pp. 151-168.

- Correa, M. [et al.]. *Factores que afectan el acabado superficial en los procesos de mecanizado: Técnicas de análisis y modelos*. XXV Jornadas de Automática, 2004, pp. 141-148.
- Costa, I.; Diniz A. E. *High Speed Milling of Hardened Steel Convex Surface*. Procedia Manufacturing, Vol. 5, 2016, pp. 220-231.
- Dewes, R.C.; Aspinwall, D.K. *A review of ultra high speed milling of hardened steels*. Journal of Materials Processing Technology, nº 69, 1997, pp. 1-17.
- Dreoni, A. *Alta velocità, look-ahead, jerk, NURBS, superfinitura*. Costruire stampi, 1997, pp. 1-15.
- Echepare, R.; Esteban, D. *El mecanizado a alta velocidad (HSM)*. Artículo del libro: Fresado a Alta Velocidad, Ed. Izaro, 1999, pp. 23-31.
- Echepare, R.; Esteban, D. *Evolución de las máquinas-herramienta por arranque de viruta en la década 1990-2000*. XIV Congreso de Máquinas-Herramienta y Tecnologías de Fabricación. Vol. I, 2002, pp. 151-195.
- Elbestawi, M.A.; Chen, L. *High Speed Milling of dies and moulds in their hardened state*. Annals of the CIRP, Vol (46/1), 1997, pp 57-62.
- Etxeberria, J.; Perez, J.; López, P. *Estrategias para el mecanizado de superficies complejas a alta velocidad*, XIII Congreso de Máquina-Herramienta y Tecnologías de Fabricación. Vol. II, 2000, pp. 156-160.
- Eurecat. *Tecnología desarrollada en Girona mejorará la eficiencia de la generación de energía eólica*. Junio 2017. [Consulta: abril 2018]. Disponible en: <<https://eurecat.org/es/cimec-girona/>>.
- Feng, C. *An experimental Study of the Impact of Turning Parameters on Surface Roughness*. Proceedings of the Industrial Engineering Research Conference, 2001, pp. 20-26.
- Güell, E. *Entrevista a Daniel Altimiras, presidente de ASCAMM*. Rev. Plásticos Universales, nº 201, 2016a, pp. 58-63.
- Güell, E. *Nicomold y Hoffman Group para sus moldes más avanzados*. Rev. Industria metalmeccánica, nº 1253, 2016b, pp. 58-61.
- Gómez, A. *Aplicación del fresado de alta velocidad de moldes y matrices*. Artículo del libro: Fresado a Alta Velocidad, Ed. Izaro, 1999, pp. 45-52.
- Gómez, A. *MAVIM, Metodología de implantación de la técnica de fresado a alta velocidad para la fabricación de moldes y matrices*. Congreso de Máquinas-Herramienta y Tecnologías de Fabricación. Vol. II, 2002, pp. 929-946.
- Gorriti, N. *Entrevista a Daniel Vizuete, director de Hasco Ibérica Normalizados*. Rev. Interempresas febrero 2017, pp. 17-19.
- Iglesias A. *Reducción de problemas de vibraciones en procesos de mecanizado*. Rev. Técnica y Tecnología nº 26, 2015, pp. 20-22.

- IMHE. *En 2025 y mañana ¿Qué y cómo se va a mecanizar en 2025?*. Rev. IMHE nº 398, 2013, pp. 42-55.
- Iriondo, A. *Estrategia avanzada de compensación del error de seguimiento para el mecanizado a alta velocidad*. XIII Congreso de Máquina-Herramienta y Tecnologías de Fabricación. Vol. I, 2000, pp. 151-155.
- Kitaura, S.; Aoki T. *Dry cutting Performance of (Al, Ti)N Coated Carbide Endmills for High Speed Machining*. Tool Tech nº 2, 1999, pp. 7-12.
- Kustush, C. *Cutting Tools Trends and Observations*. Rev. MoldMaking Technology, 25/9/2017.
- Lamikiz, A. [et al.]. *Conos porta-herramientas para mecanizado de alta velocidad*. Rev. Industria metalmeccánica, diciembre 2002, pp. 18-26.
- Lamikiz, A. [et al.]. *Discusión sobre el ajuste de los coeficientes de modelos semi-empíricos para fresas esféricas*. Rev. IMHE, Nº 348, 2008, pp. 66-75.
- Loftus, M. *Causes of High-Speed Machining Irregularities*. Rev. Moldmaking Technology, 2002.
- López de Lacalle, L.N.; Arteta, A.; López, A. *Piezas de ensayos para mecanizado a alta velocidad*. Libro Fresado de Alta Velocidad, Ed. Izaro, 1999, pp. 135-142.
- López de Lacalle, L.N.; Lamikiz, A.; Arana, J.L. *Improving the surface finish in high speed milling of stamping dies*. Journal of Materials Processing Technology, nº 123, 2002a, pp. 292-302.
- Marin, J. C. *Técnica de Mecanizado de Alta Velocidad*. Jornadas sobre Diseño y Fabricación de Moldes y Matrices. Centre Català del Plàstic (Terrassa), 1997, pp. 92-101.
- Mateo, F. *Nuevas prestaciones y más rentabilidad para los usuarios de CAD/CAM*. Rev. Técnica y Tecnología nº 26, 2015, pp. 30-31.
- Mathia, T. G.; Pawlus, P.; Wiczorowski, M. *Recent trends in surface metrology*. Wear 271, 2011, pp. 494-508.
- Matsumoto, G.; Sato, K. *High precision ball-nose end mills*. Mitsubishi Materials Kobe Tools Technology Review nº 2, 2003, pp. 30-32.
- Miller, S.; Heidenhain, J. *Alta velocidad bajo control*. Rev. IMHE, octubre 2000, pp. 171-175.
- Mizugaki, Y.; Hao, M.; Kikkawa, K. *Geometric Generating Mechanism of machined surface by ball-nosed end milling*. Annals of the CIRP. Vol (50/1), 2001, pp. 69-72.
- Mizugaki, Y. [et al.]. *Theoretical Estimation of machined surface profile based on cutting edge movement and tool orientation in ball-nosed end milling*. Annals of the CIRP. Vol (52/1), 2003, pp. 83-86.
- Neslusan, M. [et al.]. *Monitoring of hard milled surfaces via Barkhausen noise technique*. Procedia Engineering 132, 2015, pp. 472-479.
- Nguyen, H. T.; Hsu, Q. Ch. *Surface Roughness Analysis in the Hard Milling of JIS SKD61 Alloy Steel*. Journal of Applied Sciences. Vol. (6/172), 2016, pp. 1-15.

- Nowicki, B. *The New Method of Free Form Surface Honing*. Annals of the CIRP. Vol. (42/1), 1993, pp. 425-428.
- Panosso, R.; Santin, R. *Tool wear in high speed milling of hardened Steel*. 18th International Congress of Mechanical Engineering, COBEM 2005, pp. 1-6.
- Pereira, O. [et al.]. *Refrigeración criogénica para operaciones de mecanizado de alto valor añadido*. Rev. Técnica y Tecnología, nº 38, 2016, pp. 14-22.
- Pérez, J.; Alberdi, G.; López, P. *Introducción al Mecanizado de Alta Velocidad*. Rev. Metalunivers, 2001, pp. 20-24.
- Rodríguez, A. [et al.]. *Acabado de superficies: Sobre el acabado de la huella*. Rev. Técnica y Tecnología, nº 38, 2016, pp. 30-41.
- Rúa, R. *Accesorios para optimizar el lapeado y pulido de moldes*. [Consulta: marzo 2016]. Disponible en: <<http://www.herratec.com>>.
- Rubio, E. M. [et al.]. *Cooling systems based on cold compressed air: a review of the applications in machining processes*. Procedia Engineering 132, 2015, pp. 413-418.
- Schultz, B. *State of the tool, mould and die-making industry: What's ahead for 2017?*. Rev. ETMM online. [Consulta: enero 2017]. Disponible en: <<http://www.etmm-online.com>>.
- Schultz, H. *Keypoints of High-Speed-Cutting*. Proceedings of TMT 2004, pp. 11-14.
- Schmidt, R. *The key advantages of Hard Milling*. Precisely! 01/2015. Makino Europe's Customer Magazine, pp. 13.
- Su, Y. [et al.] *Refrigerated cooling air cutting of difficult-to-cut materials*. International Journal of Machine Tools & Manufacture 47 (2007) pp. 927-933.
- Teixidor, D [et al.] *Planificando un proceso de fresado*. Rev. IMHE nº381, 2011, pp. 61-69.
- Thomas, D. *New precision cutting tools bolster mould and die making*. ETMM, Vol. XVIII issue 9. September 2016, pp. 32-35.
- Toh, C. K. *Surface topography analysis in high speed finish milling inclined hardened steel*. Precision Engineering. Vol. 28/4, 2004, pp. 386-398.
- Toh, C. K. *Design, evaluation and optimisation of cutter path strategies when high speed machining hardened mould and die materials*. Materials and Design. Vol. 26, 2005, pp. 517-533.
- Tsai, Y. [et al.] *An in-process surface recognition system based on neural networks in end milling cutting operations*. Machine Tools & Manufacture. Vol. 39, 1999, pp. 583-605.
- Van, C.A. [et al.] *Present Situation and Future Trends in Modelling of Machining Operations*. Report of de CIRP Working Group "Modelling of Machining Operations. Annals of the CIRP. Vol. (47/2), 1998, pp. 587-626.
- Vila, C; Abellán-Nebot, J.V.; Siller-Carrillo H. R. *Study of different cutting strategies for sustainable machining of hardened steels*. Procedia Engineering 132, 2015, pp. 1.120-1.127.

- Wang, C. Y. [et al.] *Wear and breakage of TiAlN and TiSiN coated carbide tools during high-speed milling of hardened steel*. *Wear* n° 336, 2015, pp. 29-42.
- Yamada, T. [et al.] *High Speed Cutting Performance of (Al,Ti)N Coated Carbide Endmills*. *Proceedings 3th International Conference on Progress of Cutting and Grinding*. Vol. III, 1996, pp. 124-129.

8.2. Libros técnicos.

- Artiga, R. *Mecanitzat*. Ed. Dept. Ensenyament. Direcció general de Formació Professional, 2001. ISBN: 84-393-5315-4.
- Arnone, M. *Mecanizado Alta Velocidad y gran Precisión*. Ed. El MT, 2000. ISBN: 84-314-0477-9.
- Berlinches, A. *Calidad*. Ed. Paraninfo, 1999. ISBN 84-283-2477-8.
- Boothroyd, G.; Knight, W.A. *Fundamentals Machining and Machine Tools*, 2nd ed. M. Dekker, 1989. ISBN: 8247-7852-9.
- Budynas, R.; Nisbett J. *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. Ed. McGRAW-HILL, 2008. ISBN: 978-00-731-2193-2.
- Dashchenko, A. *Manufacturing Technologies for Machines of the future*. Ed. Springer, 2003. ISBN: 978-36-425-5776-7.
- Dudzinski, D.; Molinari, A.; Schulz, H. *Metal Cutting and High Speed Machining*. *Proceedings of the Third International Conference on Metal Cutting and High Speed Machining*, 2001. ISBN: 0-306-46725-9.
- Gómez, A. *Fresado de Alta Velocidad aplicado al sector de moldes y matrices*. Documentación de la jornada. Ed. Fundació ASCAMM, 2003.
- Groover, M. *Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes and systems*. 4th edition, Ed. John Wiley&Sons, 2010. ISBN: 978-04-704-6700-2.
- Kalplakjian, S.; Schmid, R. *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*. 5^a ed., Ed. Prentice Hall, 2008. ISBN: 970-26-1026-5.
- López de Lacalle, L. N.; Urizar R. *Fresado de Alta Velocidad, Proceso, Máquinas y Aplicaciones*. Ed. Técnicas Izaro, 1999. ISSN: 0210-1777.
- López de Lacalle, L. N.; Sánchez, J. A.; Lamikiz, A. *Mecanizado Alto Rendimiento*. Ed. Izaro, 2004. MINITAB Meet Release 14 for Windows, 2003. ISBN: 0-925636-48-7.
- Predev. *Surface Metrology Guide*. Ed. Precision Devices, Inc. 1998. [Consulta: febrero 2004].
Disponibile en: <<http://www.predev.com>>.

- Ciurana, J. [et al.] *Guía de Tecnologías de Rapid Manufacturing*. Ed. Documenta Universitaria, ASERM 2008. ISBN: 978-84-967-4218-5.
- Rein, J. *Moldes, Matrices y Estampado*. Ed. J. Bruguer, 1965. Depósito legal: B. 25407-1965.
- Sandvik, C. *Fabricación de Moldes y Matrices*. Dpto. Ed. Técnicas AB Sandvik C. 2002. Ref.: C-1102:2-SPA/01.
- Sandvik, C. *High speed machining and conventional die and mould machining*. Metalworking world, 1999. Ref. C-5000:329.
- Sandvik, C. *Guía de aplicación: Como reducir las vibraciones en el mecanizado*. Dpto. Ed. Técnicas AB Sandvik C. 1998. Ref. C-1020:5 SPA.
- Sandvik, C. *El mecanizado moderno*. Ed. Técnicas AB Sandvik C. 1994. ISBN: 91-972299-2-X.
- Schulz, H. *Scientific Fundamentals of HSC*. Ed. Hanser 2001.
- TCM. *Curso: Control Estadístico de Procesos (SPC)*. Ed. TCM, 2008.
- Valenciano, A. *Matricería*. Ed. Librería Salesiana, 1966. Depósito legal: B. 305-1966.

8.3. Normativas.

- (EN 10027-1:2005). Norma UNE-EN 10027-1:2006. *Sistemas de designación de aceros. Parte 1: Designación simbólica*. Ed. AENOR, 2006.
- (EN 10027-2:2015). Norma UNE-EN 10027-2:2016. *Sistemas de designación de aceros. Parte 2: Designación numérica*. Ed. AENOR, 2016.
- (ISO 513:2012). *Classification and application of hard cutting materials for metal removal with defined cutting edges-Designation of the main groups and groups of application*. Ed. ISO 2012.
- (ISO 690:2010). Norma UNE EN ISO 690:2013. *Directrices para la redacción de referencias bibliográficas y de citas de recursos de información*. Ed. AENOR, 2013.
- (ISO 1302:2002). Norma UNE-EN ISO 1302:2002. *Especificación geométrica de productos (GPS). Indicación de la calidad superficial en la documentación técnica de productos*. Ed. AENOR 2002.
- (ISO 1940-1:2003). *Mechanical vibration. Balance quality requirement for rotors in a constant (rigid) state. Part 1: Specification and verification of balance tolerances*. Ed. ISO, 2003.
- (ISO 2768-1:1989). Norma UNE-EN 22768-1:1994. *Tolerancias generales. Parte 1: tolerancias para cotas dimensionales lineales y angulares sin indicación individual de tolerancia*. Ed. AENOR, 1994.

- (ISO 2768-2:1989). Norma UNE-EN 22768-2:1994. *Tolerancias generales. Parte 2: tolerancias para cotas geométricas sin indicación individual de tolerancia*. Ed. AENOR, 1994.
- (ISO 4287:1999) Norma UNE-EN ISO 4287:1998. *Especificación geométrica de productos (GPS), Calidad superficial: Método del perfil. Términos, definiciones y parámetros del estado superficial*. Ed. AENOR, 1999.
- (ISO 4288:1996) Norma UNE-EN ISO 4288:1998. *Especificación geométrica de productos (GPS). Calidad superficial: Método del perfil. Reglas y procedimientos para la evaluación del estado superficial*. Ed. AENOR, 1998.
- (ISO 4957:1999). Norma UNE-EN ISO 4957:2000. *Aceros para herramientas*. Ed. AENOR 2000. (Norma vigente. Última revisión de AENOR a 21 diciembre 2009).
- (ISO 7144:1986). Norma UNE 50136:1997. *Documentación de tesis y documentos similares*. Ed. AENOR, 1997. (Norma vigente. Última revisión de AENOR a 30 junio 2016). [Consulta: junio 2017]. Disponible en:
<<http://publica.upc.edu/es/que-vols-publicar/tesis/recomanacions>>.
- (ISO 8688-2 1989). *Tool life testing in milling – Part 2. End milling*. Ed. ISO, 1989. (Norma vigente. Última revisión de AENOR a 26 abril 2015).
- (ISO 8785: 1998). Norma UNE-EN ISO 8785:2000. *Especificación geométrica de productos (GPS). Imperfecciones superficiales. Términos, definiciones y parámetros*. Ed. AENOR, 2000.
- (ISO 13399-2:2014). Norma ISO/TS 113399-2:2014. *Cutting tool data representation and exchange- Part 2: Reference dictionary for the cutting items*. Ed. ISO, 2014.
- (ISO 14253-2:2011). Norma UNE-EN ISO 14253-2:2012. *Especificación geométrica de productos (GPS). Inspección mediante medición de piezas y equipos de medida. Parte 2: Guía para la estimación de la incertidumbre en las mediciones GPS*. Ed. AENOR, 2012.
- (UNE 36018-2:1994) *Aceros para herramientas. Parte 2: Aceros trabajos en frío*. Ed. AENOR, 1994.
- (UNE 36018-3:1994) *Aceros para herramientas. Parte 3: Aceros trabajos en caliente*. Ed. AENOR, 1994.

8.4. Catálogos y documentos técnicos.

- ASCAMM. *Documento Guía para la elección de aceros y recomendaciones prácticas para la fabricación de moldes y matrices*, Ed. Fundación ASCAMM, 2000.
- Autoform. *AutoForm-StampingAdviser^{plus}*, 2017. [Consulta: marzo 2017]. Disponible en:
<<http://www.autoform.com/es/productos/autoform-stampingadviser-plus/>>.

- Böhler Aceros. *Aceros para trabajos en caliente*. Ed. Böhler Edelstahl, 1997. Ref.: W000 FSp 01.97. [Consulta: junio 2003]. Disponible en: <<http://www.acerosbohler.com>>.
- Böhler Aceros. *Special Steel Manual*. Ed. Böhler Edelstahl, 2000. Ref. AL005e-10.02-2000G.
- Böhler Aceros. *Böhler M333 ISOPLAST*. Acero para moldes de plástico. Ed. Böhler Edelstahl, 2002. Ref.: M333 FSp 06.2002.
- Böhler Aceros. *Special Steel Manual*. Ed. Böhler Edelstahl, 2009. Ref. AL005e-10.02-2009G.
- Celinsa. *Refrigeración de piezas por tubos enfriadores*, 2006. [Consulta: abril 2017]. Disponible en: <<http://www.celinsa.es/portfolio/tubos-enfriadores/>>.
- CGTech. *Software VERICUT 8*, 2016. [Consulta: marzo 2017]. Disponible en: <<http://www.cgtech.co.uk/products/about-vericut/>>.
- D'ANDREA. *Portapinzas de precisión equilibrables TOPRUN*. Catálogo D'ANDREA 2002.
- DMG. *ATC, Application Tuning Cycle*. Journal DMG-Innovative Technologies, ed. 1/2004, pp. 20.
- ESI Group. *ProCAST, Casting Simulation Suite*. ESI Group, 2017. [Consulta: septiembre 2017]. Disponible en: <<https://goo.gl/3kffmo>>
- Gerardi. *Sistemas de fijación*. Catálogo 2003. [Consulta: abril 2004].
- Gildemeister DMG. *Centros de precisión verticales DMC 75/105 V linear*. Catálogo ref. PRO.D3335/0504ES, 2004. [Consulta: junio 2004]. Disponible en: <<http://www.gildemeister.com>>.
- Fagor. *HSC. Mecanizado de alta velocidad con programación CNC 8060*. Ed. Fagor Automation, 2015. [Consulta: abril 2017]. Disponible en <<http://www.fagorautomation.com>>.
- Fidia. *HI-MILL, High-speed milling CAM*. Document 2001. [Consulta: noviembre 2003]. Disponible en <<http://www.fidia.com>>.
- Hasco. *Catalogo general 2017* [Consulta: octubre 2017]. Disponible en <<http://www.hasco.com>>.
- Heidenhain. *Modo de empleo Heidenhain iTNC 530*, 2004. [Consulta: mayo 2004]. Disponible en <<http://www.heidenhain.de>>.
- Heidenhain. *Los Controles Numéricos multifuncionales para fresadoras, mandrinadoras y centros de mecanizado* Documento técnico Heidenhain iTNC 530, 2006.
- Heidenhain. *Fast, Accurate Contour Milling with High Surface Definition, Technical Information Heidenhain iTNC 530*, 2007.
- Heidenhain. *Prestaciones totales*. Rev. Klartext nº 65, pp. 6-9, 2017.
- Hitachi. *Tool-Tec. Recommended Cutting Conditions*. Hitachi Tool Engineering Europe. Catalogue ref. HTT009 0309-5.0, 2003.
- Interempresas. *Industria de los moldes*. Rev. Técnica y Tecnología, nº 38, febrero 2016.
- Interempresas. *Industria 4.0 La Fábrica del Futuro*. Rev. Técnica y Tecnología, nº 39, marzo 2016.
- Kobelco. *Technical Manuals Drills and End Mills*. MMC Kobelco, 2001.

- Kobelco. *Fresas integrales de metal duro MIRACLE*. MMC Kobelco. Catálogo ref. LJ366SVC, 2002. [Consulta: noviembre 2003]. Disponible en: <<http://www.mitsubishicarbide.com>>.
- Kobelco. MMC Kobelco. *New High Performance Ultraprecision Ball nose End Mills*. Catálogo ref. LPNOVA01E, 2003.
- Mitsubishi Carbide. *Impact Miracle, serie de fresas*. Catálogo ref. IDD6, 2006.
- Mitsubishi Carbide. *Herramientas de corte de metal duro*. Catálogo general ref. 03DK/IDD, 2014.
- Mitsubishi. *A new generation of PVD coatings: MIRACLE SIGMA*. Ed. Mitsubishi Materials Corporation, 2014.
- Mitsubishi Carbide. *MS PLUS Series, carbide end mills*, Catálogo ref. B205G, 2016.
- Mori Seiki. *Centros de Mecanizado Vertical de alta precisión DCG*. Catalogue 2004. [Consulta: noviembre 2004]. Disponible en <<http://www.moriseiki.com>>.
- MST. *Tooling Systems for efficient machining*. Catalogue MST Corporation, ref. 0004, 2004a.
- MST. *Shrink-Fit Chucking system*. Catalogue MST serie Slimline, ref. 9904, 2004b.
- MST. *Heat Shrink Mechanism Slimline*. Catalogue MST ref. 1510, 2015.
- Oerlikon Balzers. Coatings overview. *Catalogue ref. Cutting Coatings*, 2011.
- Oerlikon Balzers. *Balinit ALDURA, extremely durable, ref. HQ026EN*, 2014. [Consulta: mayo 2014]. Disponible en <<https://goo.gl/O2S2tH>>.
- OPEN MIND. *Software de CAM: HyperMILL v2016.2*, 2016. [Consulta: noviembre 2016]. Disponible en <<https://goo.gl/j3obxS>>.
- OPEN MIND. *HyperMILL MAXX Machining, estrategias de rendimiento*, 2015. [Consulta: noviembre 2015]. Disponible en <<https://goo.gl/DeaaaU>>.
- Pepió, M.; Algaba, I. *Curso de Diseño de experimentos y optimización de procesos*. Apuntes del curso ETSEIAT-UPC, 2011.
- PROTOLABS. *Mould hand finishing*. 2017. [Consulta: marzo 2017]. Disponible en <<http://www.protolabs.com>>.
- SOLIDWORKS. *Diseño de moldes*. 2017. [Consulta: septiembre 2017]. Disponible en <<https://www.solidworks.es/sw/products/3d-cad/mold-design.htm>>.
- SAMEC. *Curso de introducción programa CAM Hypermill v.7*, 2003.
- Siemens PLM. *High Productivity part manufacturing. NX CAM a complete solution for making better parts faster*. 2015. [Consulta: septiembre 2015].
- Sartorius. *Technik-Handbuch 2008/2009*. Ed. Sartorius, 2008. Ref. 0199001007.
- Taylor. *Certificado de calibración del rugosímetro Taylor H.*, nº serie: 4168, 2004.
- Tungaloy. *Die & Mold*. Ed. Tungaloy Corporation, 2011.
- Tungaloy. *Technical Reference. Catalogue Tungaloy Cutting tools*. Ed. Tungaloy Corporation 2014.
- UCLM. *Guía práctica para la realización de medidas y el cálculo de errores*. Ed. UCLM, 2016.

9. PUBLICACIONES REALIZADAS.

A continuación se presenta una relación de todas las publicaciones realizadas sobre el tema de la tesis:

- Vivancos, J.; Luis, C. J.; Costa, L.; **Ortiz J. A.** *Optimal machining parameters selection in high speed milling of hardened steels for injection moulds*. Proceedings of International Conference on Advances in Materials and Processing Technologies, *AMPT* 2003, pp 815-818. Dublin (Ireland).
- Vivancos, J.; **Ortiz, J. A.**; Costa, L.; Luis, C. J. *Determining Factors in the Study of Surface Roughness in the High-Speed Milling of Hardened Mould Steel*. Proceedings of 8th International Research / Experts Conference “Trends in the Development of Machinery and Associated Technology”, *TMT* 2004a, pp. 15-18. Neum (Bosnia and Herzegovina). ISBN 9958-617-21-8.
- Vivancos, J.; Luis, C. J.; Costa, L.; **Ortiz, J. A.** *Optimal machining parameters selection in high speed milling of hardened steels for injection moulds*, *Journal of Materials Processing Technology* 155-156, 2004b, pp. 1505-1512. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2004.04.260.
- Vivancos, J.; Luis, C. J.; **Ortiz, J. A.**; González, H. A. *Analysis of factors affecting the high speed side milling of hardened die steels*. Proceedings of International Conference on Advances in Materials and Processing Technologies, *AMPT* 2005a, pp. 579-582. Wisla (Poland).
- Vivancos, J.; Luis, C. J.; **Ortiz J. A.**; González, H. A. *Analysis of factors affecting the high speed side milling hardened die steels*. *Journal Materials Processing Technology* 162-163, 2005b, pp. 696-701. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2005.02.155.
- Vivancos, J.; **Ortiz, J. A.**; González, H. A.; Luis, C. J. *Influence of the cutting method on the surface roughness obtained through the high speed side milling of different hardened die steels*. Proceedings of 9th International Research/Expert Conference on Trends in the Development of Machinery and Associated Technology, *TMT* 2005c, pp. 109-112. Antalya (Turkey). ISBN 9958-617-28-5.
- Vivancos, J.; González, H. A.; **Ortiz, J. A.**; Luis, C. J. *Surface Roughness components in high-speed milling*. Proceedings of 9th International Research/Expert Conference on Trends in the Development of Machinery and Associated Technology, *TMT* 2005d, pp. 73-76. Antalya (Turkey).
- Vivancos, J.; **Ortiz J. A.**; González, H. A. *Influence of the tool wear on the surface roughness obtained through the High Speed Milling of hardened mould steels*. Proceedings 10th International Research/Expert Conference on Trends in the Development of Machinery and

Associated Technology, *TMT* 2006, pp. 49-52. Lloret de Mar (Spain). ISBN 9958-617-30-7.

Disponible en <<http://www.tmt.unze.ba/zbornik/TMT2006/007-TMT06-157.pdf>>.

Vivancos, J.; **Ortiz, J. A.**; González, H. A. *Influence of the refrigeration-lubrication systems on the surface roughness in the high speed side milling of mould steels*. Proceedings of 11th International Research/Expert Conference on Trends in the Development of Machinery and Associated Technology, *TMT* 2007, pp. 7-10. Hammamet (Tunisia). ISBN 978-9958-617-34-8. Disponible en <<http://www.tmt.unze.ba/zbornik/TMT2007/002-TMT07-209.pdf>>.

Por otra parte se han publicado también diversos estudios de mecanizado convencional, relacionados de forma indirecta con la temática de la tesis. La relación de los estudios presentados se indica a continuación:

Salueña, X.; **Ortiz, J. A.**; Rio, C. *Influencia del recubrimiento en el desgaste de la herramienta en el torneado continuo de acabado en acero inoxidable y con microlubricación*. 2nd Manufacturing Engineering Society International Conference. *MESIC* 2007, pp. 201-208.

Ortiz, J. A.; Salueña, X.; Rio, C. *Estudio del desgaste de una herramienta de acero rápido en la operación de ranurado utilizando un sistema de microlubricación y un sistema de refrigeración por inyección de aire frío*. *MESIC* 2007, pp. 97-104. ISBN: 978-84-611-8001-1

Ortiz, J. A.; Salueña, X.; Mínguez, A.; Capilla, A. I. *Study about cutting tool wear in side milling operations of mould steels*. Proceedings of 8th International Research/Expert Conference on Trends in the Development of Machinery and Associated Technology, *TMT* 2004, pp. 63-66.

En la etapa previa a la elaboración de la tesis, cuando el doctorando trabajó en el departamento técnico-comercial de la empresa Utiltall, S.A, se especializó en los procesos de fresado en alta velocidad, realizando el asesoramiento técnico a empresas clientes de Utiltall, en especial, a empresas del sector del molde y matriz. Por este motivo, el doctorando colaboró en la elaboración de cuatro artículos publicados en revistas técnicas, con la temática relacionada de la tesis, así como en la elaboración de unas tablas de mecanizado completas, con las condiciones de corte y formulación básica, para realizar las distintas operaciones de fresado en alta velocidad.

- Utiltall. *Comportamiento de las fresas MIRACLE en el mecanizado en seco de acero templado hasta 65 HRC*. Revista Metalurgia y Electricidad nº 706, mayo 1998, pp. 34-37.
- Utiltall. *Fresado de Alta Velocidad desde la óptica de la herramienta*. Revista TOPE, octubre 1998, nº 40, pp. 41-43.

- Utiltall. *El mecanizado directo de materiales templados en Alta Velocidad*. Revista IMHE, mayo 1999, pp. 34-35.
- Utiltall. *Mecanizado de alto rendimiento con material templado a 58-65 HRC*. Revista TOPE, noviembre 1999, pp. 25-28.
- Utiltall. *Tablas de mecanizado para fresas Miracle* ©. Dpto. Técnico Utiltall, 2002.

En este punto, es necesario también mencionar la asistencia del doctorando a diversas jornadas técnicas relacionadas con la tesis:

- *Diseño y Fabricación de Moldes y Matrices*. Centre Català del Plàstic, 1997. Terrassa (Barcelona).
- *State and development of the machinability investigation methods*. Sabahudin E. ETSEIB (UPC), 1998. Barcelona.
- *“Rapid Manufacturing” Aplicación de las nuevas técnicas de diseño y fabricación de moldes de inyección*. Fundación ASCAMM, 1999. Cerdanyola (Barcelona).
- *Fresado a Alta Velocidad aplicado a la fabricación de moldes y matrices*. Fundación ASCAMM, 2003. Cerdanyola (Barcelona).
- *Mecanizado a Alta Velocidad “últimas tendencias”*. Dpto. técnico Mitsubishi. Centre Tecnològic Eduard Soler, 2007. Ripoll (Girona).

Asistencia como ponente a diferentes congresos internacionales donde se publicaron algunos de los artículos citados anteriormente:

- *8th International Research / Experts Conference “Trends in the Development of Machinery and Associated Technology”*, TMT 2004. Neum (Bosnia and Herzegovina).
- *10th International Research / Experts Conference “Trends in the Development of Machinery and Associated Technology”*, TMT 2006. Lloret de Mar (Girona)
- *1^a Jornada de Interempresas: Aceros Inoxidables, presente y futuro de su transformación*. 2015. Institut Quimic Sarrià (Barcelona).

10. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS COMPLEMENTARIAS.

A continuación, se detalla una gran variedad de bibliografía consultada, que no se ha citado en la memoria de esta tesis, ni en la lista de referencias principal, pero que puede complementar el conocimiento de multitud de aspectos, que en mayor o menor medida, están relacionados con la presente tesis.

10.1. Artículos de Investigación.

Alcalde, J. M. *Mecanizado Alta Velocidad*, Rev. TOPE, octubre 1998, pp. 18-22.

Alique, J. R. [et al.]. *Sistema de planificación, control y monitorización inteligente de los procesos de mecanizado a alta velocidad*. Instituto de Automática Industrial, CSIC XIV Congreso de Máquinas-Herramienta y Tecnologías de Fabricación. Vol. I, 2002, pp. 571-586.

Almandoz, X. *La máquina de alta velocidad, requisitos y nuevas estructuras de máquina*. Fresado Alta velocidad, Ed. Izaro, 1999, pp. 95-98.

Altan, T. [et al.]. *Advanced Techniques for Die and Mold Manufacturing*. Annals of the CIRP, Vol. (42/2), 1993, pp. 707-714.

Altintas, Y; Engin, S. *Generalized Modelling of Mechanics and Dynamics of Milling Cutters*. Annals of the CIRP, Vol. (50/1), 2001, pp. 25-30.

Altintas, Y; Erkozkman, J. *Feedrate optimization for Spline Interpolation in High Speed Machine Tools*. Annals of the CIRP, Vol. (52/1), 2003, pp. 34-41.

Antoniadis, A. [et al.]. *Influence of machining inclination angle on surface quality in ball end milling*. Proceedings of Advances in Materials and Processing Technologies, 2003, pp. 844-847.

Arizmendi, M. [et al.]. *Influencia del desgaste de la herramienta sobre la geometría del perfil de rugosidad de la pieza y decisión automática del reemplazo de herramienta en fresado de alta velocidad de aleaciones de aluminio 7075*. XIV Congreso de Máquinas-Herramienta y Tecnologías de Fabricación. Vol. I, 2002, pp. 131-150.

Arizmendi, M. [et al.]. *Model development for the prediction of surface topography generated by ball-end mills taking into account the tool parallel axis offset. Experimental validation*. CIRP Annals-Manufacturing Technology. Vol. 57, 2008, pp 101-104.

Arrazola, P. [et al.]. *Modelización numérica del proceso de formación de viruta: Identificación de la fricción entre viruta y herramienta*. XIV Congreso de Máquinas-Herramienta y Tecnologías de Fabricación. Vol. I, 2002, pp. 169-182.

- Alvarez, J.A.; Buj, I.; Vivancos, J. *Analysis of roughness, force and vibration signals in ball-end milling processes*. Journal of trends in the development of machinery and associated technology. Vol. 19, Nº 1, 2015, pp.11-14.
- Becze, C.E. [et al.]. *High-Speed Five-Axis Milling of hardened Tool Steel*. Int. Journal of Machine Tools & Manufacture. Vol. 40, 2000, pp. 869-885.
- Bergera, M.; Gimenez, J. G. *Análisis de Chatter en fresado frontal de alta velocidad*. Congreso de Máquinas-Herramienta y Tecnologías de Fabricación. Vol. II, 2002, pp. 717-722.
- Brinksmeier, E. [et al.]. *Polishing of Structured Molds*. Annals of the CIRP. Vol. (53/1), 2004, pp. 25-30.
- Bouzakis, K.-D. [et al.]. Determination of the chip geometry, cutting force and roughness in free form surfaces finishing milling with ball end tools. Int. Journal of Machine Tools & Manufacture. Vol 43, 2002, pp. 499-514.
- Bueno, R.; Etxeberria, I. *Ensayos virtuales de mecanizado a alta velocidad*, Rev. IMHE, marzo 2002, pp. 116-121.
- Buj, I; Vivancos, J.; González, H. *Influence of the tool eccentricity on the surface roughness obtained in side milling process*. Proceedings of 13th International Research / Experts Conference “Trends in the Development of Machinery and Associated Technology”, TMT 2009, pp. 5-8.
- Buj, I; Vivancos, J.; Casado, R. *Methodology and adjustment of the test for determining the polishing difficulty degree of hardened steel surfaces, previously obtained by high speed milling processes*. Proceedings of 14th International Research / Experts Conference “Trends in the Development of Machinery and Associated Technology”, TMT 2010, pp. 37-40.
- Buj, I; Vivancos, J.; Domínguez, A. *Surface topography in ball-end milling processes as a function of feed per tooth and radial depth of cut*. International Journal of Machine Tools & Manufacture. Vol. 53, Issue 1, 2012, pp. 151-159.
- Cassier, Z.; Muñoz, P. *Predicción de acabado superficial de piezas mecanizadas en acero inoxidable*. XIII Congreso Nacional Ingeniera Mecánica, Vol. VIII, 1998, pp. 50-55.
- Chevrier, P. [et al.]. *Investigation of surface integrity in high speed end milling of a low alloyed steel*. Int. Journal of Machine Tools & Manufacture. Vol. 43, 2003, pp. 1.135-1.142.
- Chu, C.N.; Kim, S. Y.; Lee, J. M. *Feed-Rate Optimization of Ball End Milling Considering Local Shape Features*. Annals of the CIRP. Vol. (46/1), 1997, pp. 433-436.
- Colding, B.N. *A predictive Relationship between Forces, Surface Finish and Tool-Life*. Annals of the CIRP. Vol. (53/1), 2004, pp. 34-40.
- Ekinovic, S.; Vivancos, J.; Dolinsek, S. *The Comparison of High-Speed Turn-Milling and Conventional Turning from the Aspect of Machined Surface Quality*. Proceedings of RIM

2001. Revitalization and Modernization of Production. 3rd International Symposium, 2001, pp. 257-262.
- Ekinovic, S.; Tufekcic, D.; Nezirovic, S. *Surface Quality in High Speed Turn-Milling of steel C.4131*, Proceedings of the 1st. Int. DAAAM Conference on Advanced Technologies for developing Countries, 2002a, pp. 187-190.
- Ekinovic, S. [et al.]. *Chip formation process and some particularities of high-speed milling of steel materials*. Proceedings of the 6th Int. Conference on Trends in the Development of Machinery and Associated Technology, 2002b, pp. 47-50.
- El-Wardany, T. I.; Kishawy, H. A.; Elbestawi, M. A. *Surface Integrity of die Material in High Speed Hard Machining*, Part 1: Micrographical Analysis, Transaction of the ASME, Journal of Manufacturing Science and Engineering. Vol.122, 2000, pp. 137-144.
- Field, M.; Kahles, J. F.; Koster, W.P. *Surface Finish and Surface Integrity*. Metals Handbook, 9th Ed. ASM International, 1989, pp. 19-36.
- Flom, D. G.; Komanduri, R. *High-Speed Machining*. Metals Handbook 9th Ed. ASM International. Vol. 15, 1989, pp. 597-606.
- González, H.; Buj, I; Vivancos, J. *Numerical simulation model for the determination of surface roughness in side milling as a function of feed and of the tool edges radii*. Proceedings of 12th International Research / Experts Conference “Trends in the Development of Machinery and Associated Technology”, TMT 2008, Turkey, pp. 89-92.
- González, H.; Buj, I; Vivancos, J. *Influence of runout on the Surface roughness obtained in side milling processes*. Proceeding of the 3rd International Manufacturing Engineering Society Conference, MESIC 2009, Spain, pp. 83-90.
- Gray, P. [et al.]. *Comparison of 5-axis and 3-axis finish machining of hydroforming die inserts*. Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology. Vol. 17/8, 2001, pp. 562-569.
- Heisel, U.; Feinauer, A. *Dynamic Influence on Workpiece Quality in High Speed Milling*. Annals of the CIRP. Vol. (48/1), 1999, pp. 321-324.
- Herranz, S. [et al.]. *Utilización de piezas test en la optimización de centros de mecanizado de diferente arquitectura*. Rev. IMHE, Diciembre 2001, pp. 79-90.
- Inspurger, T. [et al.]. *Stability of up-milling and down-milling, part 1: alternative analytical methods*. Machine Tools & Manufacture. Vol. 43, 2003, pp. 25-34.
- Jahn, R.; Truckenbrodt, H. *A simple fractal analysis method of the surface roughness*. Journal of Materials Processing Technology. Vol. 145, 2004, pp. 40-45.
- Juan, H.; Yu, S.F.; Lee, B.Y. *The optimal cutting-parameter selection of production cost in HSM for SKD61 tool steels*. Machine Tools & Manufacture. Vol. 43, 2003, pp. 679-686.

- Karayel, D. *Prediction and control of surface roughness in CNC lathe using Artificial Neural Network*. Journal of Materials Processing Technology. Vol. 209, 2009, pp. 3.125-3.137.
- Kukino, S. [et al.]. *High speed and Precision Cutting Technology of Hardened Steel with PCBN Tool*. Proceedings of the 2nd International Conference on High Speed Machining, Darmstadt, 1999.
- Lamikiz, A. [et al.]. *Modelización del corte con fresas esféricas mediante métodos empíricos*. XV Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica. Vol. III, 2002b, pp. 131-150.
- Lapujoulade, F. *Prediction du comportement vibratoire*. Mecanique & Industrie VIII n° 4, 2002.
- Lee, C.M. [et al.]. *The optimal cutter orientation in ball end milling of cantilever-shaped thin plate*. Advances in Materials and Processing Technologies, 2003, pp. 848-851.
- Liu, Z.Q. [et al.]. *Wear patterns and mechanisms of cutting tools in high-speed face milling*. Journal of Materials Processing Technology. Vol. 129, 2002, pp. 222-226.
- Lonardo, P.M.; Lucca, D. A.; De Chiffre, L. *Emerging Trends in Surface Metrology*. Annals of the CIRP, Vol (51/2), 2002, pp. 701-723.
- López de Lacalle, L.N. [et al.]. *Cutting Conditions and tool Optimisation in the High Speed Milling of Aluminium Alloys*, Journal of Engineering Manufacture. Proc. Int. Mechanical, part B. Vol. 215, 2001, pp. 1.257-1.269.
- López de Lacalle, L.N. [et al.]. *Process planning for reliable high-speed machining of moulds*. International Journal of Production Research Vol. 40 n° 12, 2002b, pp. 2.789-2.809.
- Löttgen, R. *Selección de máquinas para el mecanizado de alta velocidad*. HSMtoday nr. 13, 2002, pp. 4-5.
- Lu, Ch. *Study on prediction of surface quality in machining process*. Journal of Materials Processing Technology, n° 205, 2008, pp. 439-450.
- Mitsubishi, M.; Warisawa, S.; Hanayama, R. *Development of an Intelligent High-Speed Machining Center*. Annals of the CIRP. Vol. (50/1), 2001, pp. 275-280.
- Ng, E-G. [et al.]. *High Speed Face Milling of a Aluminium Silicon Alloy Casting*. Annals of the CIRP. Vol. (46/1), 1997, pp. 57-62.
- Nguyen, H.-T.; Hsu, Q.-Ch. *Surface Roughness Analysis in the Hard Milling of JIS SKD61 Alloy Steel*. Applied Sciences. Vol. 6-172, 2016, pp. 1-15.
- Ning, Y.; Rahman, M. *Investigation of Chip Formation in High-Speed End Milling*, Journal of Materials Processing Technology. Vol.113, 2001, pp. 360-367.
- Pang, J. Z.; Wang, M. J.; Duan, C. Z. *White Layer and Surface Roughness in High Speed Milling of P20 Steel*, Advanced Materials Research. Vol. 24-25, 2007, pp. 45-54.
- Peláez, J. [et al.]. *Relación entre la rugosidad real y los parámetros de mecanizado avance, velocidad de corte y profundidad de pasada*. XIV Congreso de Máquinas-Herramienta y Tecnologías de Fabricación. Vol. I, 2002, pp. 119-130.

- Peters, J. *Contribution of CIRP to the Development of Metrology and Surface Quality Evaluation during the last fifty years*. Annals of the CIRP, Vol. (50/2), 2001, pp. 150-168.
- Quintana, G; Ciurana, J.; Ribatallada, J. *Surface roughness generation and material removal rate in ball end milling operations*. Journal Materials and Manufacturing Processes. Vol. 25, 2010, pp. 386-398.
- Rivero, A. [et al.]. *Desarrollo de nuevas estrategias de mecanizado de alta velocidad para piezas de automoción*. XIV Congreso de Máquinas-Herramienta y Tecnologías de Fabricación, San Sebastián. Vol. II, 2002, pp. 635-647.
- Salgado, M. A. [et al.]. *Estrategias de mecanizado en 5 ejes*. XIV Congreso de Máquinas-Herramienta y Tecnologías de Fabricación. Vol. I, 2002, pp. 197-213.
- Schmitz, T.L.; Donaldson, R.R. *Predicting high-speed machining dynamics by substructure analysis*. Annals of the CIRP. Vol. (49/1), 2000, pp. 303-308.
- Schultz, H. *High Speed Cutting*. Annals of the CIRP. Vol. (49/1), 2000, pp. 309-312.
- Schultz, H. *High-Speed Machining*. Manufacturing Technologies for Machines of the future. Ed. Springer, 2003, pp. 197-214.
- Schultz, H. *Keypoints of High-Speed-Cutting*. Proceedings of the 8th Int. Conference on Trends in the Development of Machinery and Associated Technology, 2004, pp. 11-14.
- Smith, S.; Winfough, W. R.; Borchr, H. J. *Power and Stability Limits in Milling*. Annals of the CIRP. Vol (49/1), 2000, pp. 309-312.
- Sokovic, M.; Dobrzanski, L. A.; Panjan, P. *Wear behaviour on PVD-coated end mill cutters in high-speed machining*. Proceedings of the 6th Int. Conference on Trends in the Development of Machinery and Associated Technology, 2002, pp. 51-54.
- Tanshoff, H.K. *Cutting of Hardened Steel*. Annals of the CIRP, Vol.(49/2), 2000, pp. 547-566.
- Tlustý, J. *High-Speed Machining*. Annals of the CIRP, Vol. (42/2), 1993, pp. 733-738.
- Ueda, T. [et al.]. *Temperature on flank face of cutting tool in High Speed Milling*. Annals of the CIRP. Vol. (50/1), 2001, pp. 37-40.
- Yilbas, Z.; Hashmi M. *An Optical Method and Neural Network for Surface Roughness Measurement*. Optics and lasers in Engineering. Vol. 29, 1998, pp. 1-15.
- Zain, A. M.; Haron, H.; Sharif, S. *Prediction of surface roughness in the end milling machining using Artificial Neural Network*. Expert Systems with applications. Vol. 37, 2010, pp. 1.755-1.768.
- Zatarain, M. [et al.]. *Ensayos de caracterización y validación de máquinas herramienta*. Rev. MetalUnivers, septiembre 2003, pp. 10-14.

10.2. Libros y documentos.

- ASM. *Metals Handbook* 9th Ed. ASM International, Vol. 15-Machining, 1989.
- CETIM. *Fraisage et perçage des métaux durs: les atouts de l'usinage à grande vitesse*, Ed. CETIM, 1996.
- Beigbeder F. *Diccionario técnico Inglés-Español, Español-Inglés*. 2ª Ed. Díaz de Santos, 2006. ISBN 84-7978-743-0
- Chansel, P.; Lefebvre, M. *Qualité des surfaces fraisées*. Ed. CETIM, 1998.
- Childs, T. [et al.]. *Metal Machining, Theory and applications*. Ed. Arnold, 2000.
- Desplat, C. *UGV sur outillages-Synthèse des travaux menés par le Cetim*. Ed. CETIM, 2004.
- Edebe. *Tecnología Mecánica 3 : Matriceria y Moldes*. Ed. Don Bosco, 1981. ISBN 84-236-1625-8.
- Ekinovic, S. *State and development of the machinability investigation methods*. Ed. UPC, 1998.
- Hommelwerke. *Surface Texture Analysis, The Handbook*. Ed. Thyssen, 1997.
- Kobelco. *Miracle/Violet drills & End Mills series*. Catalog ref. 9810-D, 1998.
- López de Lacalle, L.N. [et al.]. *Mecanizado de Alto Rendimiento*. Ed. Técnicas Izaro, 2004. ISBN 84-609-1380-5.
- Menges, G.; Mohren, P. *How to Make Injection Molds*. 2nd Ed. Hanser, 1993.
- Montgomery, D. *Diseño y análisis de experimentos*. 2ª Ed. Limusa, 2004. ISBN: 96-818-6156-6
- Peña, D. *Regresión y diseño de experimentos*. Ed. Alianza, 2002. ISBN: 978-84-206-9389-7.
- Prat, A. [et al.]. *Métodos Estadísticos. Control y Mejora de la Calidad*. Ed. UPC, 1997. ISBN 978-84-988-0232-0.
- Rees, H.: *Mold Engineering*. Ed. Hanser, 1995.
- Sandvik. *Métodos de fresado. Guía de aplicaciones*. Ed. AB Sandvik C., 2007. Ref. C-1120:6 SPA/01.
- Schultz, H. *Scientific Fundamentals of HSC*. Ed. Hanser 2001.
- Schultz, H. *Fraisage Grande Vitesse*. Ed. Sofetec 1998.
- Srinivasan, K.; Devries, W. R. *Computer Aided Design and Manufacture of Dies and Molds*. ASME 1988.
- Tekniker. *Jornada de Fresado de alta velocidad*. Libro de ponencias. Tekniker, septiembre 1987.
- Thomas, T. R. *Rough Surfaces*. Imperial College Press, 1999.
- Whitehouse, D. J. *Handbook of surface metrology*. Ed. Rank Taylor Hobson, 1994.

10.3. Normativas varias.

(ASME 2002). Norma ASME B46.1-2002: *Surface Texture (Surface Roughness, Waviness, and Lay)*. American National Standard, 2003.

(ISO3274:1996). Norma UNE-EN ISO 3274:1998. *Especificación geométrica de productos (GPS), Calidad superficial: Método del perfil. Características nominales de los instrumentos de contacto (palpador)*. Ed. AENOR, 1998 .

(ISO12085:1996). Norma UNE-EN ISO 12085:1998. *Especificación geométrica de productos (GPS), Calidad superficial: Método del perfil. Parámetros ligados a los detalles*. Ed. AENOR, 1998.

(ISO 13565-1:1996). Norma UNE-EN ISO 13565-1:1998. *Especificación geométrica de productos (GPS), calidad superficial: Método del perfil; superficies con propiedades funcionales distintas, según el nivel de profundidad. Parte 1: Filtrado y condiciones generales de medida*. Ed. AENOR, 1998.

(ISO 13565-2:1996). Norma UNE-EN ISO 13565-2:1998. *Especificación geométrica de productos (GPS), calidad superficial: Método del perfil; superficies con propiedades funcionales distintas, según el nivel de profundidad. Parte 2: Caracterización de alturas mediante la curva de porcentaje de material (Curva de Abbott)*. Ed. AENOR, 1998.

(ISO 13565-3:1998). Norma UNE-EN ISO 13565-3:2001. *Especificación geométrica de productos (GPS), calidad superficial: Método del perfil; superficies con propiedades funcionales distintas, según el nivel de profundidad. Parte 3: Caracterización de alturas mediante la curva de probabilidad de material*. Ed. AENOR, 2001.

10.4. Estudios de investigación.

Arranz, F. *Definición de ensayos funcionales de herramientas considerando las características del proceso y la máquina*. Tesis doctoral, ETSIIM, 2001.

Castellano, LL.; Martín, J. *Estado del Arte de la Mecanización a Alta Velocidad y sus Aplicaciones*. Proyecto Final Carrera, tutor: Vivancos, J. ETSEIB, 2001.

Dugas, A. *CFAO et UGV – Simulation d'usinage de formes complexes*. Tesis doctoral, Université de Nantes, 2002.

Quintana, G. *Stability lobes diagram identification and surface roughness monitoring in milling processes*. Tesis doctoral. Universitat de Girona, 2009.

Souza, A. F. *Contribuições ao Fresamento de Geometrias Complexas Aplicando a Tecnologia de Usinagem com Altas Velocidades*. Tesis doctoral, tutor: Teixeira, R. USP, 2004.

10.5. Proyectos de investigación.

Metodología DESFAV 2.0. *Detección y Solución de Errores en el Fresado a Alta Velocidad*. Dpto. de Ingeniería Mecánica de la Universidad del País Vasco, 1998.

Proyecto ABIACOOOP. *Aplicación de los procesos de mecanizado a alta velocidad en la fabricación de moldes y matrices. Desarrollo de estrategias de mecanizado*. Tekniker, 1997.

Proyecto ABIADURA. *Desarrollo del mecanizado a alta velocidad para materiales de difícil maquinabilidad*. Tekniker, 1997.

Proyecto OPMAVPUL. Informe proyecto de investigación DPI-2007-66546: *Optimización del acabado superficial de moldes y matrices fabricados con aceros templados mediante el proceso de fresado a alta velocidad, en función del pulido posterior*. UPC 2010.

Proyecto CIMEC. Nueva generación de sistemas ciber-físicos para el aumento de productividad en sectores del alto valor añadido. Ref. RTC-2016-5097-3. Soraluze 2016.

“Nunca es tarde, si la dicha es buena”