



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior (Jaén)

Trabajo Fin de Grado

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL MICROMECHANIZADO

Alumno: Antonio Navas Valenzuela

Tutor: Prof. D. Diego Carou Porto

Cotutor: Prof. D. Alberto García Collado

Dpto: Ingeniería Mecánica y Minera

Septiembre, 2019



Universidad de Jaén
Escuela Politécnica Superior de Jaén
Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera

Don Diego Carou Porto y Don Alberto García Collado, tutores del Trabajo Fin de Grado titulado: Estudio Experimental del Micro-mecanizado, que presenta Antonio Navas Valenzuela, autorizan su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, septiembre de 2019

El alumno:

Los tutores:

Antonio Navas Valenzuela

Diego Carou Porto

Alberto García Collado

Agradecimientos

En primer lugar, agradecer por toda la ayuda prestada, información aportada y orientación a la hora de afrontar este trabajo al tutor de este proyecto, el profesor D. Diego Carou Porto. Ha sido increíble todo el apoyo prestado, las ingentes horas de trabajo y de revisión de este proyecto, así como la confianza depositada en mi persona para llevar a cabo el estudio que aquí se presenta. Por otro lado, gracias también por seleccionarme, tanto él como todo el departamento, para percibir la beca de Iniciación a la Investigación ofrecida por el Departamento de Ingeniería Mecánica, y por animarme siempre a mejorar el trabajo existente. Has sido la mente inspiradora y el mayor apoyo que he tenido durante todo este tiempo, y espero haber cumplido todas tus expectativas.

También quiero agradecer toda la atención y ayuda que me ha dado el profesor D. Gustavo Medina Sánchez a la hora de realizar la calibración de los diferentes elementos de medida, aportando ideas de cara a los estudios realizados y perdiendo una parte de su tiempo (que, al igual que el de Diego, no es mucho) para mejorar en todo lo posible este proyecto.

Agradecerle también al profesor Dr. Carlos Henrique Lauro todo su trabajo realizando los diferentes análisis de fuerzas de los ensayos realizados, puesto que sin sus conocimientos y apoyo una parte muy importante de los estudios aquí presentados no habrían sido posibles. También quiero agradecerle todas las aclaraciones, correcciones y puntualizaciones hechas durante todo este tiempo y que han permitido el conocer la materia de estudio mucho más en profundidad.

Por último, y no menos importante, quiero dar las gracias al profesor y jefe de taller D. Mario Miró Barnés por estar siempre dispuesto a buscar un pequeño hueco para poder realizar todos los experimentos hechos en el Campus de Linares, dejando de lado otros proyectos y trabajos para ayudar en todo lo posible y contribuir a obtener unos buenos resultados en los ensayos estudiados.

“¿Qué es un maestro? No es aquel que enseña algo, sino aquél que inspira al alumno a dar lo mejor de sí para descubrir un conocimiento que ya tiene dentro de su alma.”

Paulo Coelho

V

Índice de figuras

Imagen 1. Efecto del radio de herramienta en mecanizado convencional (izquierda) y micromecanizado (derecha) (Aramcharoen <i>et al.</i> , 2008).	8
Imagen 2. Izquierda: esquema del desplazamiento del filo de la herramienta. Derecha: valor del "run out" y ángulo estimado (Singh <i>et al.</i> , 2018).	13
Imagen 3. Fresadora Odisea.	18
Imagen 4. Fresadora CNC Lagun L650.	20
Imagen 5. Dinamómetro Kistler modelo 9257B.	22
Imagen 6. Izquierda: palpador empleado en fresadora Odisea. Derecha: palpador empleado en fresadora Lagun L650.	23
Imagen 7. Rugosímetro Mitutoyo SJ-210.	23
Imagen 8. Disposición del rugosímetro Mitutoyo SJ-210.	24
Imagen 9. Equipo de microfluorescencia de rayos X M4 Tornado.	25
Imagen 10. Microscopio estereoscópico.	25
Imagen 11. Espectro de la pieza obtenido en el equipo de microfluorescencia de rayos X. .	26
Imagen 12. Fresas empleadas para los ensayos.	27
Imagen 13. Ranura recta (T1).	38
Imagen 14. Ranura curva (T2).	38
Imagen 15. CAD de los ensayos a realizar (herramienta de 4 mm).	42
Imagen 16. Programación en Catia V5.	43
Imagen 17. Parámetros de mecanizado del ensayo 1 con fresa de 4 mm.	44
Imagen 18. Cabecera de código para fresa de 4 mm en Odisea.	45
Imagen 19. Disposición de experimentos en fresadora Odisea (4mm).	47
Imagen 20. Disposición de experimentos en Lagun L650 para fresa de 4 mm de diámetro. Izquierda: vista frontal. Derecha: vista cenital.	47
Imagen 21. Disposición de experimentos en Lagun L650 (2,5 mm)	48
Imagen 22. Vista frontal de la medida de la horizontalidad transversal de la pieza pequeña, posición inicial.	50
Imagen 23. Vista frontal de la medida de la horizontalidad transversal de la pieza pequeña, posición final.	50
Imagen 24. Disposición de pieza y fresa de 4 mm para el ensayo en Odisea.	53
Imagen 25. Diferentes vistas del mecanizado en Odisea con fresa de 4 mm. Izquierda: vista desde esquina delantera. Derecha: vista desde esquina trasera.	53
Imagen 26. Disposición de pieza y fresa de 4 mm para el ensayo en fresadora Lagun L650, con pasada de planeado ya realizada.	54
Imagen 27. Mecanizado realizado en Lagun L650 con fresa de 4 mm.	55
Imagen 28. Disposición de la pieza en fresadora Lagun L650 para mecanizado con fresa de 2,5 mm de diámetro.	56
Imagen 29. Mecanizado realizado en Lagun L650 con fresa de 2,5 mm de diámetro.	57
Imagen 30. Ranuras rectas mecanizadas en fresadora Odisea con fresa de 4 mm de diámetro. Izquierda: ranura sin defectos (ensayo 2). Derecha: ranura con defectos (ensayo 4).	74
Imagen 31. Ranuras curvas mecanizadas en fresadora Odisea con fresa de 4 mm de diámetro. Izquierda: ranura sin defectos (ensayo 17). Derecha: ranura con defectos (ensayo 8).	75

Imagen 32. Ranuras rectas mecanizadas en fresadora Lagun L650 con fresa de 4 mm de diámetro. Izquierda: ranura sin defectos (ensayo 1). Derecha: ranura con defectos (ensayo 7).....	75
Imagen 33. Ranuras curvas mecanizadas en fresadora Lagun L650 con fresa de 4 mm de diámetro. Izquierda: ranura sin defectos (ensayo 16). Derecha: ranura con defectos (ensayo 23).....	75
Imagen 34. Ranuras rectas mecanizadas en fresadora Lagun L650 con fresa de 2,5 mm de diámetro. Izquierda: ranura sin defectos (ensayo 8). Derecha: ranura con defectos (ensayo 5).....	76
Imagen 35. Ranuras curvas mecanizadas en fresadora Lagun L650 con fresa de 2,5 mm de diámetro. Izquierda: ranura sin defectos (ensayo 7). Derecha: ranura con defectos (ensayo 13).....	76
Imagen 36. Fresa de 4 mm empleada en fresadora Odisea. Izquierda: posición vertical. Derecha: posición horizontal.	88
Imagen 37. Cara de incidencia (izquierda) y posterior a incidencia (derecha) analizada para fresa de 4 mm empleada en fresadora Odisea (puntos 1 y 2).	88
Imagen 38. Cara de desprendimiento para fresa de 4 mm empleada en fresadora Odisea (punto 3).....	89
Imagen 39. Imagen del espectro total obtenido en los ensayos.....	89
Imagen 40. Imagen de ejemplo del espectro obtenido para la fresa de 4 mm empleada en Odisea, realizando el mapeado del punto 3.....	90
Imagen 41. Disposición horizontal de fresa de 4 mm utilizada en Lagun L650.	91
Imagen 42. Cara de incidencia y posterior analizadas en fresa de 4 mm usada en Lagun L650.	91
Imagen 43. Cara de desprendimiento de fresa de 4 mm utilizada en Lagun L650.....	92
Imagen 44. Izquierda: disposición vertical de fresa de 2,5 mm empleada en Lagun L650. Derecha: disposición horizontal de fresa de 2,5 mm empleada en Lagun L650.	93
Imagen 45. Cara de incidencia (izquierda) y posterior a incidencia (derecha) analizadas en fresa de 2,5 mm utilizada en Lagun L650.	93
Imagen 46. Cara de desprendimiento analizada en fresa de 2,5 mm usada en Lagun L650.	94
Imagen 47. Extremo de fresa de 4 mm utilizada en fresadora Odisea (vertical).	97
Imagen 48. Extremo de fresa de 4 mm utilizada en fresadora Odisea (horizontal). Izquierda: vista de cara de desprendimiento y posterior a incidencia. Derecha: vista de filo de la fresa.	97
Imagen 49. Extremo de fresa de 4 mm utilizada en Lagun L650 (vertical).....	98
Imagen 50. Extremo de fresa de 4 mm utilizada en Lagun L650 (horizontal).....	98
Imagen 51. Extremo de fresa de 2,5 mm utilizada en Lagun L650 (vertical).....	98
Imagen 52. Extremo de fresa de 2,5 mm utilizada en fresadora Lagun L650 (horizontal). Izquierda: vista de cara de incidencia. Derecha: vista de filo de la fresa y cara posterior a incidencia.	99

Índice de tablas

Tabla 1. Características fresadora Odisea.....	18
Tabla 2. Porcentajes de elementos en el material de ensayo.	26
Tabla 3. Velocidades de corte empleadas por diferentes autores.....	32
Tabla 4. Velocidades de corte en fresadora Odisea.	32
Tabla 5. Velocidades de avance y avances por diente utilizados por diferentes autores.	35
Tabla 6. Velocidades de avance y avances por diente a utilizar con la fresa de 4 mm.	35
Tabla 7. Velocidades de avance y avances por diente a utilizar con la fresa de 2,5 mm.	36
Tabla 8. Profundidades de corte empleadas por diferentes autores.	37
Tabla 9. Niveles de las diferentes variables de estudio.	39
Tabla 10. Diseño de experimentos con fresa de 4 mm de diámetro.	40
Tabla 11. Diseño de experimentos con fresa de 2,5 mm de diámetro.	41
Tabla 12. Rugosidades obtenidas en los ensayos realizados en fresadora Odisea con fresa de 4 mm de diámetro.	60
Tabla 13. Rugosidades medias calculadas para los ensayos realizados en fresadora Odisea con fresa de 4 mm de diámetro.	61
Tabla 14. Rugosidades obtenidas en los ensayos realizados en fresadora Lagun L650 con fresa de 4 mm de diámetro.....	62
Tabla 15. Rugosidades medias calculadas para los ensayos realizados en fresadora Lagun L650 con fresa de 4 mm de diámetro.	63
Tabla 16. Rugosidades obtenidas en los ensayos realizados en fresadora Lagun L650 con fresa de 2,5 mm de diámetro.....	64
Tabla 17. Rugosidades medias calculadas para los ensayos realizados en fresadora Lagun L650 con fresa de 2,5 mm de diámetro.	65
Tabla 18. Resultados ANOVA R_a fresa 4 mm en Odisea.	66
Tabla 19. Resultados ANOVA R_z fresa 4 mm en Odisea.	66
Tabla 20. Resultados ANOVA R_t fresa 4 mm en Odisea.	66
Tabla 21. Comprobación normalidad de ANOVAs de fresa 4 mm en fresadora Odisea.	67
Tabla 22. Resultados ANOVA R_a fresa 4 mm en Lagun L650.....	67
Tabla 23. Resultados ANOVA R_z fresa 4 mm en Lagun L650.....	68
Tabla 24. Resultados ANOVA R_t fresa 4 mm en Lagun L650.....	68
Tabla 25. Comprobación normalidad de ANOVAs de fresa 4 mm en fresadora Lagun.....	68
Tabla 26. Resultados ANOVA R_a fresa 2,5 mm en Lagun L650.....	69
Tabla 27. Resultados ANOVA R_z fresa 2,5 mm en Lagun L650.....	69
Tabla 28. Resultados ANOVA R_t fresa 2,5 mm en Lagun L650.....	69
Tabla 29. Comprobación normalidad de ANOVAs de fresa 2,5 mm en fresadora Lagun.....	70
Tabla 30. Fuerzas resultantes en ensayo con fresa de 4 mm en Odisea.....	78
Tabla 31. Fuerzas resultantes en ensayo con fresa 4 mm en Lagun L650.	79
Tabla 32. Fuerzas resultantes en ensayo con fresa de 2,5 mm en Lagun L650.	80
Tabla 33. Resultados ANOVA F_m fresa 4 mm en Odisea.	81
Tabla 34. Resultados ANOVA F_m fresa 4 mm en Lagun L650.	82
Tabla 35. Resultados ANOVA F_m fresa 2,5 mm en Lagun L650.	82
Tabla 36. Comprobación normalidad de ANOVAs de fuerzas.	82
Tabla 37. Porcentaje de aleantes en la fresa de 4 mm (Odisea).	90
Tabla 38. Porcentaje de aleantes en la fresa de 4 mm (Lagun L650).....	92
Tabla 39. Porcentaje de aleantes en la fresa de 2,5 mm (Lagun L650).	94

Índice

1. Introducción.....	1
1.1. Planteamiento del trabajo.....	1
1.2. Motivación y objetivos	1
1.3. Estructura del trabajo	2
1.4. Metodología	3
2. Estado del arte	5
2.1. Introducción.....	5
2.2. Mecanizado de pequeñas partes.....	5
2.3. Acabado superficial.....	6
2.3.1. Size effect	7
2.3.2. Formación de la viruta.....	9
2.4. Fuerzas en microfresado.....	10
2.4.1. Run out	12
2.4.2. Chatter	13
2.5. Herramientas de corte y desgaste.....	13
2.6. Parámetros del proceso.	15
3. Equipos y materiales	17
3.1. Maquinaria y herramientas	17
3.1.1. Fresadora CNC Odisea.....	17
3.1.2. Fresadora Lagun L650.....	19
3.1.3. Dinamómetro Kistler.....	21
3.1.4. Palpador.....	22
3.1.5. Rugosímetro Mitutoyo SJ-210.....	23
3.1.6. Equipo de microfluorescencia de rayos X M4 Tornado.....	24
3.1.7. Microscopio estereoscópico.....	25
3.2. Material	26
3.3. Herramientas de corte.....	27
4. Plan experimental.....	29
4.1. Variables de salida.....	29
4.2. Parámetros de micromecanizado	30
4.2.1. Velocidad de giro y velocidad de corte	30
4.2.2. Velocidad de avance	34
4.2.3. Profundidad de corte	36
4.2.4. Longitud de mecanizado	37
4.2.5. Trayectoria de mecanizado	37

4.3.	Diseño de experimentos.....	38
4.4.	Programación y obtención de códigos CNC	42
5.	Ejecución experimental	47
5.1.	Disposición en máquina	47
5.2.	Pérdidas de horizontalidad en las piezas	49
5.3.	Correcciones a los ensayos	51
5.4.	Ensayos	52
5.4.1.	Ensayo en fresadora Odisea con herramienta de 4 mm	53
5.4.2.	Ensayo en Lagun L650 con herramienta de 4 mm	54
5.4.3.	Ensayo en Lagun L650 con herramienta de 2,5 mm	55
6.	Resultados obtenidos y análisis.	59
6.1.	Rugosidad superficial.	59
6.1.1.	Obtención de resultados.	59
6.1.2.	Análisis de resultados.	66
6.2.	Fuerzas.	77
6.2.1.	Obtención de resultados.	77
6.2.2.	Análisis de resultados.	81
6.3.	Adhesión de material.....	87
6.3.1.	Herramienta de 4 mm empleada en fresadora Odisea	87
6.3.2.	Herramienta de 4 mm empleada en Lagun L650.....	91
6.3.3.	Herramienta de 2,5 mm empleada en Lagun L650.....	93
6.3.4.	Análisis de los resultados.....	95
7.	Conclusiones y trabajos futuros.....	101
7.1.	Conclusiones.....	101
7.2.	Trabajos futuros	102
8.	Bibliografía	105

1. Introducción

1.1. Planteamiento del trabajo

En la actualidad, existe una enorme cantidad de diferentes procesos de fabricación para emplear a la hora de realizar una pieza. Dichos procesos permiten, en cada caso, obtener unas características diferentes en la pieza y su elección dependerá del resultado final buscado dicha pieza. Además, dentro de cada uno de estos tipos genéricos de procesos de fabricación hay una gran variedad de tipos particulares. Actualmente, con el desarrollo de diferentes campos relacionados con la informática, la medicina y la aeronáutica, por ejemplo, ha surgido la necesidad de fabricar piezas de un tamaño muy reducido con unas tolerancias muy precisas y acabados superficiales muy buenos. Para atender a esta demanda, surge el micromecanizado.

El mecanizado convencional se caracteriza por tener unos valores de velocidades de avance y de profundidades de corte que se calculan para mejorar los tiempos de mecanizado, los acabados superficiales, disminuir el desgaste de la herramienta, etc, y en el que esas unidades de velocidades de avance y de profundidades de corte se miden, por lo general, en milímetros (mm/min para las velocidades de corte, mm/rev para avance y mm para las profundidades de corte).

En el caso del micromecanizado, existen una serie de características que lo distinguen del mecanizado convencional. Entre ellas, se puede destacar una menor área de corte, avance por diente y el radio de la herramienta, efecto del tamaño, el menor espesor de la viruta y la rigidez de la microherramienta (Kumar *et al.*, 2017).

En el presente trabajo se planteará el estudio del micromecanizado desde dos vertientes: una, de tipo teórico, mediante el desarrollo de un estado del arte del tema y, otra, de tipo experimental/teórico, mediante el desarrollo de experimentos y el análisis y discusión de los resultados obtenidos.

1.2. Motivación y objetivos

La principal motivación en la realización de este proyecto es el estudio del proceso de micromecanizado y la influencia de diferentes parámetros de corte, lo que

permitiría realizar además la comparación entre diferentes tipos de fabricación que se puedan aplicar para obtener resultados similares al micromecanizado. De esta manera, y dependiendo de los objetivos que se busquen en la pieza final, se podrán comparar varios tipos de procesos de fabricación diferentes, analizando cuál es el óptimo para su fabricación. Adicionalmente, se destaca que, a pesar de la importancia del tema estudiado, todavía no se ha estudiado con la misma amplitud que el mecanizado convencional a macroescala.

Los principales objetivos que se buscan son tres:

- Comparación del acabado superficial obtenido por el micromecanizado mediante estudio de la rugosidad de las piezas acabadas, algo de especial importancia en el proceso y que es una de las razones de la aparición de esta técnica de mecanizado, modificando diferentes parámetros como son el avance por diente, la profundidad de pasada, la trayectoria de mecanizado, la herramienta empleada y la fresadora usada.
- Comparación entre las fuerzas resultantes del proceso de corte por variación de los mismos parámetros estudiados en el acabado superficial.
- Comparación del desgaste en las herramientas utilizadas, de cara a analizar la influencia de este tipo de técnica de fabricación en los útiles.

1.3. Estructura del trabajo

El presente Trabajo de Fin de Grado constará de un total de siete capítulos, entre los que se puede diferenciar:

- Introducción: planteamiento inicial del trabajo, en el que se hará una breve explicación del tema a tratar en el mismo, de los objetivos y los motivos en su realización y de la estructuración que tendrá el proyecto.
- Estado del arte: en este epígrafe se realiza un estudio del tratamiento del tema del trabajo en la bibliografía existente hasta la fecha. De esta manera se pueden encontrar definiciones, análisis, estudios, gráficos, etc., realizados por expertos en materia de micromecanizado.

- Equipos y materiales: se verán las diferentes herramientas empleadas durante los ensayos, así como el material de trabajo, las máquinas-herramienta y los distintos equipos de medida y sistemas de apoyo utilizados.
- Plan experimental: se expondrán todos los procedimientos analíticos y experimentales que se seguirán en este proyecto, y los porqués de cada uno de esos planteamientos realizados, de cara a poder obtener unos resultados que analizar acorde con los objetivos establecidos.
- Ejecución experimental: en esta sección se expondrán todos los ensayos realizados y las dificultades y problemas encontrados en ellos, a la vez que se presentan las diferentes disposiciones empleadas.
- Resultados y análisis: en este apartado se obtendrán los resultados de los ensayos realizados siguiendo la metodología expuesta. Posteriormente, se analizarán dichos resultados para poder realizar las comparaciones pertinentes y poder sacar las conclusiones.
- Conclusiones y trabajos futuros: se expondrán una serie de deducciones de los resultados obtenidos, además de plantear los análisis posteriores que se podrían efectuar para completar o complementar este trabajo.

1.4. Metodología

En este trabajo se realizará en primer lugar un estudio del estado del arte del micromecanizado en general, de cara a obtener una serie de nociones iniciales de cómo se comportan herramientas y material a la hora de realizar los ensayos, y buscando una serie de factores utilizados por diferentes autores de cara a poder aplicarlos también en los que se realizarán aquí. Para ello, se buscará en la bibliografía existente para tener una primera aproximación al análisis que aquí se va a analizar.

Tras ello, se procederá a elaborar un plan experimental para microfresado frontal con un número determinado de ensayos a realizar dependiendo de las variables que se quieran estudiar y de los niveles que tenga cada variable. Posteriormente, se programarán dichos experimentos y se mecanizarán empleando dos máquinas-herramienta distintas, y teniendo en cuenta siempre el plan experimental planteado previamente.

Por último, se analizarán los resultados obtenidos para obtener las variables de salida del proceso para cada una de las variables de entrada propuestas. Dichas variables de salida serán fuerzas, acabados superficiales y desgastes en las herramientas. Para su análisis se emplearán diferentes equipos de medición, tanto propios del departamento de Ingeniería Mecánica y Minera como de los Servicios Centrales de Apoyo a la Investigación (SCAI). Dichos sistemas de medición serán tanto simultáneos como posteriores al mecanizado y todos requerirán un postprocesado de los datos obtenidos para su análisis y obtención de una serie de conclusiones.

2. Estado del arte

2.1. Introducción

La tendencia actual a la realización de piezas cada vez más pequeñas ha abierto nuevas vías de investigación, sobre todo de cara a los campos de la electrónica y de los aparatos biomédicos (Boswell *et al.*, 2017). Además, es sabido que existen efectos del tamaño en el corte de metal, donde la energía específica aumenta con el incremento de la zona de deformación (Jackson, 2013). Estos dos hechos han producido que se busquen nuevas técnicas de fabricación, tanto para fabricar piezas de pequeño tamaño, como para mejorar la maquinabilidad de un material, lo que se consigue reduciendo la zona de deformación (corte) en la pieza.

Por otro lado, cada vez hay un mayor interés en lograr superficies en 3D con unas altas relaciones de aspecto (dimensiones elevadas en una dirección y muy pequeñas en otras) con formas complejas (Gentili *et al.*, 2005). La necesidad de procesos de fabricación alternativos al EDM (del inglés *electrical discharge machining*) para piezas de tamaño micrométrico ha hecho que el micromecanizado sea una opción muy importante debido a su velocidad, su bajo coste, su alcance y el amplio abanico de materiales que puede tratar (Boswell *et al.*, 2017). En concreto, los procesos de fabricación no convencionales permiten fabricar piezas difíciles, pero suelen tener un alto coste de implantación y ofrecen una flexibilidad limitada, al contrario de como ocurriría en el caso del micromecanizado.

2.2. Mecanizado de pequeñas partes

Una de las principales aplicaciones para las que se utiliza el micromecanizado es la fabricación de piezas pequeñas con un alto nivel de detalle. Más en concreto, el proceso se refiere a la fabricación de componentes o productos con al menos una parte con tamaño a escala micrométrica (Gao y Huang, 2017). Además, el proceso de mecanizado de esas partes o piezas tiene que tener una alta precisión y un bajo valor de rugosidad superficial (Sun *et al.*, 2017).

Para el mecanizado de pequeñas piezas se puede utilizar diferentes técnicas, atendiendo al modo de eliminación del material que se utilice: ultrasónico, mecánico, químico, por corriente eléctrica, etc. Este Trabajo de Fin de Grado se centrará en el

estudio de un tipo de proceso de micromecanizado por arranque de viruta. Dichos procesos son:

- Microtorneado: muy parecido al torneado tradicional, para fabricación de piezas cilíndricas, cónicas, etc., con un eje de rotación. Necesita de maquinaria muy balanceada para conseguir una alta precisión.
- Microfresado: también muy similar al fresado convencional, para fabricación de todo tipo de piezas mediante diferentes operaciones, salvo que en este caso las velocidades de giro utilizadas son más altas que las del fresado tradicional. Será el que se lleve a cabo en el análisis experimental.
- Microtaladrado: es el proceso en el que se realizan agujeros circulares de diámetro muy reducido, con una herramienta de tamaño micrométrico (Boswell *et al.*, 2017).

2.3. Acabado superficial

La calidad del producto final es uno de los parámetros de salida en el que el acabado superficial tiene una gran importancia, pudiendo afectar a la resistencia del recubrimiento, fricción, corrosión, lubricación, reflexión, esfuerzos resultantes y condiciones de fatiga en la superficie mecanizada. Algo complicado de conseguir es la elección óptima de los parámetros de mecanizado para alcanzar la calidad superficial deseada, ya que durante el mecanizado se dan una serie de factores no controlables que pueden afectar a la calidad superficial (Bandapalli *et al.*, 2017).

En el micromecanizado, la remoción de material está dominada por el proceso de rozamiento y de deformación elástica y plástica en lugar de procesos de corte, como ocurre con el mecanizado convencional. Dichos fenómenos aumentan la rugosidad superficial y provocan la formación de virutas. El estudio del proceso de formación de viruta y disminución de la rugosidad superficial puede ser utilizado para la elección de los mejores parámetros de corte (Kiswanto *et al.*, 2014).

Los parámetros que influyen en la rugosidad superficial son las condiciones de corte que se estén empleando, la geometría de la herramienta y la rigidez mecánica, cuando se usan máquinas de fresado convencionales. De todas esas condiciones, el

avance, que es uno de los parámetros de corte, es el que tiene una mayor influencia en la rugosidad superficial obtenida (Wang *et al.*, 2005).

El acabado superficial se puede medir por medio de la rugosidad superficial. Dicha rugosidad superficial se puede determinar mediante diferentes parámetros, como la rugosidad media aritmética del perfil evaluado, denominada Ra . Esa rugosidad superficial media se puede calcular mediante la siguiente fórmula:

$$Ra = \oint |y - y_{cl}| dl \quad (1)$$

donde y_{cl} es la posición de la línea central, que se elige haciendo que las áreas por encima y por debajo de la línea sean iguales (Doi *et al.*, 2011). Hay otras medidas de la rugosidad superficial, como son Rz (media de la profundidad de la rugosidad) o Rt (altura total del perfil de rugosidad).

De esta forma, analizando los resultados obtenidos por diferentes autores en sus ensayos, se puede ver que Kiswanto *et al.* (2014) en sus experimentos obtuvieron unos valores de rugosidad superficial (Ra) de entre 25 nm y 400 nm. Bandapalli *et al.* (2017) por su parte trabajaron en una serie de ensayos obteniendo una rugosidad superficial de entre 100 y 900 nm en sus experiencias; y Kuram y Ozcelik (2013) al micromecanizar aluminio 7075 obtuvieron rugosidades de entre 0,25 y 1 μ m. Aramcharoen y Mativenga (2008) realizaron el análisis de la influencia del ratio de espesor de viruta no deformada/radio de punta, consiguiendo valores de Ra de entre 140 y 250 nm.

Adicionalmente, hay una serie de factores que hacen que la calidad del micromecanizado (en concreto, la calidad superficial y las tolerancias) sean menores que las requeridas para una cierta aplicación. Uno de estos factores, y que es el más determinante en el micromecanizado, es el conocido como “*size effect*”.

2.3.1. Size effect

Cuando se elimina material por mecanizado hay un aumento sustancial de la energía específica que se necesita para realizarlo, y que disminuye con el tamaño de la viruta. Se cree generalmente que esto se debe a que el metal contiene defectos, y, cuando desciende el tamaño del material eliminado, la probabilidad de encontrar un

defecto que reduzca el esfuerzo disminuye (Shaw, 2003). Ese efecto se conoce como “*size effect*”, que se podría traducir por “efecto del tamaño”.

En el micromecanizado, la tasa de eliminación de material es considerablemente pequeña en comparación con el mecanizado convencional en escala macrométrica. Al contrario que ocurre en ese macromecanizado, el espesor de la viruta sin deformar puede compararse en tamaño con el radio de la herramienta de mecanizado (Aramcharoen y Mativenga, 2008).

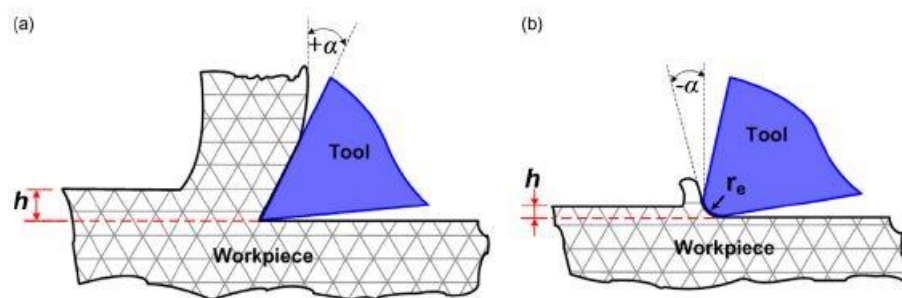


Imagen 1. Efecto del radio de herramienta en mecanizado convencional (izquierda) y micromecanizado (derecha) (Aramcharoen y Mativenga, 2008).

En la Imagen 1 se puede apreciar cómo en el micromecanizado (Imagen 1 derecha) el tamaño de la viruta deformada se asemeja al tamaño de la viruta no deformada, o profundidad del corte, mientras que en el mecanizado convencional a escala macrométrica (Imagen 1a), al tener un mayor espesor de viruta no deformada o profundidad de pasada de corte, el radio de corte de la herramienta no tiene un efecto sustancial en el proceso de mecanizado. Como consecuencia, en el micromecanizado el proceso de corte se da con un ángulo de desprendimiento de la viruta muy negativo. La relación entre el espesor de la viruta y el ángulo de la herramienta es la que gobierna el proceso de arranque de material. De hecho, se puede llegar al momento en el que no se produce eliminación de material. Ese mecanismo de formación de la viruta causa el “*size effect*”, fenómeno que produce un incremento de la fuerza específica de corte (y, por ende, de la energía de corte) para procesos de mecanizado con profundidades de corte pequeñas. Este fenómeno afecta significativamente a las fuerzas en el corte y al acabado superficial de la pieza (de Oliveira *et al.*, 2014).

El tamaño de grano es otro de los factores que afectan al acabado superficial del micromecanizado (aunque no solo tiene influencia en la calidad superficial, sino que

también afecta a otros parámetros de salida como las fuerzas de mecanizado). El efecto del tamaño de grano durante el mecanismo de corte es complejo, no solo debido a la microestructura del material, sino también debido al afilado perfecto del filo de corte de la herramienta. Así, el área de la sección de corte tiene una gran influencia en el fenómeno de “*size effect*” y en el mínimo espesor de viruta que se puede llegar a cortar (Lauro *et al.*, 2016). En el caso del mecanizado convencional, se asume que el filo de corte está perfectamente afilado y que no hay contacto entre la superficie mecanizada y la cara de incidencia de la herramienta, por lo que el material es eliminado esencialmente por corte o cizalladura. En el caso del micromecanizado, sin embargo, este estudio no es tan sencillo, ya que no se puede eliminar el efecto del arrastre sobre las fuerzas en el proceso de corte.

Cuando un material es eliminado en volúmenes comparables al tamaño de grano de ese material, el acabado superficial de la pieza mecanizada depende de la microestructura del material utilizado. De esta manera, se han desarrollado metales con un tamaño de grano ultra-afinado para mejorar su resistencia mecánica y su uniformidad (Komatsu *et al.*, 2012).

2.3.2. Formación de la viruta

La viruta se forma normalmente en el micromecanizado cuando el filo de corte no termina de cortar la superficie. En el proceso, además, se da una importante deformación plástica alrededor del filo de corte de la herramienta; esa deformación plástica normalmente es soportada por el material acumulado delante del filo de corte (Saptaji *et al.*, 2012). De hecho, en el micromecanizado suelen aparecer virutas mayores que en el mecanizado convencional, comparando con respecto al espesor de corte (Filiz *et al.*, 2007).

La formación de la viruta en el microcorte afecta a la calidad de la pieza mecanizada porque puede distorsionar dimensionalmente el filo, dañando la subsuperficie. La eliminación de la viruta en el micromecanizado no puede ser comparada a dicha eliminación en un proceso de mecanizado convencional en escala macrométrica debido al tamaño micrométrico de la pieza mecanizada. Además, ese proceso de eliminación de viruta podría introducir error dimensional o esfuerzos

residuales en la pieza mecanizada (Wu *et al.*, 2016). Por ello, el modelado de la formación de la viruta toma un alto nivel de importancia (Lekkala *et al.*, 2011).

Para poder realizar la eliminación de la viruta en el proceso del micromecanizado se han desarrollado algunos métodos novedosos como, por ejemplo, diferentes sistemas ópticos y mecánicos, que pueden ser utilizados conjuntamente con la medición en el interior de la máquina. Sin embargo, los métodos mecánicos siempre están limitados en su aplicación por la rigidez de la pieza, puesto que la viruta puede ser destruida o doblada debido a las fuerzas de contacto con el sistema de medición o de eliminación de dicha viruta (Medeossi *et al.*, 2018).

La formación de la viruta se ve afectada también por diversos factores, como pueden ser la ductilidad del material utilizado para la fabricación de una determinada pieza, la geometría de la herramienta y los parámetros de mecanizado (Wu *et al.*, 2016).

Una gran cantidad de autores se han centrado en el estudio del proceso de formación de viruta en el micromecanizado. Por ejemplo, Saptaji *et al.* (2012) analizaron la formación de viruta en la parte superior de la pieza en el fresado lateral y trataron de explicar sus observaciones en términos de la geometría de la herramienta. Por otro lado, Filiz *et al.* (2007) encontraron una serie de relaciones entre la formación de la viruta y los parámetros de mecanizado, demostrando que la menor de ellas se produce a bajas velocidades y altos avances.

2.4. Fuerzas en microfresado

Se debe a Merchant el primer acercamiento al estudio de las fuerzas de corte en el proceso del mecanizado. Hoy en día, las técnicas de mecanizado de alto nivel de altas cualidades y requerimientos necesitan un estudio previo, y una predicción fiable en las fuerzas de corte es un parámetro importante para poder realizar esos estudios (Germain *et al.*, 2013).

La fuerza de corte es uno de los más importantes y fundamentales parámetros en la operación de microfresado. Las fuerzas de corte generadas en el proceso están relacionadas con el recubrimiento de la herramienta y la estabilidad del sistema pieza-herramienta (Jin y Altintas, 2013). Además, la fuerza de corte puede utilizarse como

una variable clave de proceso de cara a optimizar las condiciones de mecanizado. Una predicción precisa en las fuerzas de corte para diferentes parámetros del proceso es esencial para obtener una mejora económica de la pieza mecanizada y para poder extender la vida de la herramienta (Yuan *et al.*, 2018).

En el proceso de corte de micromecanizado puede producirse el caso de que el espesor de viruta sin mecanizar sea inferior que el mínimo para que se produzca el corte. Esto provoca que las teorías de corte en el microfresado sean diferentes a las utilizadas en el caso del fresado convencional en escala macrométrica. Por ejemplo, Bao y Tansel (2000) propusieron un nuevo modelo para obtener las fuerzas de corte en el proceso de micromecanizado además de otros parámetros de salida y que, mediante su optimización con algoritmos genéticos, podría ser utilizado para estimar las condiciones de operación del microfresado. Por otro lado, Malekian *et al.* (2009), desarrollaron otro modelo mecánico para obtención de las fuerzas para los regímenes dominantes en el proceso de microfresado, que son el cizallamiento y el arrastre, considerando el desplazamiento de la herramienta por las fuerzas del mecanizado ("*run out*"), la dinámica del proceso y el efecto de la recuperación mecánica del material usual en el micromecanizado. También Bissacco *et al.* (2008) establecieron otra teoría basada en los Mecanismos Unificados de Corte, haciendo modificaciones de la teoría original incluyendo la definición del plano de deslizamiento para la viruta y su parametrización. Por lo tanto, se puede ver que ha habido un enorme estudio en este campo, puesto que es uno de los parámetros de salida del proceso de corte que más puede influir, por ejemplo, en el acabado de la pieza obtenido, la desviación de las dimensiones requeridas por el mencionado "*run out*" o en la rotura de las herramientas por su desgaste.

En los ensayos que realizaron, Aramcharoen y Mativenga (2008) obtuvieron unos valores de fuerzas de corte de entre 0,7 y 2,3 N. Por su parte, Yuan *et al.* (2018) se movieron entre valores de 0 y 1 N, siendo a veces ligeramente negativos. Zhang *et al.* (2017) por su parte obtuvieron valores de los esfuerzos de entre -0,5 y 2,5 N. En todos los casos se trata de valores pequeños de esfuerzos, acotados y muy parecidos entre sí.

Normalmente, en el fresado, el centro de la herramienta coincide con el centro de rotación exacto alrededor del que gira la misma. Sin embargo, autores como Zhang

et al. (2016) estudiaron el efecto de desplazar el centro de corte de la herramienta debido al empeoramiento que esto produciría en las condiciones de corte, debido, sobre todo, al “*run out*”.

2.4.1. Run out

Este problema es uno de los más habituales en el proceso de mecanizado por fresado. Dicho problema es causado por las fuerzas desiguales que se generan sobre el filo de la herramienta durante el proceso de corte, induciendo un desplazamiento irregular de la misma, que también afecta al acabado superficial (Matsumura y Tamura, 2017). Por lo tanto, es de vital importancia el conocimiento de este fenómeno, ya que es un efecto imposible de eliminar en los procesos de fresado, que afectará también a las fuerzas de corte y a la estabilidad del corte (Niu *et al.*, 2018).

En el caso del micromecanizado, los fabricantes llegan a proporcionar herramientas de corte de diámetros menores de 0,1 mm, llegando a fabricarse de hasta 0,01 mm de diámetro (Uriarte *et al.*, 2009). Esa pequeña dimensión en diámetro genera un efecto adverso, ya que su rigidez, como se puede ver claramente con las reglas de la dinámica y cinemática, es menor, por lo que al ejercer una fuerza sobre las herramientas (fuerza generada en el corte) éstas tenderían a moverse, desplazándose de su centro de rotación. A ese fenómeno es al que se le conoce como “*run out*”, y se puede entender fácilmente que ese efecto será mayor en el micromecanizado por el efecto del tamaño de la herramienta.

El efecto del “*run out*” ha sido estudiado por múltiples autores. Niu *et al.* (2018) analizaron los efectos de este fenómeno conjuntamente con los parámetros de corte, previendo sus efectos sobre las fuerzas en el proceso de corte. Ma *et al.* (2016) estudiaron la variación de estabilidad en el proceso de fresado al introducir el “*run out*”. Singh *et al.* (2018) analizaron el “*run out*” dinámico debido al efecto que producen las altas velocidades de giro, viendo su influencia sobre la viruta de corte.

En la Imagen 2 se puede apreciar el desplazamiento de la herramienta por efecto del “*run out*”. Dicho desplazamiento afecta a las dimensiones del producto final, y a la estabilidad del proceso.

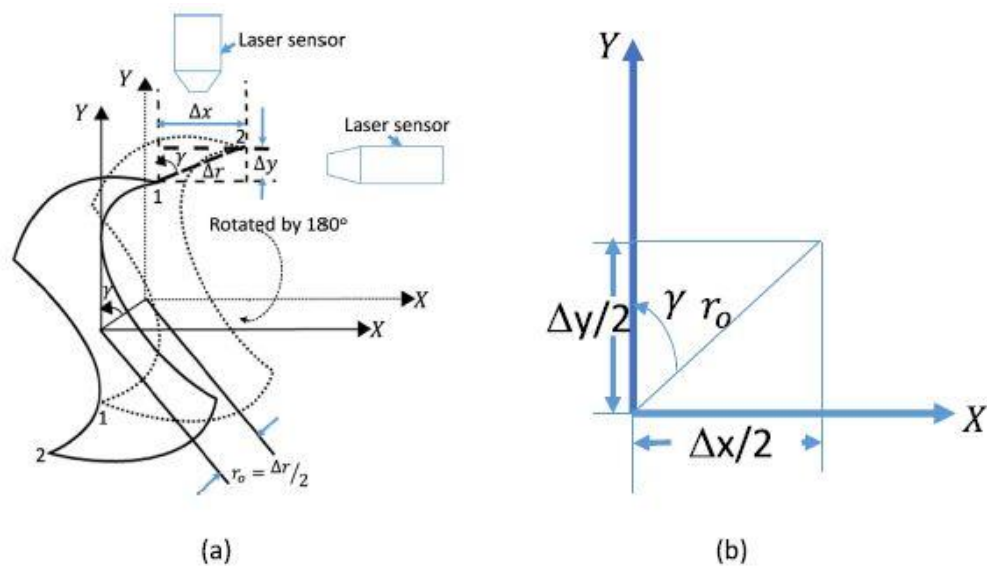


Imagen 2. Izquierda: esquema del desplazamiento del filo de la herramienta. Derecha: valor del "run out" y ángulo estimado (Singh *et al.*, 2018).

2.4.2. Chatter

Este efecto se da en el microfresado y es una vibración auto-excitada entre la herramienta de corte y la pieza, produciendo un efecto importante por empeoramiento de la calidad superficial obtenida y un mayor desgaste de la herramienta (Afazov *et al.*, 2012).

Este efecto es muy importante en procesos de microfresado con altas velocidades de giro (mayores de 100000 revoluciones por minuto), donde la rigidez limitada de la herramienta y las pequeñas fluctuaciones de las fuerzas de corte pueden producir inestabilidad dinámica, afectando claramente a los parámetros de corte (Singh *et al.*, 2015).

2.5. Herramientas de corte y desgaste

En todos los procesos de mecanizado (esto incluye también a los de micromecanizado en particular) la geometría y el material de las herramientas utilizadas tienen una gran importancia ya que, en gran parte, los resultados finales dependen de las mismas.

En el caso del micromecanizado, hay múltiples tipos de herramientas de corte utilizadas. Así, por ejemplo, Bandapalli *et al.* (2017) realizaron el estudio experimental de micromecanizado de ranuras utilizando herramientas específicas para ello, con fresas de vástago de dos filos de corte, con un diámetro de 0,5 mm, para mecanizado

de la aleación de titanio Ti-6Al-4V de grado 5. Por otro lado, Eifler *et al.* (2018) estudiaron el micromecanizado de una superficie haciendo uso de herramientas de corte diferentes: una fresa de punta redonda de diamante con un solo filo de corte, con un diámetro de 100 μm , y una fresa frontal de igual geometría, pero con dos filos de corte y de carburo, con un diámetro de 50 μm . Kiswanto *et al.* (2014) realizaron una serie de mecanizado de ranuras utilizando herramientas de 0,2 mm de diámetro con recubrimiento de carburo, con dos filos de corte. Por otra parte, Aramcharoen y Mativenga (2008) emplearon fresas de dos filos de corte de carburo de tungsteno con un diámetro de 900 μm . De la misma forma, Yuan *et al.* (2018) también utilizaron para su estudio de las fuerzas producidas en el procedimiento de micromecanizado fresas de 900 μm de diámetro de carburo de tungsteno.

El efecto que tendrá la utilización de herramientas no fabricadas y diseñadas específicamente para el estudio en micromecanizado también va a tener cierta influencia en los resultados obtenidos, debido a la influencia que tiene el afilado de la herramienta en el proceso (influencia del radio del filo de corte). Así, Yuan *et al.* (1996) analizaron la influencia del radio de filo en el micromecanizado, viendo que la rugosidad de la superficie mecanizada varía con el radio del filo de corte, existiendo entre ambos parámetros una relación directa: cuanto más afilada se encuentra la herramienta, o lo que es lo mismo, cuanto menor es el radio del filo de corte, menor es la rugosidad superficial obtenida.

El estudio del desgaste de las herramientas es algo esencial, debido a que tiene una gran importancia de cara a conseguir un buen acabado superficial (Alhadeff *et al.*, 2018). En los procesos tanto de mecanizado a escala macrométrica como a escala micrométrica se ha de tener en cuenta este factor, pero hay que tener en cuenta que no serán iguales en una y otra escala.

La lubricación es uno de los factores que afectan al desgaste de las herramientas en los procesos de mecanizado en general y, más concretamente, en el micromecanizado. Esto es así debido a que el fluido de corte (lubricante y refrigerante) tiene la capacidad de reducir la fricción entre el filo de la herramienta y la pieza, además de disipar el calor que se genera entre dichas partes (Vázquez *et al.*, 2014).

2.6. Parámetros del proceso

En la operación de micromecanizado hay una enorme cantidad de variables de entrada que afectan de una manera muy importante a las variables de salida del proceso, como pueden ser la velocidad de corte, el avance y la profundidad de pasada.

En los estudios realizados por Bandapalli *et al.* (2017) se emplearon unas velocidades de corte de entre 47,12 y 141,37 m/min. Por su parte, Eifler *et al.* (2018) y Kiswanto *et al.* (2014) trabajaron con intervalos de velocidades de corte de entre 12,88 y 9,42 m/min, y 21,99 y 59,69 m/min, respectivamente. Aramcharoen y Mativenga (2008) estudiaron el proceso de micromecanizado fijando una velocidad de corte en sus ensayos de 84,82 m/min, mientras que Yuan *et al.* (2018) analizaron el proceso utilizando una serie de ensayos con velocidades de corte de entre 28,27 y 45,24 m/min.

En lo que respecta al avance, Bandapalli *et al.* (2017) usaron unos avances por diente de entre 2 y 6 $\mu\text{m}/\text{diente}$, Eifler *et al.* (2018) emplearon avances de entre 0,083 y 0,122 $\mu\text{m}/\text{diente}$ y Kiswanto *et al.* (2014) trabajaron con avances entre 0,016 y 0,857 $\mu\text{m}/\text{diente}$. Aramcharoen y Mativenga (2008) analizaron el micromecanizado empleando unos valores de entre 0,2 y 3,6 $\mu\text{m}/\text{diente}$ como avances, mientras que Yuan *et al.* (2018) realizaron sus ensayos con avances en el intervalo entre 0,5 y 3 $\mu\text{m}/\text{diente}$.

Por último, la profundidad del mecanizado empleada por cada uno de los anteriores autores es: por parte de Bandapalli *et al.* (2017) la profundidad usada fue de entre 2 y 18 μm ; Kiswanto *et al.* (2014) utilizaron una profundidad de corte de 10 μm ; Aramcharoen y Mativenga (2008) de 50 μm y Yuan *et al.* (2018) de 50 μm .

3. Equipos y materiales

En el presente apartado se presentará el conjunto de la maquinaria, herramientas y material que se empleará para realizar los diferentes ensayos necesarios para analizar la influencia de los diferentes parámetros del micromecanizado en los resultados del mismo.

3.1. Maquinaria y herramientas

En primer lugar, se mostrarán qué tipo de máquinas se van a utilizar en la realización de los experimentos. Concretamente, se emplearán dos máquinas-herramienta de control numérico por computador (CNC).

A la hora de realizar cualquier mecanizado es de especial importancia el tipo de lubricación que se esté utilizando. En el presente trabajo, las dos máquinas no cuentan con el mismo sistema de lubricación, por lo que se optará por no emplear los sistemas de lubricación de las máquinas de cara a obtener unos resultados comparables entre los ensayos realizados en ambas fresadoras. Y, aunque existe la posibilidad de acoplar un mismo sistema de lubricación externa en ambas máquinas como, por ejemplo, MQL (del inglés *minimum quantity of lubricant*) al estar realizando los ensayos con el dinamómetro para medir las fuerzas tampoco se considera una solución adecuada ya que su uso podría llegar a dañar el equipo.

3.1.1. Fresadora CNC Odisea

Situada en el taller mecánico de la Escuela Politécnica Superior de Jaén de la Universidad de Jaén, la fresadora Odisea (Imagen 3) se trata de una pequeña fresadora de la marca Alecop empleada para uso académico en diferentes asignaturas de ingeniería, la cual posee las siguientes características básicas mostradas en la Tabla 1.



Imagen 3. Fresadora Odisea.

Recorrido en el eje longitudinal X	200 mm
Recorrido en el eje transversal Y	200 mm
Recorrido en el eje vertical Z	200 mm
Dimensiones de la mesa de trabajo	450 x 180 mm
Distancia máxima cabezal/mesa	320 mm
Conicidad del husillo	ISO 30
Motor del cabezal	Asíncrono trifásico de 1,5 kW
Velocidad de giro del cabezal	de 100 a 4000 rpm
Cono del cabezal	ISO 30
Motores de accionamiento de ejes	CC (1,44 Nm)
Avance rápido	5000 mm/min
Resolución electrónica	0,001 mm
Apertura de puerta	Automática
Tensión de alimentación monofásica	230 V 50/60 Hz
Dimensiones	1470 x 918 x 1855 mm
Peso aproximado	550 kg

Tabla 1. Características fresadora Odisea.

Como se puede observar en la Tabla 1, la máquina presenta unas dimensiones y velocidades limitadas para el mecanizado. Así, por ejemplo, este tipo de maquinaria se puede ver comprometida a la hora de realizar piezas en las que se quiera un gran acabado utilizando altos valores de avances y profundidades de pasada. Sin embargo,

las dimensiones de la mesa y las dimensiones máximas de mecanizado (aproximadamente, 200 mm x 200 mm) son suficientes para realizar el análisis del micromecanizado. A su vez, la velocidad máxima del husillo no aporta un rango de velocidades de corte muy grande, ya que está limitada a 4000 rpm.

Por otra parte, se ha de comentar que la máquina sí posee una resolución electrónica adecuada a los parámetros de diseño de experimentos que van a ser empleados. Con una resolución de 0,001 mm (1 μm) se podrán realizar diferentes tipos de mecanizados con profundidades de corte adecuadas al microfresado.

También es de importancia el peso de la máquina-herramienta. Al ser una máquina de tamaño reducido, no tiene un peso muy elevado, lo que hace que durante el mecanizado se puedan producir mayores vibraciones que pueden afectar a las variables de salida del proceso (acabados, fuerzas, desgastes, etc.). De hecho, éste será uno de los puntos de estudio que se abordarán en el presente proyecto, al poder comparar entre diferentes máquinas.

En cuanto a la potencia de la máquina, en ella se han realizado mecanizados de piezas complejas utilizando el fresado CNC convencional, con velocidades de avance pequeñas (máximas de aproximadamente 300 mm/min), velocidades de giro de aproximadamente 1000 rpm y profundidades de pasada de hasta 1 mm, por lo que, al utilizar profundidades de corte del orden de las micras, no se debería tener problema alguno en cuanto a potencia de la máquina se refiere de cara a estudiar el micromecanizado. Por otra parte, el cambio de herramienta se ha de hacer manualmente.

Para concluir este análisis de la fresadora Odisea, se ha de comentar que consta con un lenguaje de programación 8055 de Fagor por lo que, de cara a realizar la programación de las trayectorias de mecanizado, se podrá utilizar el programa Catia V5 en su módulo de mecanizado para dicha programación.

3.1.2. Fresadora Lagun L650

La fresadora Lagun L650 (Imagen 4) es una máquina-herramienta que está situada en la Escuela Politécnica Superior de Linares. Se trata de una fresadora CNC de 3 ejes, al igual que la Odisea descrita anteriormente, pero de un tamaño y

prestaciones muy superiores a aquella, ya que ésta no está pensada exclusivamente para uso didáctico.



Imagen 4. Fresadora CNC Lagun L650.

La primera gran diferencia apreciable entre estas dos máquinas es su tamaño. Así, mientras la fresadora CNC Odisea tenía unos desplazamientos máximos de los ejes X e Y de 200 x 200 mm, la Lagun L650 tiene unos desplazamientos de 650 mm en el eje X y 510 en el eje Y. Por otra parte, el peso es igualmente muy superior en este caso, alcanzando los 3700 kg. Por otra parte, este centro de mecanizado permitirá aumentar la velocidad de giro del cabezal hasta 8000 rpm, obteniendo un rango de velocidades muy superior al de la Odisea.

En cuanto a la precisión que tiene la máquina, cuenta con una precisión de posicionamiento de 0,005 mm (5 μ m), siendo menos precisa en este aspecto que la fresadora Odisea. El avance de la herramienta se puede realizar de micrómetro en micrómetro, por lo que se podrá equiparar en ello a la anterior máquina. Por otro lado, en cuanto a potencia, se trata de una máquina mucho más potente que la anterior, llegando hasta los 23 kW de potencia total. Además, se trata de una máquina con mecanismo de cambio automático de herramienta, por lo que no se tendrá que realizar el cambio a mano, algo que facilita el proceso y mejora los resultados al obtener mayor

precisión. Al igual que la Odisea, cuenta con un lenguaje de programación Fagor 8055, fácil de programar para las tareas deseadas.

Al igual que la fresadora Odisea, la fresadora Lagun L650 cuenta con tres ejes de movimiento (dos para la pieza en X e Y y uno para la herramienta en Z), no pudiéndose realizar el movimiento simultáneo de los tres ejes durante el mecanizado, siendo por lo tanto una máquina de 2,5 ejes, al igual que la anterior. Eso podría suponer una limitación a la hora de utilizar profundidades variables en el mecanizado a lo largo de una trayectoria, pero esta variable no se va a incluir entre las muchas del proceso, por lo que la profundidad de pasada de mantendrá constante durante el micromecanizado.

3.1.3. Dinamómetro Kistler

Las fuerzas que se dan en los procesos de mecanizado por arranque de viruta están fuertemente relacionadas con los mecanismos del proceso de corte. La utilización de dinamómetros para medir dichas fuerzas durante el mecanizado es esencial para investigar, monitorizar y optimizar dichos procesos de mecanizado (Totis y Sortino, 2010).

En este proyecto se va a utilizar un dinamómetro para fresadora para la medición de las fuerzas producidas durante el proceso. Se trata de un dinamómetro multicomponente de la marca Kistler, modelo 9257B (Imagen 5), con unas medidas de 100 x 170 mm, y que permite medir las tres componentes ortogonales de las fuerzas de corte en los procesos de corte que se estén realizando.

El dinamómetro tiene una fuerza máxima de medida de 10 kN, notablemente superior a las fuerzas esperadas en los procesos de microfresado que se van a ensayar.



Imagen 5. Dinamómetro Kistler modelo 9257B.

La medición de esas fuerzas de corte permitirá analizar la estabilidad del proceso de corte, algo muy importante en este tipo de mecanizado debido a que hay diferentes fenómenos, como el “*size effect*” o el “*run out*” que hacen que se pierda dicha estabilidad y afectan sobremanera al proceso de mecanizado. Además, al realizar el análisis experimental utilizando diferentes máquinas-herramienta, se podrá hacer una comparación entre los resultados obtenidos con ellas, viendo el efecto que tiene, por ejemplo, el peso de la máquina (algo que afecta a las vibraciones que se producen en el proceso de corte).

Por otra parte, dicho análisis de fuerzas también posibilita, junto con el análisis del acabado de la pieza mecanizada y el estudio del desgaste de la herramienta, la optimización de los parámetros de corte de los procesos que se van a analizar, fin último del presente estudio.

3.1.4. Palpador

En este caso no es una herramienta para realizar el mecanizado como tal, sino que se trata de un instrumento que permitirá obtener una elevada precisión de ajuste y posicionamiento con respecto a la pieza de trabajo. Los palpadores que se utilizarán son los mostrados en la Imagen 6.

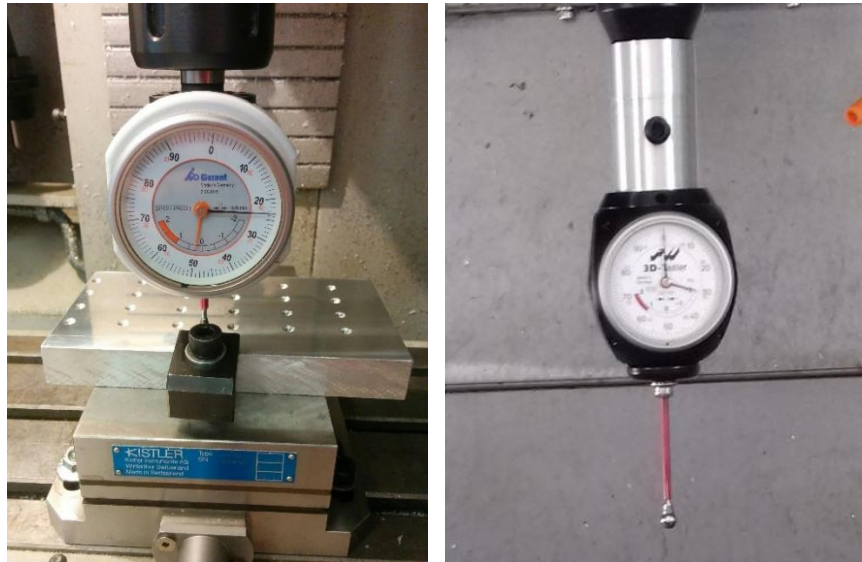


Imagen 6. Izquierda: palpador empleado en fresadora Odisea. Derecha: palpador empleado en fresadora Lagun L650.

Con los palpadores mostrados en la Imagen 6 se podrá colocar la herramienta en la exacta profundidad de pasada que se quiera, eliminando los grandes errores que, en el caso del micromecanizado, producirían mecanizar sin tener una referencia perfectamente exacta del posicionamiento de la herramienta.

3.1.5. Rugosímetro Mitutoyo SJ-210

El equipo empleado para la medición de la rugosidad es un rugosímetro Mitutoyo SJ-210 (Imagen 7). Se trata de un método de medición de contacto que posibilita medir rugosidades de las piezas que van a ser mecanizadas en 2D. Cuenta con una interfaz gráfica fácilmente utilizable, y permite la medición de diferentes parámetros de rugosidad, como son la rugosidad media o la rugosidad máxima, etc.



Imagen 7. Rugosímetro Mitutoyo SJ-210.

El rugosímetro cuenta con diferentes unidades de avance que permiten obtener la medición de la rugosidad, y de la que se va a utilizar la unidad de avance estándar. Por otra parte, las longitudes de muestreo que es capaz de analizar son de 0,08, 0,25, 0,8 y 2,5 mm.

Por otra parte, este rugosímetro tiene un rango de medición variable dependiendo de la resolución requerida. En este caso, los parámetros más adecuados son de un rango de medición de 25 μm , con una resolución de 0,002 μm , lo que dará la posibilidad de obtener un resultado bastante preciso. La disposición empleada para realizar los análisis de todos los ensayos mediante el rugosímetro es la mostrada en la Imagen 8.



Imagen 8. Disposición del rugosímetro Mitutoyo SJ-210.

3.1.6. Equipo de microfluorescencia de rayos X M4 Tornado

El equipo de microfluorescencia de rayos X mostrado en la Imagen 9, disponible mediante los Servicios Centrales de Apoyo a la Investigación, fue utilizado para la medición de la composición de la aleación utilizada, y para analizar si se había producido adhesión de viruta a la herramienta una vez realizadas las operaciones de mecanizado.



Imagen 9. Equipo de microfluorescencia de rayos X M4 Tornado.

3.1.7. Microscopio estereoscópico

Este aparato, al igual que el M4 Tornado, es propio de los Servicios Centrales de Apoyo a la Investigación, y se empleó para tomar diferentes imágenes tanto de las herramientas para observar el desgaste de las mismas como de las ranuras mecanizadas para poder ver más nítidamente pequeñas imperfecciones en algunas de ellas. El microscopio es de la marca Leica, posee un objetivo Planaplo 1.0x con una distancia de trabajo de 61,5 mm y posee un zoom continuo de 0,8x a 8,0x, corregido apocromáticamente, y oculares 10x/23B con ajuste dióptrico y larga distancia focal. Dicho microscopio estereoscópico se muestra en la Imagen 10.



Imagen 10. Microscopio estereoscópico.

3.2. Material

La aleación empleada es una aleación de AlMg caracterizada mediante los resultados obtenidos mediante análisis de microfluorescencia de rayos X por la composición mostrada en la Tabla 2, acorde con el espectro mostrado en la Imagen 11.

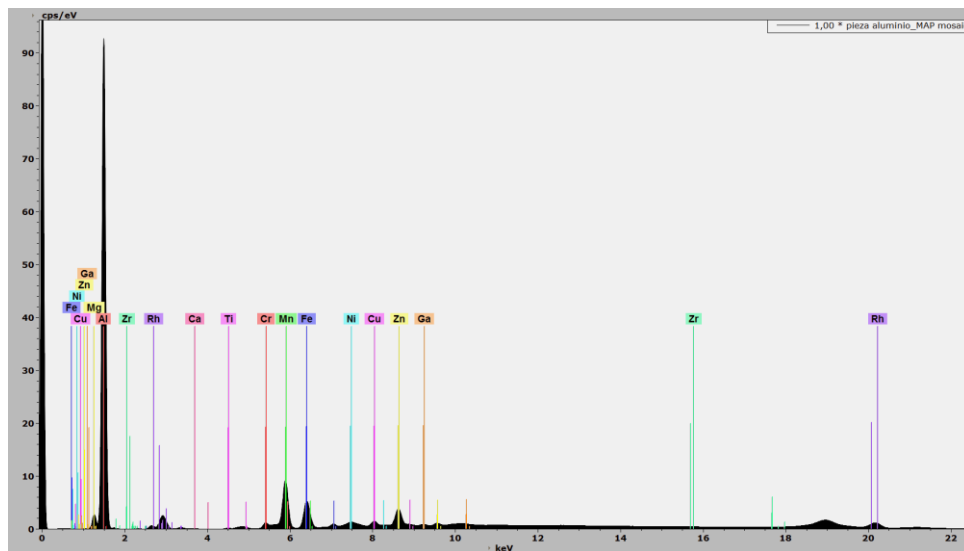


Imagen 11. Espectro de la pieza obtenido en el equipo de microfluorescencia de rayos X.

Spectro	pieza aluminio_MAP mosaic
Mg	5,045641
Al	93,76112
Ca	0,024026
Ti	0,024344
Cr	0,082344
Mn	0,638574
Fe	0,234817
Ni	0,036418
Cu	0,030168
Zn	0,109978
Ga	0,009171
Zr	0,003395
Rh	0

Tabla 2. Porcentajes de elementos en el material de ensayo.

Las piezas a mecanizar durante los ensayos se tratan de dos piezas rectangulares de aleación de aluminio, con un espesor de 19 mm, una de 80 x 150 mm, y la otra con unas dimensiones de 80 x 230 mm. En los ensayos, sin embargo, no se realizará distinción en lo que respecta a la longitud de las piezas, puesto que

los ensayos a realizar se dispusieron en 4 filas de 6 ensayos cada una, quedando en 150 mm de longitud contenidos los 24 ensayos por cada cara de cada pieza.

3.3. Herramientas de corte

Las herramientas a utilizar se tratan de fresas frontales de vástago, enterizas, con un diámetro de 4 y 2,5 mm, de cuatro filos de corte, de metal duro. Se trata de fresas de la marca Bluemaster, modelo FMD48, contando la de 4 mm con un diámetro de mango de 4 mm, una longitud total de 50 mm y una longitud de corte de 14 mm, mientras que la de 2,5 mm posee un mango de 3 mm de diámetro, con una longitud total y de corte de 38 y 7 mm, respectivamente. El ángulo de desprendimiento con respecto a la vertical en ambas herramientas es de 30° . Dichas fresas se presentan en la Imagen 12.



Imagen 12. Fresas empleadas para los ensayos.

Como sistema de sujeción de las fresas al husillo se empleará un portafresas con corona intercambiable, de manera que se podrá ajustar a cada uno de los mangos de las herramientas utilizadas.

4. Plan experimental

Los procesos de mecanizado en general, y de micromecanizado en particular, son procedimientos complejos con una gran cantidad de variables del proceso que afectan al resultado final del mecanizado, a la vida de la herramienta, a la calidad obtenida, las fuerzas en el proceso, etc.

En el presente TFG se van a realizar una serie de ensayos para, posteriormente, obtener las relaciones de esos parámetros con el resultado final del micromecanizado, lo que permitiría avanzar, para el material y las herramientas propuestos, hacia las condiciones óptimas de mecanizado.

4.1. Variables de salida

De entre la gran variedad de variables de salida del proceso, en el presente trabajo se estudiarán las siguientes:

- Acabado superficial: se trata de uno de los factores de mayor importancia en el mecanizado y, más aún, en el micromecanizado, debido a que es una técnica utilizada en muchas ocasiones para mejorar dicho acabado superficial. Por lo tanto, será la variable principal de cara a su estudio y optimización.
- Fuerzas del proceso: aportan una idea de cómo se ha realizado el mecanizado, incidiendo además en el consumo energético durante el proceso. Por ello, será una variable a minimizar durante el proceso. De hecho, las fuerzas del mecanizado afectan sobremanera a la herramienta, pudiendo provocar su rotura inmediata (más aún en procesos de micromecanizado con herramientas de pequeño diámetro), pudiendo a su vez ésta dañar la pieza mecanizada.
- Desgaste de la herramienta: tiene un efecto muy importante en el acabado obtenido y en la economía del proceso, ya que suelen ser herramientas costosas y, por lo tanto, ha de optimizarse su utilización, ajustando así el momento de cambio de herramientas.

4.2. Parámetros de micromecanizado

Se trata de todos los factores de entrada que se pueden modificar antes o durante el micromecanizado, de cara a la obtención de valores adecuados de las variables de salida.

Para las dos fresadoras anteriormente analizadas se van a cambiar los siguientes parámetros:

- Avance por diente.
- Profundidad de pasada.
- Trayectoria del mecanizado (recta o curva).

Hay parámetros del proceso de mecanizado que se encuentran íntimamente relacionados con otros parámetros. Así, por ejemplo, la velocidad de avance está relacionada con el avance por diente teniendo en cuenta el número de filos de la herramienta; y, por otra parte, la velocidad de corte se encuentra determinada por la velocidad de giro de la herramienta y el diámetro de la misma. Por ello, para cada una de las herramientas, se mantendrán constantes las velocidades de giro del husillo, obteniendo también velocidades de corte constantes, así como la longitud de mecanizado. A continuación, se estudias los valores tomados de los distintos parámetros.

4.2.1. Velocidad de giro y velocidad de corte

La velocidad de giro es uno de los parámetros de corte que más influyen en el proceso de mecanizado puesto que afecta a otros parámetros del proceso de manera directa, y va a ser uno de los parámetros de corte que se va a mantener constante en cada uno de los ensayos propuestos, de manera que se modificarán esas otras variables del proceso de diferente manera.

En el caso del micromecanizado, las velocidades de giro del husillo utilizadas son mucho más altas que las que se podrían alcanzar en las fresadoras CNC con las que se cuenta. Así, analizando los parámetros de corte utilizados en el micromecanizado por los autores comentados en el apartado 2.6., y en el mismo orden, se puede ver que Bandapalli *et al.* (2017) realizaron una serie de experimentos

a unas velocidades de giro del husillo de 30000, 60000 y 90000 rpm; Eifler *et al.* (2018) emplearon velocidades de 60000 y 41000 rpm para cada una de sus herramientas; Kiswanto *et al.* (2014), en su estudio, emplearon velocidades de 35000, 70000 y 95000 rpm; Aramcharoen y Mativenga (2008), en su análisis de las fuerzas resultantes, utilizaron 30000 rpm como velocidad de giro; y Yuan *et al.* (2018) realizaron ensayos con velocidades de giro de entre 10000 y 16000 rpm, aumentando dicha velocidad entre cada experimento en 2000 rpm.

Se puede observar que las máquinas empleadas tienen unas velocidades de giro muy pequeñas en comparación a las empleadas por los autores señalados anteriormente. Así, la fresadora Odisea solo llega a un máximo de 4000 rpm (limitadas a 3000 rpm por motivos de seguridad), y la fresadora Lagun L650 alcanza una velocidad de giro de 8000 rpm (limitadas a 7000 rpm, aproximadamente, para no sobrecargarla). Se puede inferir que no se trata de maquinaria específicamente diseñada ni construida para realizar micromecanizado, por tener unas velocidades de giro del husillo muy inferiores a las máquinas específicas para este tipo de procesos.

Por otro lado, la velocidad de giro tiene su principal influencia en la velocidad de corte, que viene dada por la siguiente expresión:

$$V_c = \pi * D * n \quad (2)$$

siendo V_c la velocidad de corte para una herramienta de diámetro D y velocidad de giro n .

La velocidad de corte va a ser uno de los factores más determinantes en el proceso del mecanizado, ya que puede afectar a múltiples variables de salida, como son acabados, fuerzas, desgastes, etc. Por ello, se ha de analizar en qué rangos de velocidades de corte se movían los autores anteriormente mencionados, y ver qué rangos se podrían obtener para las máquinas-herramienta disponibles. Las velocidades de corte de los autores mencionados son las mostradas en la Tabla 3.

Autor	Velocidad de giro (rpm)	Diámetro herramienta (mm)	Velocidad de corte (m/min)
Bandapalli <i>et al.</i> (2017)	30000 - 90000	0,50	47,12 – 141,37
Eifler <i>et al.</i> (2018)	41000	0,10	12,88
	60000	0,05	9,42
Kiswanto <i>et al.</i> (2014)	35000 - 95000	0,20	21,99 – 59,69
Aramcharoen y Mativenga (2008)	30000	0,90	84,82
Yuan <i>et al.</i> (2018)	10000 - 16000	0,90	28,27 – 45,24

Tabla 3. Velocidades de corte empleadas por diferentes autores.

Existe una gran disparidad en lo que a las velocidades de corte se refiere, estando éstas en el rango entre 9,42 m/min y 141,37 m/min. Esto puede ser debido a la diferencia entre los materiales y operaciones estudiadas por cada uno de los autores.

En el caso de este estudio, para una velocidad de corte máxima de 3000 rpm en la fresadora Odisea, se tendrían las velocidades de corte mostradas en la Tabla 4, para herramientas de, al menos 2,5 mm de diámetro.

Velocidad de giro (rpm)	Diámetro de herramienta (mm)	Velocidad de corte (m/min)
1000	2,5 – 3,0 – 3,5 – 4,0	7,85 – 9,42 – 11,00 – 12,57
1500	2,5 – 3,0 – 3,5 – 4,0	11,78 – 14,14 – 16,49 – 18,85
2000	2,5 – 3,0 – 3,5 – 4,0	15,71 – 18,85 – 21,99 – 25,13
2500	2,5 – 3,0 – 3,5 – 4,0	19,63 – 23,56 – 27,49 – 31,42
3000	2,5 – 3,0 – 3,5 – 4,0	23,56 – 28,27 – 32,99 – 37,70

Tabla 4. Velocidades de corte en fresadora Odisea.

Se puede afirmar que para una velocidad de 3000 rpm los ensayos se realizarían en el más alto rango de velocidad de corte, como era de esperar, y, comparando con la Tabla 4, se puede observar que no se trata de velocidades de corte muy dispares a las utilizadas por otros autores al emplear fresa de 4 mm de diámetro. Por lo tanto, se fijará la velocidad de giro del husillo a 3000 rpm en ambas fresadoras CNC, para poder

realizar la comparación de los resultados obtenidos en una y en otra al usar dichas fresas de 4 mm de diámetro.

El efecto que tendrá el tamaño de la herramienta será algo importante debido al radio de filo de corte de la misma. Pero, obviando dicho efecto, se podrán realizar, por lo tanto, experimentos válidos de micromecanizado utilizando máquinas y herramientas no diseñadas ni fabricadas específicamente para estos fines, ajustando las velocidades de giro del husillo y los diámetros de las herramientas empleadas.

Por otro lado, de cara a realizar un análisis más exhaustivo y con una mayor cantidad de datos más próximos al micromecanizado se van a realizar, en la fresadora Lagun L650, ensayos con herramientas de 4 mm (para poder comparar entre la fresadora Odisea de Jaén y la Lagun L650 de Linares) y de 2,5 mm. Esta variación de diámetros será muy influyente en los parámetros de mecanizado que se utilizarán. Uno de dichos parámetros, es la velocidad de corte de la fresa. Con la tabla anterior se ha podido observar que con velocidades de giro del husillo de 3000 rpm (máxima velocidad de giro en la fresadora Odisea) se consiguen velocidades de corte de 37,7 m/min al emplear la fresa de 4 mm de diámetro, dentro de los parámetros empleados por otros investigadores. Por lo tanto, para los ensayos a realizar con fresas de este tamaño, se mantendrá la velocidad de giro del husillo en 3000 rpm tanto en la fresadora Odisea como en la Lagun L650 (para poder comparar con mayor precisión los ensayos realizados en una y otra fresadora, con la misma velocidad de corte).

Por otro lado, se realizarán más ensayos disminuyendo el tamaño de fresa desde los 4 mm hasta 2,5 mm de diámetro. Si se hacen los cálculos pertinentes anteriores, se puede ver que las velocidades de corte empleando velocidades de giro del husillo de 3000 rpm y herramienta de 2,5 mm de diámetro son relativamente bajas en comparación con las obtenidas para la de 4 mm de diámetro. Por ello, y para que dicha velocidad de corte no fuese extremadamente pequeña, los ensayos a realizar empleando herramienta de 2,5 mm de diámetro se realizarán únicamente en la fresadora Lagun L650, debido a que su velocidad de giro de hasta 7000 rpm permitiría obtener velocidades de corte iguales a las resultantes a 3000 rpm con fresa de 4 mm de diámetro, obteniendo una velocidad de corte para dicha fresa de 37,7 m/min. Dicha velocidad de giro será de 4800 rpm.

4.2.2. Velocidad de avance

La variación de los diferentes parámetros que miden el avance, ya sea velocidad de avance o avance por diente, influye de manera muy importante en los resultados obtenidos en el mecanizado, afectando especialmente al acabado superficial como se puede observar, por ejemplo, en los estudios realizados por Bandapalli *et al.* (2017).

En el mecanizado en general y en el micromecanizado en particular, el parámetro que se utiliza para expresarlo por lo general es la velocidad de avance (V_f), siendo ésta el movimiento de la herramienta o pieza y que hace que haya material para el corte del mismo. Sin embargo, el parámetro que gobierna el proceso de corte se trata del avance por diente (f_z), ya que es éste el que indica qué cantidad de material está cortando cada diente de la herramienta de corte. La relación que existe entre un parámetro y otro es la siguiente:

$$V_f = f_z \times Z_c \times n \quad (3)$$

siendo V_f y f_z los ya parámetros ya mencionados de velocidad de avance y avance por diente, respectivamente, n la velocidad de giro de la herramienta y Z_c el número de filos de corte que posee la herramienta de corte.

Se recopila en la Tabla 5 un breve análisis de los parámetros relacionados con el avance, utilizados en la bibliografía anteriormente comentada en el apartado 2.6, con el objetivo de poder tener un rango de velocidades de avance comprendido entre unos valores razonables de acuerdo con la bibliografía científica sobre micromecanizado. Para su realización, se han tenido en cuenta los avances mínimos y máximos, y se van a exponer los avances por diente mínimos y máximos utilizados, como combinación de todos los factores de los que depende dicho valor.

Autor	Velocidad de giro (rpm)	Número de filos de corte	Velocidad de avance (mm/min)	Avance por diente ($\mu\text{m}/\text{diente}$)
Bandapalli <i>et al.</i> (2017)	30000 - 90000	2	120 – 1080	2 - 6
Eifler <i>et al.</i> (2018)	41000 - 60000	2	10	0,083 - 0,122
Kiswanto <i>et al.</i> (2014)	35000 - 95000	2	3 – 60	0,016 – 0,857
Aramcharoen y Mativenga (2008)	30000	2	12 - 216	0,2 – 3,6
Yuan <i>et al.</i> (2018)	10000 - 16000	2	10 - 96	0,5 – 3

Tabla 5. Velocidades de avance y avances por diente utilizados por diferentes autores.

En el presente estudio, las herramientas a utilizar serán de 4 filos, debido a que para obtener con velocidades de giro mucho menores a las utilizadas por los autores estudiados avances por diente en el mismo rango de valores que el analizado en la Tabla 5 un mayor número de filos permitirá obtener un más amplio rango de avances por diente. Por otro lado, debido a que la maquinaria utilizada no está diseñada específicamente para realizar micromecanizado, se va a limitar el avance por diente a 2 $\mu\text{m}/\text{diente}$. Por lo tanto, manteniendo la velocidad de giro en 3000 rpm como se va a realizar en los ensayos con fresas de 4 mm de diámetro, y utilizando como límite inferior de avance por diente el valor de 0,8 $\mu\text{m}/\text{diente}$, se tendrán los valores de velocidades de avance a utilizar mostrados en la Tabla 6.

Velocidad de giro (rpm)	Número de filos de corte	Velocidad de avance (mm/min)	Avance por diente ($\mu\text{m}/\text{diente}$)
3000	4	9,6	0,8
3000	4	14,4	1,2
3000	4	19,2	1,6
3000	4	24,0	2,0

Tabla 6. Velocidades de avance y avances por diente a utilizar con la fresa de 4 mm.

Analizando las velocidades de avance obtenidas, también se puede considerar que se encuentran entre valores moderados para los utilizados por los expertos en

este campo de estudio, por los que se considerarán válidas de cara a realizar el análisis experimental.

Una vez dados por válidos los avances por diente de la Tabla 7, habrá que modificar las velocidades de avance para los experimentos a realizar con la herramienta de 2,5 mm, ya que la velocidad de avance depende de la velocidad de giro del husillo o herramienta y, en estos ensayos, es necesario modificar ésta. Por lo tanto, se pueden calcular los valores de avance que habrá que utilizar para estos ensayos, para las velocidades de giro anteriormente expuestas, como se muestra en la Tabla 7.

Velocidad de giro (rpm)	Número de filos de corte	Velocidad de avance (mm/min)	Avance por diente ($\mu\text{m}/\text{diente}$)
4800	4	15,36	0,80
4800	4	23,04	1,20
4800	4	30,72	1,60
4800	4	38,40	2,00

Tabla 7. Velocidades de avance y avances por diente a utilizar con la fresa de 2,5 mm.

4.2.3. Profundidad de corte

La profundidad de corte también se trata de uno de los parámetros de corte importantes en el caso del micromecanizado, ya que el efecto que puede tener la profundidad de corte en la estabilidad del proceso es crucial debido al problema ya analizado del mínimo espesor de corte.

Haciendo un breve estudio de los parámetros de profundidad de corte utilizados por los mismos autores que se han mencionado previamente, se pueden identificar los valores de profundidades mostrados en la Tabla 8.

Autor	Profundidad de corte (μm)
Bandapalli <i>et al.</i> (2017)	2 - 18
Eifler <i>et al.</i> (2018)	-
Kiswanto <i>et al.</i> (2014)	10
Aramcharoen y Mativenga (2008)	50
Yuan <i>et al.</i> (2018)	50

Tabla 8. Profundidades de corte empleadas por diferentes autores.

Puesto que se van a realizar ensayos variando la profundidad de corte, se considera adecuado seleccionar tres profundidades de corte, que van a ser de 50, 100 y 150 μm , por lo que se tendrán esos tres niveles para el diseño de experimentos.

4.2.4. Longitud de mecanizado

Puesto que se está analizando un proceso de micromecanizado, no es necesario que la longitud de mecanizado sea muy alta, influyendo esto directamente en la obtención de un menor desgaste de la herramienta. De hecho, dicha longitud será la máxima que es capaz de analizar el rugosímetro Mitutoyo SJ-210, para tener la mayor distancia de muestreo que ofrece dicho rugosímetro. Dicha longitud será, pues, de 4 mm (5 medidas realizadas por el palpador, cada una de 0,8 mm de longitud). Esa longitud se refiere únicamente a la longitud de muestreo que es capaz de analizar el rugosímetro, pero habría que dejar mayor longitud para que la medida de la rugosidad del ensayo no se realice en diferentes condiciones de corte de la fresa (corte del primer filo solo, huella final, etc.).

4.2.5. Trayectoria de mecanizado

En cuanto a la trayectoria seguida en el mecanizado, se van a introducir dos tipos de trayectoria:

- Por un lado, una trayectoria rectilínea, con una longitud de mecanizado de análisis de 4 mm, con una longitud total de unos 19 mm.
- Por otro lado, una trayectoria curvilínea, con igualmente una longitud de análisis del mecanizado de 4 mm, describiendo la herramienta un cuarto de circunferencia con sentido dextrógiro, para lo que se obtiene que, para mecanizar esos 4 mm, debe tratarse de una circunferencia de radio 2,55 mm.

Dichas trayectorias resultantes son las expuestas en las Imágenes 13 y 14.

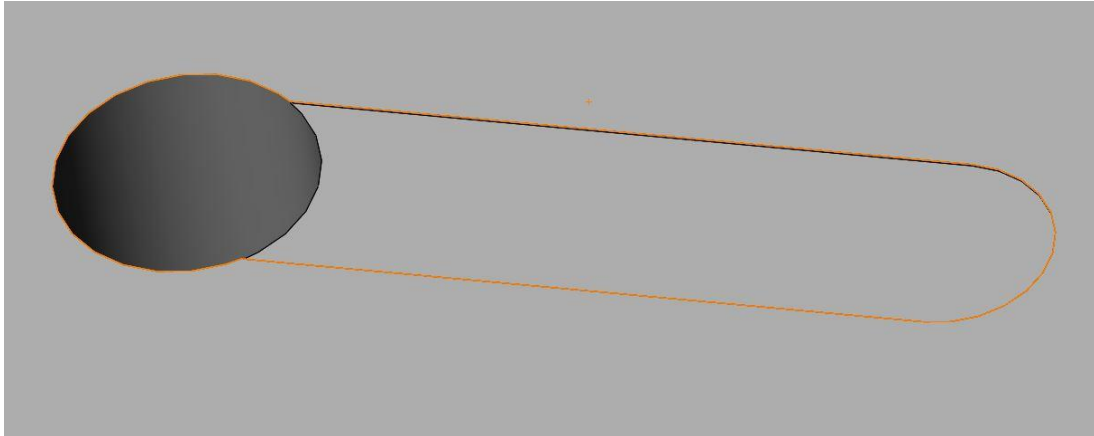


Imagen 13. Ranura recta (T1).

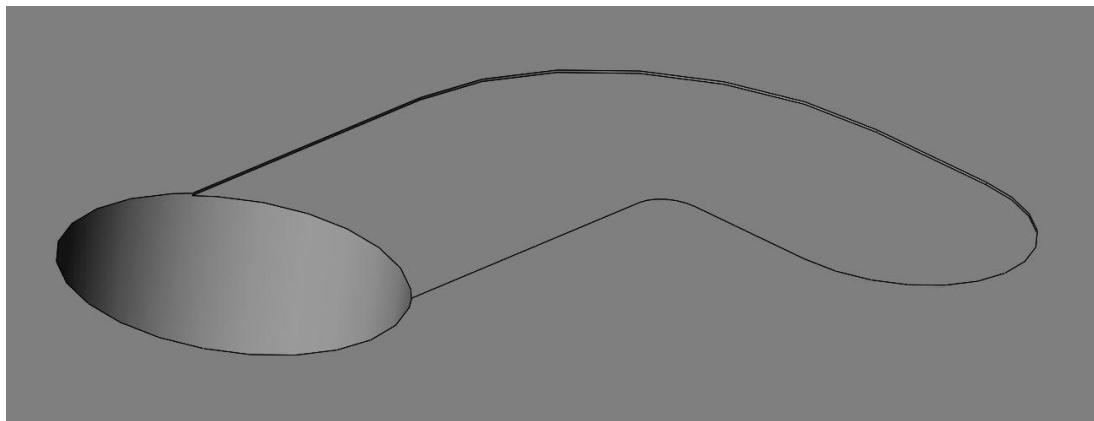


Imagen 14. Ranura curva (T2).

En este caso, las diferentes trayectorias de mecanizado seguidas van a permitir realizar un análisis de las fuerzas de corte y acabado superficial en diferentes condiciones ya no solo de los parámetros de mecanizado, sino del comportamiento del micromecanizado dependiendo del tipo de movimiento de la herramienta.

4.3. Diseño de experimentos

La definición de los diferentes niveles que se van a utilizar para cada una de las variables va a permitir a posteriori hacer un estudio de los experimentos a realizar. Sabiendo que se cuenta con cuatro valores de velocidades de avance (cuatro niveles), tres de profundidad (tres niveles) y dos de trayectoria de mecanizado (dos niveles), se tienen un total de ensayos de $4 \times 3 \times 2 = 24$ ensayos.

En la Tabla 9 se recogen todos los diferentes niveles que se van a tomar, la variable que se está cambiando, y cada número asociado a dichos niveles.

Variable	Valor de la variable	Nivel de variable
Avance (f)	0,8 $\mu\text{m}/\text{diente}$	$f1$
	1,2 $\mu\text{m}/\text{diente}$	$f2$
	1,6 $\mu\text{m}/\text{diente}$	$f3$
	2 $\mu\text{m}/\text{diente}$	$f4$
Profundidad de pasada (p)	50 μm	$p1$
	100 μm	$p2$
	150 μm	$p3$
Trayectoria (t)	Recta	$t1$
	Curva	$t2$

Tabla 9. Niveles de las diferentes variables de estudio.

Dichos 24 ensayos van a ser realizados un total de tres veces, variando ciertas condiciones del proceso de mecanizado. Por un lado, se va a variar la fresadora empleada, usando tanto la fresadora Odisea como la fresadora Lagun L650, empleando una fresa de 4 mm de diámetro, pudiendo realizar en este caso una comparación entre los resultados de una y otra máquina. Por otro lado, en la fresadora Lagun L650 se empleará también una herramienta de 2,5 mm de diámetro para el mecanizado de las diferentes ranuras, de cara a tener unos resultados comparables del micromecanizado realizado con dos herramientas de diferente diámetro en la misma máquina-herramienta.

Se analiza ahora cada uno de los 24 experimentos que se realizarán con cada una de las herramientas en las dos máquinas disponibles. Se trata de un diseño de experimentos *full factorial*.

Para el diseño de experimentos que se va a realizar, se realizarán los ensayos agrupándolos por herramientas. Se hará de esta manera ya que, aparte de que el cambio de herramienta no es rápido e introduciría un trabajo largo y que no aportaría ningún resultado diferente al obtenido, se introduciría mayor error que al realizar los ensayos primero con una herramienta y posteriormente con la otra, por el hecho de tener que tomar referencias en cada una de las pasadas o pequeños errores que pueda tener la máquina en el cambio de herramienta.

Una vez realizada la combinación de todas y cada una de las variables que se van a modificar a lo largo de los diferentes ensayos, y poniendo éstos de manera

aleatoria de cara a que no se puedan agrupar esos resultados por grupos de variables acumulando errores y, por lo tanto, obtener unos resultados más fiables, se obtienen las Tablas 10 y 11.

Nº Ens	<i>f</i>	<i>p</i>	<i>t</i>	Nº Ens	<i>f</i>	<i>p</i>	<i>t</i>
1	<i>f1</i>	<i>p1</i>	<i>t1</i>	13	<i>f1</i>	<i>p1</i>	<i>t2</i>
2	<i>f2</i>	<i>p3</i>	<i>t1</i>	14	<i>f2</i>	<i>p1</i>	<i>t1</i>
3	<i>f3</i>	<i>p3</i>	<i>t2</i>	15	<i>f4</i>	<i>p1</i>	<i>t1</i>
4	<i>f3</i>	<i>p1</i>	<i>t1</i>	16	<i>f1</i>	<i>p2</i>	<i>t2</i>
5	<i>f2</i>	<i>p2</i>	<i>t2</i>	17	<i>f2</i>	<i>p3</i>	<i>t2</i>
6	<i>f3</i>	<i>p3</i>	<i>t1</i>	18	<i>f4</i>	<i>p3</i>	<i>t2</i>
7	<i>f1</i>	<i>p2</i>	<i>t1</i>	19	<i>f1</i>	<i>p3</i>	<i>t1</i>
8	<i>f1</i>	<i>p3</i>	<i>t2</i>	20	<i>f3</i>	<i>p2</i>	<i>t1</i>
9	<i>f2</i>	<i>p1</i>	<i>t2</i>	21	<i>f4</i>	<i>p2</i>	<i>t1</i>
10	<i>f3</i>	<i>p2</i>	<i>t2</i>	22	<i>f3</i>	<i>p1</i>	<i>t2</i>
11	<i>f4</i>	<i>p3</i>	<i>t1</i>	23	<i>f4</i>	<i>p1</i>	<i>t2</i>
12	<i>f4</i>	<i>p2</i>	<i>t2</i>	24	<i>f2</i>	<i>p2</i>	<i>t1</i>

Tabla 10. Diseño de experimentos con fresa de 4 mm de diámetro.

Nº Ens	<i>f</i>	<i>p</i>	<i>t</i>	Nº Ens	<i>f</i>	<i>p</i>	<i>t</i>
1	<i>f1</i>	<i>p3</i>	<i>t1</i>	13	<i>f4</i>	<i>p3</i>	<i>t2</i>
2	<i>f2</i>	<i>p2</i>	<i>t1</i>	14	<i>f4</i>	<i>p1</i>	<i>t1</i>
3	<i>f4</i>	<i>p2</i>	<i>t2</i>	15	<i>f3</i>	<i>p1</i>	<i>t2</i>
4	<i>f3</i>	<i>p3</i>	<i>t1</i>	16	<i>f3</i>	<i>p3</i>	<i>t2</i>
5	<i>f1</i>	<i>p2</i>	<i>t1</i>	17	<i>f1</i>	<i>p2</i>	<i>t2</i>
6	<i>f1</i>	<i>p1</i>	<i>t1</i>	18	<i>f1</i>	<i>p3</i>	<i>t2</i>
7	<i>f2</i>	<i>p3</i>	<i>t2</i>	19	<i>f2</i>	<i>p2</i>	<i>t2</i>
8	<i>f2</i>	<i>p3</i>	<i>t1</i>	20	<i>f4</i>	<i>p2</i>	<i>t1</i>
9	<i>f2</i>	<i>p1</i>	<i>t2</i>	21	<i>f2</i>	<i>p1</i>	<i>t1</i>
10	<i>f4</i>	<i>p1</i>	<i>t2</i>	22	<i>f4</i>	<i>p3</i>	<i>t1</i>
11	<i>f3</i>	<i>p2</i>	<i>t2</i>	23	<i>f3</i>	<i>p1</i>	<i>t1</i>
12	<i>f1</i>	<i>p1</i>	<i>t2</i>	24	<i>f3</i>	<i>p2</i>	<i>t1</i>

Tabla 11. Diseño de experimentos con fresa de 2,5 mm de diámetro.

En la definición del plan experimental no se ha considerado a la herramienta como un factor para evitar tener que ir cambiándola entre ensayos en la ejecución experimental, pero variando el resto de parámetros de manera aleatoria.

Para la realización de cada uno de los ensayos se tendrá que mecanizar previamente un agujero en el punto de bajada de la fresa, de cara a que ésta no sufra en su centro, al no estar pensadas para cortar con su parte central. Para ello, se utilizarán brocas de diámetro 5 mm para realizar dichas perforaciones. Por otro lado, no solo se mecanizará a partir de ahí una ranura de la longitud de 4 mm comentada anteriormente, sino que habrá que alargar esa longitud por ambos extremos para que la superficie mecanizada se asemejase a la mecanizada en una ranura muy larga, y no tener variaciones en los resultados obtenidos mediante el rugosímetro o el dinamómetro por no encontrarse la fresa mecanizando material en todo momento.

El diseño de experimentos anteriormente expuesto se ha realizado haciendo que todos los parámetros de corte no estudiados sean lo más parecidos posibles entre

sí, de cara a obtener unos resultados que poder comparar entre diferentes profundidades de pasada, avances, fresas utilizadas, trayectorias y maquinaria (esto únicamente al utilizar fresa de 4 mm de diámetro).

4.4. Programación y obtención de códigos CNC

De cara a la obtención del código CNC para realizar los diferentes ensayos, se empleó el programa Catia V5. En primer lugar, se modeló la geometría de la pieza con los ensayos realizados en SolidWorks, quedando el resultado mostrado en la Imagen 15.

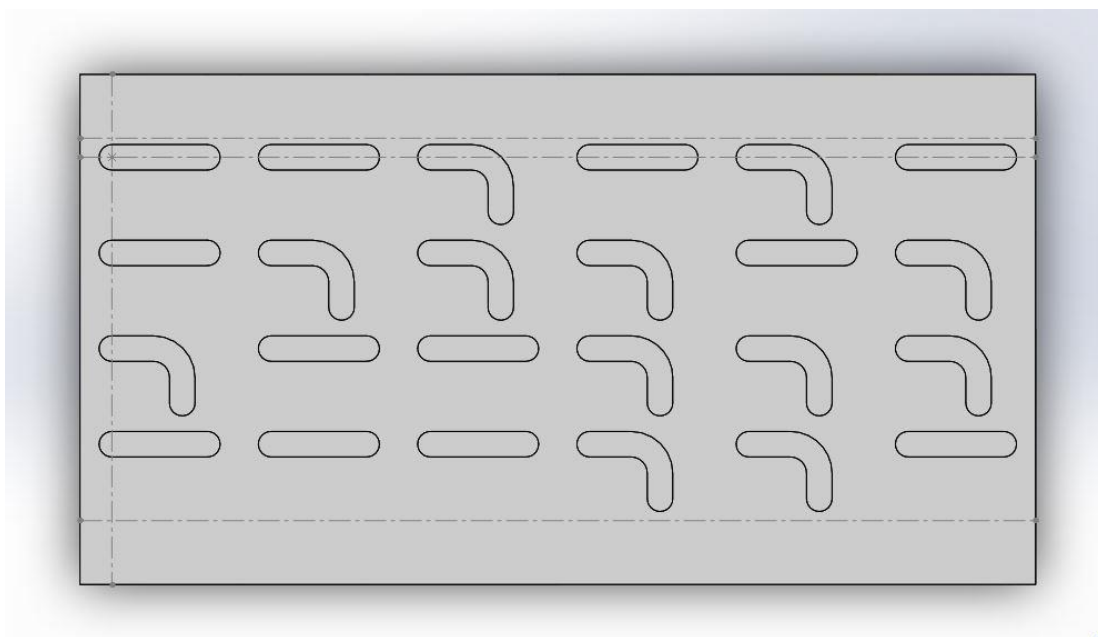


Imagen 15. CAD de los ensayos a realizar (herramienta de 4 mm).

En el archivo CAD obtenido mediante SolidWorks ya se incluían los diferentes ensayos en el orden establecido en el diseño experimental, incluyendo el tamaño de la ranura, la trayectoria del mecanizado y la profundidad del mismo. El archivo CAD de los ensayos con herramienta de 2,5 mm es similar al presentado, pero con diferente anchura en la ranura, y los ensayos colocados en diferente orden (ya que se situaron aleatoriamente). Se dejó por cada lado largo de la pieza un margen de 1 cm de cara a poder sujetar por esa zona las piezas al dinamómetro mediante mordazas verticales, además de dejar un margen entre ensayo y ensayo para no mezclar diferentes profundidades.

Una vez obtenido el archivo CAD de la pieza a mecanizar mediante SolidWorks, simplemente obteniendo el archivo STEP de la misma y pasándolo a Catia se podía empezar a realizar la programación de todas las operaciones necesarias para obtener, desde un tocho rectangular, las ranuras de los ensayos del diseño experimental realizado. Puesto que las operaciones se trataban de fresados frontales, sin ningún tipo de desbaste, y mecanizado recto, se utilizaron las operaciones de Catia V5 relativas al “*prismatic machining*”. Para empezar a trabajar, se insertó un tocho de las mismas dimensiones que la pieza de partida sobre el CAD obtenido con SolidWorks, ocultándolo posteriormente y configurando las diferentes operaciones con los parámetros que dependen de la máquina a utilizar y de la herramienta.

Una vez se ejecutan todas las operaciones de “*profile contouring*” con sus parámetros establecidos, se obtiene el resultado mostrado en la Imagen 16.

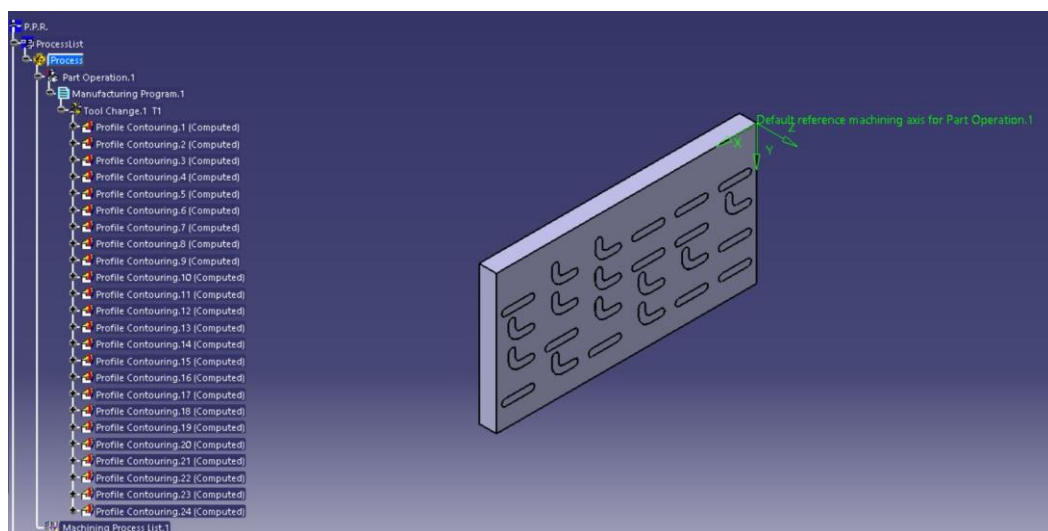


Imagen 16. Programación en Catia V5.

Para configurar cada una de las operaciones, es necesario introducir las velocidades de avance calculadas previamente, junto con los avances tanto de retroceso como de aproximación (que tendrán que ver con las macros de los movimientos durante el mecanizado que se programen), ya que las profundidades del mecanizado han sido introducidas durante la etapa de modelado del CAD, al igual que las trayectorias de las ranuras. Un ejemplo es el expuesto en la imagen 17.

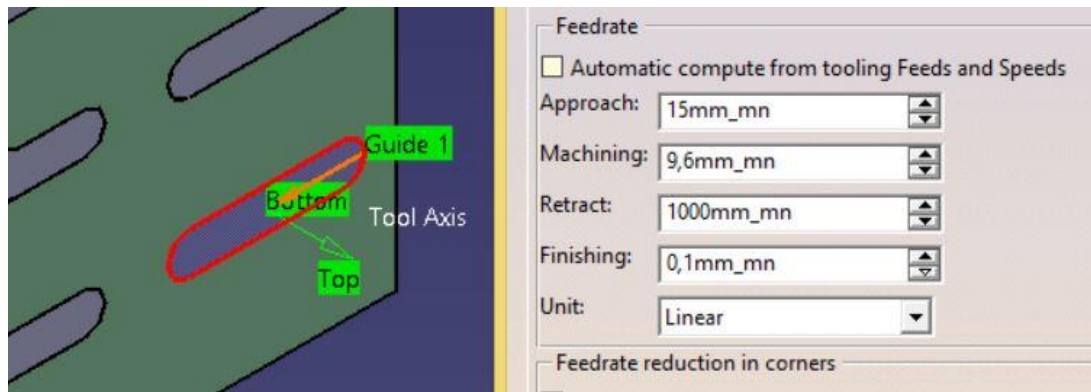


Imagen 17. Parámetros de mecanizado del ensayo 1 con fresa de 4 mm.

Se ha tomado una velocidad de avance en mecanizado de 9,6 mm/min, el equivalente a $0,8 \mu\text{m/diente}$ utilizando una velocidad de giro de 3000 rpm en ese ejemplo. Por otro lado, se han programado unas velocidades de aproximación de 15 mm/min para que la fresa se enfriase durante el ensayo y una velocidad de retracción de 1000 mm/min, para que no hubiera ningún tipo de interferencia con la zona mecanizada por volver a mecanizarse al hacer una retracción lenta, o por el hecho de que dicha retracción lenta podría provocar vibraciones que podrían dañar tanto a la herramienta como a la superficie mecanizada.

De la manera expuesta anteriormente, se programaron el resto de ensayos para cada una de las ranuras del diseño experimental, resultando en un total de 72 ensayos: 72 ranuras, de las cuales 36 son rectas y 36 curvas, 24 con cada herramienta, 18 con cada avance, y 24 con cada profundidad de pasada definida, y hechas 24 en la fresadora Odisea y 48 en la Lagun L650.

Los códigos generados mediante Catia V5 fueron corregidos manualmente para evitar pasadas en vacío por las ranuras ya mecanizadas, lo que provocaría pequeños desperfectos que no son reales sobre la superficie ya mecanizada y vibraciones que podrían afectar a las fuerzas obtenidas mediante el dinamómetro. Y también para modificar cabeceras y pies de código con los parámetros necesarios de velocidad de giro del husillo. Tras ello, se simuló mediante el programa WinUnisoft para comprobar las trayectorias y posibles colisiones, además de la simulación obtenida mediante el propio programa Catia V5.

Un ejemplo de cabecera utilizada en los códigos es la expuesta en la Imagen 17, correspondiente al grupo de 24 ensayos realizados en fresadora Lagun L650 con la herramienta de 4 mm de diámetro:

```
G90 G94 F1000 S3000 M03  
T1 D1  
M6
```

Imagen 18. Cabecera de código para fresa de 4 mm en Odisea.

La velocidad de giro del husillo se fijó a 3000 rpm para este ensayo, mientras que para el realizado con la herramienta de 2,5 mm se programó dicha velocidad a 4800 rpm, con giro antihorario de la herramienta. Por otra parte, a la herramienta se la llamó T1 durante los ensayos en la fresadora Odisea, puesto que al no tener cambiador automático de herramientas siempre trabaja con la T1, mientras que en la fresadora Lagun L650 hubo que cambiarlo debido a que dicha llamada a la herramienta T1 sí que producía un cambio de herramientas no deseado.

5. Ejecución experimental

5.1. Disposición en máquina

La colocación, tanto de la pieza como del dinamómetro dentro de las fresadoras, para cada ensayo, se presenta en las Imágenes 19, 20 y 21.

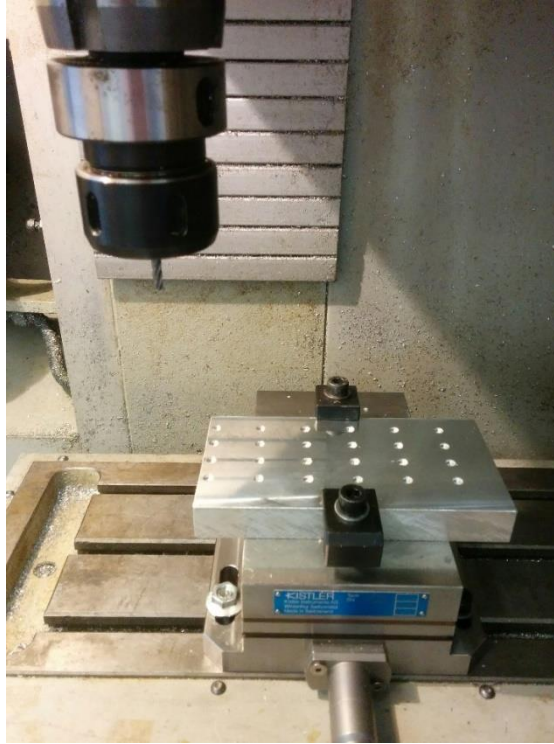


Imagen 19. Disposición de experimentos en fresadora Odisea (4mm).



Imagen 20. Disposición de experimentos en Lagun L650 para fresa de 4 mm de diámetro. Izquierda: vista frontal. Derecha: vista cenital.



Imagen 21. Disposición de experimentos en Lagun L650 (2,5 mm)

En la fresadora Odisea el dinamómetro (parte inferior) se sujetó a la mesa utilizando cuatro tornillos, con lo que quedaba bien sujeto de cara a realizar los ensayos. Por otro lado, en la máquina Lagun L650 el dinamómetro se colocó sobre las mordazas ya que tenían la apertura máxima necesaria para sujetarlo en ellas.

Si se atiende a la colocación de la pieza sobre el dinamómetro, se puede ver que se ha realizado mediante dos mordazas verticales. Esto es debido a las pequeñas fuerzas de mecanizado esperadas en los ensayos que no se consideran suficientes de cara a mover la pieza de sus anclajes. La disposición de dichas mordazas se hizo de forma enfrentada, para poder sujetar la pieza en caso de que hubiera algún tipo de levantamiento por cualquiera de los dos lados. Sin embargo, en las imágenes del ensayo con herramienta de 4 mm realizado en Lagun L650 se puede observar cómo las mordazas se colocaron en la misma zona de la pieza, y esto fue debido a que la programación del código CNC estaba realizada con la misma disposición que en la fresadora Odisea pero, en esta máquina, no existía la posibilidad de colocar el dinamómetro en la misma posición con respecto a los ejes de la máquina, por lo que había que girar la pieza con respecto al dinamómetro, y la única manera de sujeción posible era la que finalmente se adoptó. Posteriormente, para los ensayos con herramientas de 2,5 mm se cambió la programación completa para poder realizar las sujeciones tal y como se habían realizado la primera vez, en el ensayo de la máquina Odisea.

5.2. Pérdidas de horizontalidad en las piezas

La linealidad vertical se refiere a la horizontalidad de las piezas en su colocación en la fresadora con respecto al cabezal de la misma. Este es un factor muy importante en el mecanizado convencional, ya que un simple levantamiento de la pieza hace que la herramienta sufra más en unas partes que en otras, variando la profundidad de pasada efectiva. En el caso del micromecanizado, se trata de un factor aún más determinante, puesto que las profundidades de pasada van a ser tan pequeñas que la pérdida de horizontalidad haría que se produjeran errores elevados en las profundidades de pasada.

Para medir la horizontalidad en las piezas, en primer lugar, era necesario medir el mismo parámetro en el dinamómetro. Esto se realizó empleando el palpador, montando únicamente el dinamómetro sobre la mesa de la fresadora y sujetándolo a la misma. Una vez hecho esto, se pasó el palpador de un lado al otro del dinamómetro, tocando sobre la superficie del mismo, tanto en el eje X (eje longitudinal del dinamómetro) como en el eje Y (eje transversal del dinamómetro), obteniendo unos resultados de variación de menos de una centésima de milímetro entre extremos, resultado bastante bueno para las profundidades de mecanizado de los ensayos propuestos. De esta manera, existe la certeza de que la base sobre la que se apoya la pieza estaría en perfectas condiciones para realizar el ensayo.

Sin embargo, una vez colocada la pieza pequeña y sujeta mediante mordazas, se realizó la misma prueba de cara a comprobar que ésta también se encontraba perfectamente horizontal. Se colocó el palpador en la parte donde empezarían los ensayos, en su punto inicial, entre dos ensayos, y se llevó hasta el extremo de la pieza para medir la desviación en altura de dicha pieza transversalmente, obteniendo los resultados expuestos en las Imágenes 22 y 23.



Imagen 22. Vista frontal de la medida de la horizontalidad transversal de la pieza pequeña, posición inicial.



Imagen 23. Vista frontal de la medida de la horizontalidad transversal de la pieza pequeña, posición final.

El palpador marca una desviación transversal de 2,3 décimas de milímetro (0,23 mm o 230 μm) entre la posición inicial y la posición final, como se puede apreciar claramente en la Imagen 23. Se trata de una desviación muy elevada con respecto a las profundidades empleadas en los ensayos, puesto que esa desviación es entre

cuatro y cinco veces mayor que la profundidad mínima de pasada de los ensayos, algo completamente inaceptable de cara a obtener precisión en el análisis experimental a realizar.

El mismo procedimiento se realizó para medir la desviación longitudinal de dicha pieza, así como para las desviaciones longitudinal y transversal de la pieza grande, obteniendo los siguientes resultados:

- Entre 2,5 y 2,8 centésimas de milímetro (0,025 a 0,028 mm o 25 a 28 μm) de desviación en la coordenada Z al realizar la medida longitudinal en la pieza pequeña.
- 3,3 décimas de milímetro (0,33 mm o 330 μm) de desviación en la coordenada Z al realizar la medida longitudinal en la pieza grande.
- 0,8 décimas de milímetro (0,08 mm o 80 μm) de desviación en la coordenada Z al realizar la medida transversal en la pieza grande.

La desviación vertical de la pieza grande en la medida longitudinal es más acusada que en la pieza pequeña, algo completamente inadmisibles de cara a los ensayos por el alto valor que toma dicha desviación. Por otro lado, su desviación transversal era menor que en el caso de la pieza pequeña, aun siendo excesivamente elevada.

Por lo tanto, debido a que estas desviaciones de la horizontalidad de las piezas harían que los ensayos fueran completamente erróneos, era necesario realizar las correcciones pertinentes sobre los ensayos y códigos inicialmente propuestos.

5.3. Correcciones a los ensayos

Puesto que las desviaciones existentes en las piezas eran demasiado grandes, se intentó corregir dicho error.

La primera solución que se dio al problema fue aislar cada ensayo, tomando valores cero en cada pasada, de manera que se dividiría el error en la totalidad de la pieza entre seis para la medida longitudinal (seis ensayos longitudinalmente, y, por lo tanto, seis medidas del cero en la coordenada Z), y entre cuatro en la medida transversal (cuatro ensayos transversalmente, cuatro ceros). De esta manera, se

obtendría una variación de 4,42 μm longitudinalmente y 57,5 μm transversalmente para la pieza pequeña. Aunque transversalmente esa desviación sí que era relativamente elevada, solo afectaría a las pasadas con una trayectoria curva, y sobre todo en su posición final de mecanizado, donde no se va a realizar medida alguna de la rugosidad. Por lo tanto, ese fue el enfoque de solución o limitación del problema adoptado para hacer los ensayos en la fresadora Odisea, lo que obligó a aislar cada ensayo en la codificación CNC y a realizar múltiples ceros.

Sin embargo, en la fresadora Lagun L650 la solución fue diferente. Al contar allí con una máquina más potente y con las herramientas necesarias se optó por hacer un planeado previo a la realización de los ensayos, con la pieza ya colocada sobre el dinamómetro. Una vez realizado el mecanizado, y tras observar que la variación de la coordenada Z tanto en el eje longitudinal como en el eje transversal se había reducido drásticamente hasta aproximadamente 10 μm en total en cada uno de dichos ejes, se pudieron realizar todos los ensayos a la vez, con la disminución del error que ello conlleva sobre todo a la hora de tomar los ceros en el eje vertical. Por lo tanto, fue necesario modificar todos los códigos para no tener cada ensayo aislado, y modificar a su vez las velocidades de aproximación para que la fresa pudiera refrigerarse en el trayecto entre un ensayo y el siguiente.

Por otro lado, para la realización de los ceros en los ejes verticales también se está introduciendo cierto error en cada ensayo. Sin embargo, tanto en los 24 ensayos realizados individualmente en la fresadora Odisea, como para cada uno de los dos grupos de 24 ensayos realizados en Lagun L650, dichos ceros se obtuvieron utilizando la fresa con la que se fuese a trabajar en ese momento, y, conectando el dinamómetro, se tocaba la pieza disminuyendo la altura poco a poco, hasta que se obtuviera una medición en el dinamómetro, punto en el que la fresa justamente hubiera tocado la pieza, pudiendo obtener de esta manera gran precisión a la hora de realizar la medición del cero en la coordenada Z de la pieza.

5.4. Ensayos

Una vez realizadas todas las correcciones pertinentes, colocada la pieza sobre el dinamómetro y sujeta ésta mediante las mordazas, se realizaron los ensayos planteados en el apartado 4.3.

5.4.1. Ensayo en fresadora Odisea con herramienta de 4 mm

En este ensayo fue en el único en el cuál hubo que realizar cada ensayo por separado, tomando ceros entre ellos para cada uno. La disposición y el mecanizado de este ensayo se pueden observar en las Imágenes 24 y 25.

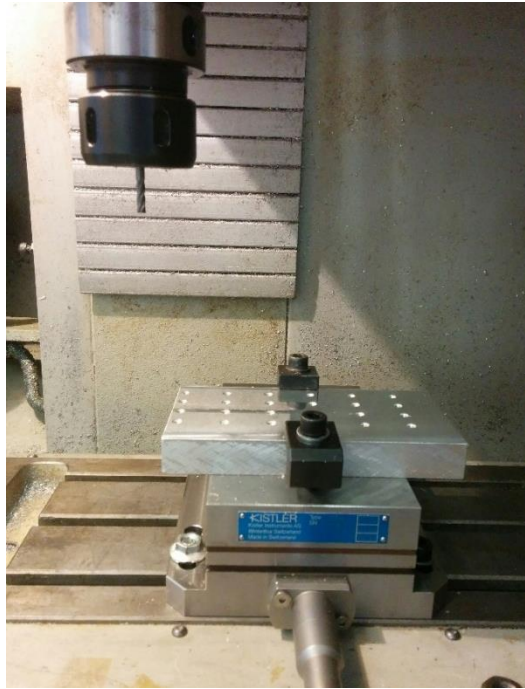


Imagen 24. Disposición de pieza y fresa de 4 mm para el ensayo en Odisea.



Imagen 25. Diferentes vistas del mecanizado en Odisea con fresa de 4 mm. Izquierda: vista desde esquina delantera. Derecha: vista desde esquina trasera.

Durante dicho mecanizado fue necesario pasar cada uno de los 24 códigos individualmente desde el ordenador que controla la fresadora Odisea y apagar y encender la toma de datos del dinamómetro en cada uno de los ensayos, tanto para la toma de las cotas cero en altura como para la adquisición de los datos pertinentes de fuerzas en el mecanizado. Además, se simuló en máquina cada uno de los ensayos para comprobar que no existieran colisiones, y se comprobaron uno a uno los parámetros de mecanizado del ensayo (velocidades de avance, trayectorias y profundidades de pasada).

5.4.2. Ensayo en Lagun L650 con herramienta de 4 mm

Para este ensayo fue necesaria la obtención de un código numérico diferente a los utilizados para la fresadora Odisea, puesto que se pudieron agrupar los 24 ensayos en un único código de programación, lo que permitió una mayor velocidad a la hora de la experimentación. Para ello, una vez dispuesta la pieza sobre el dinamómetro como se muestra en la Imagen 26, se planeó mediante una herramienta de plaquitas de 80 mm de diámetro.

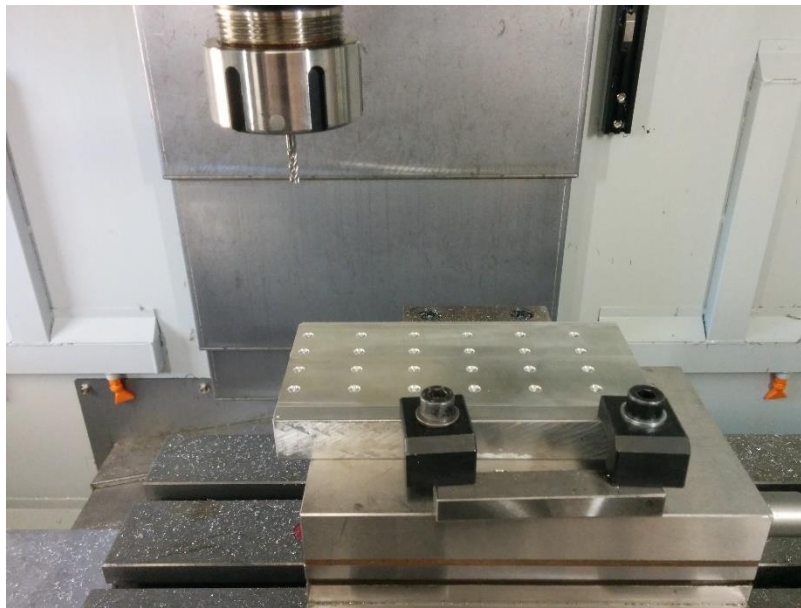


Imagen 26. Disposición de pieza y fresa de 4 mm para el ensayo en fresadora Lagun L650, con pasada de planeado ya realizada.

Tras ello, se realizaron los ensayos pertinentes. Se utilizaron las siguientes velocidades de avance para las macros de la programación:

- Mecanizado a cada velocidad de ensayo, analizada previamente, para conseguir el avance por diente establecido.
- Aproximación lenta a 10 mm/min para que la herramienta refrigerase tanto en el paso entre ensayo y ensayo como en la aproximación vertical al tocho, con movimiento vertical de 10 mm sobre cada agujero (será igual en todos los ensayos).
- Retracción rápida a 1000 mm/min para evitar vibraciones y remecanizado, vertical de 10 mm (igual también para todos los ensayos).

La Imagen 27 muestra el proceso de mecanizado de este grupo de análisis experimentales.



Imagen 27. Mecanizado realizado en Lagun L650 con fresa de 4 mm.

En estos ensayos fueron los únicos en los que hubo que colocar la pieza con las dos mordazas por el mismo lado. Con esta sujeción no se produjo ningún tipo de problema de desplazamiento de la pieza debido a las pequeñas fuerzas resultantes en este tipo de operaciones de mecanizado. Por otro lado, el dinamómetro no se cortó en ningún momento durante este análisis, obteniendo un único archivo de datos para el total de las 24 ranuras.

5.4.3. Ensayo en Lagun L650 con herramienta de 2,5 mm

En este ensayo se modificaron los códigos numéricos con los que se ensayó el micromecanizado realizado con la herramienta de 4 mm de diámetro, modificando las velocidades de avance para el mecanizado, las velocidades de giro y las anchuras de las ranuras. Además, durante el ensayo con la herramienta de 4 mm se pudo observar que el tiempo entre pasadas era excesivamente elevado teniendo en cuenta que la herramienta no sufría calentamiento por los bajos valores de profundidad de pasada

y avance, debido a la baja velocidad de avance programada para el movimiento de la herramienta entre cada uno de los ensayos, por lo que en estos ensayos se programaron con los siguientes valores:

- Retracción de nuevo a 1000 mm/min, igual al apartado anterior.
- Aproximación (incluye movimiento entre pasadas y movimiento de bajada hacia la pieza) a 20 mm/min entre pasadas en la misma fila de ensayos, y a 50 mm/min entre la pasada final de una fila y la inicial de la siguiente (al utilizar herramienta de 4 mm de diámetro se mantuvo en 10 mm/min, empleando casi 15 minutos para ir desde el final del último ensayo hasta el principio del siguiente en la fila contigua, reduciéndose aquí a menos de 3 minutos).

Por otro lado, puesto que los códigos fueron corregidos cambiando la orientación de los ejes de coordenadas, se pudo colocar la pieza de igual forma que en la Odisea, con una mordaza a cada lado de la misma, como se muestra en la Imagen 28.



Imagen 28. Disposición de la pieza en fresadora Lagun L650 para mecanizado con fresa de 2,5 mm de diámetro.

Se puede observar en la Imagen 28 de nuevo la pasada de planeado realizada sobre la pieza. Dicha pasada en este caso no se pudo mecanizar utilizando la fresa de plaquitas para planeado de 80 mm de diámetro, ya que hubiera chocado contra las

mordazas que sujetaban la pieza, teniendo que realizar pasadas con la herramienta de 40 mm de diámetro, pero obteniendo igualmente un buen resultado en cuanto al acabado conseguido.

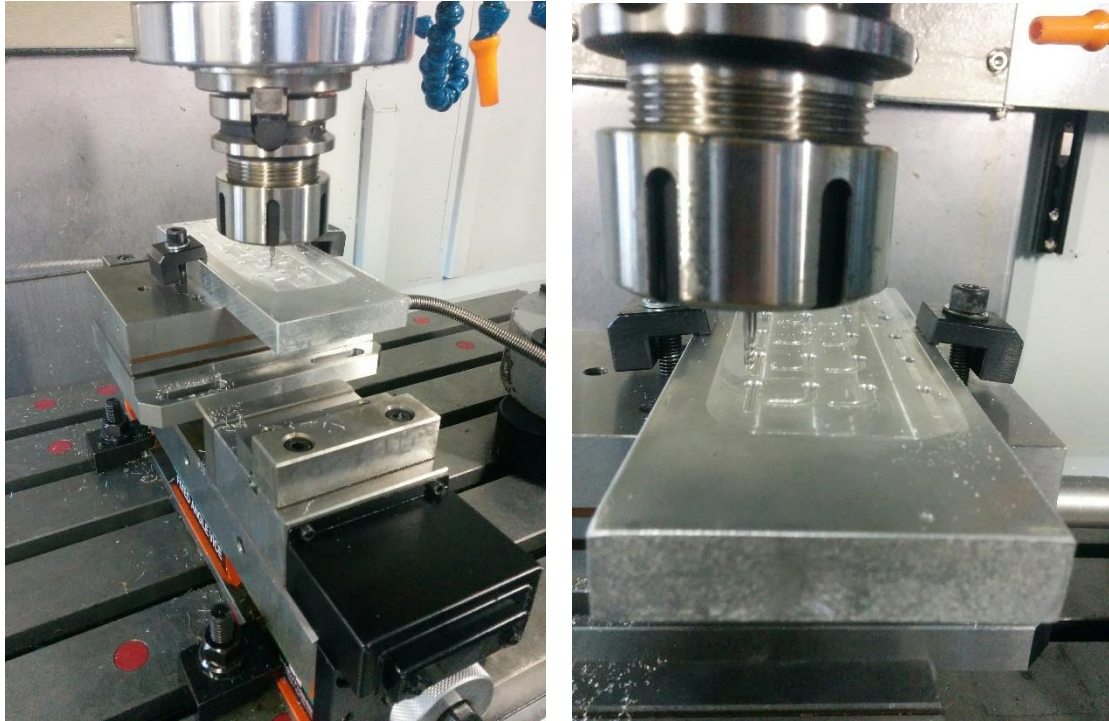


Imagen 29. Mecanizado realizado en Lagun L650 con fresa de 2,5 mm de diámetro.

Durante la realización de estos ensayos no se paró el dinamómetro en ningún momento, obteniendo igualmente un único archivo de datos.

6. Resultados obtenidos y análisis

6.1. Rugosidad superficial

6.1.1. Obtención de resultados

Utilizando el rugosímetro Mitutoyo SJ-210 se realizó la medición de la rugosidad R_a , R_z y R_t una vez realizados los ensayos para cada una de las herramientas, usando un λ_c de 0,8 mm. De esta manera, se podría analizar la influencia del avance, de la profundidad de pasada y de la trayectoria en el acabado superficial obtenido en la pieza de trabajo con las herramientas y máquinas empleadas para la realización de los ensayos.

Para la medición de dichas rugosidades, se hicieron tres medidas en cada ensayo: en los rectos, en tres puntos diferentes a lo largo de la longitud mecanizada, y en los curvos con una medida en la parte recta inicial, otra en la curva y una última en la parte recta final.

En la Tabla 12 se presentan los resultados obtenidos mediante el rugosímetro para cada una de las medidas realizadas en todas las ranuras mecanizadas empleando la fresadora Odisea y la herramienta de 4 mm de diámetro. Por otro lado, los valores medios de las mediciones realizadas para R_a , R_z y R_t se muestran en la Tabla 13.

Nº ensayo	Ra (µm)	Rz (µm)	Rt (µm)	Nº ensayo	Ra (µm)	Rz (µm)	Rt (µm)
1	0,263	1,971	2,380	13	0,328	2,809	3,526
	0,265	1,963	2,272		0,294	2,512	3,369
	0,263	2,178	3,013		0,242	1,859	2,989
2	0,237	1,869	2,481	14	0,221	1,768	2,161
	0,243	1,855	2,456		0,222	1,756	2,165
	0,259	2,089	3,073		0,231	1,870	2,391
3	0,217	1,563	2,237	15	0,228	1,993	3,291
	0,245	2,090	2,823		0,225	1,867	2,807
	0,271	2,129	2,839		0,216	1,646	2,119
4	0,268	2,975	7,390	16	0,288	2,327	2,872
	0,277	2,978	6,165		0,312	2,626	3,906
	0,250	2,140	3,205		0,244	1,870	2,862
5	0,240	1,900	2,449	17	0,241	1,614	2,047
	0,250	1,856	2,562		0,306	2,284	2,798
	0,233	2,160	2,759		0,224	1,949	2,531
6	0,233	1,919	2,192	18	0,250	1,916	2,689
	0,229	1,857	2,887		0,250	1,845	2,440
	0,232	1,771	2,248		0,215	1,644	2,082
7	0,290	2,296	2,794	19	0,282	2,310	2,962
	0,273	2,289	2,805		0,256	2,086	2,534
	0,274	2,413	3,606		0,266	2,206	3,280
8	0,289	2,151	2,791	20	0,233	1,873	2,265
	0,282	2,110	2,841		0,227	1,756	2,286
	0,231	1,822	2,400		0,229	1,690	1,977
9	0,210	1,448	1,895	21	0,244	2,061	3,077
	0,216	1,735	2,374		0,231	1,939	2,526
	0,209	1,501	1,854		0,227	1,962	2,625
10	0,237	1,932	2,978	22	0,226	1,781	2,156
	0,236	1,886	2,510		0,263	2,307	2,960
	0,215	1,606	2,360		0,258	1,883	2,285
11	0,277	2,464	4,295	23	0,215	1,857	2,694
	0,253	2,415	4,081		0,218	1,560	2,033
	0,280	2,513	3,757		0,214	1,692	2,413
12	0,233	1,921	2,443	24	0,229	1,796	2,473
	0,250	2,096	3,126		0,243	2,025	2,971
	0,211	1,549	2,232		0,287	2,928	6,042

Tabla 12. Rugosidades obtenidas en los ensayos realizados en fresadora Odisea con fresa de 4 mm de diámetro.

Nº ensayo	Ra media (µm)	Rz media (µm)	Rt media (µm)	Nº ensayo	Ra media (µm)	Rz media (µm)	Rt media (µm)
1	0,264	2,037	2,555	13	0,288	2,393	3,295
2	0,246	1,938	2,670	14	0,225	1,798	2,239
3	0,244	1,927	2,633	15	0,223	1,835	2,739
4	0,265	2,698	5,587	16	0,281	2,274	3,213
5	0,241	1,972	2,590	17	0,257	1,949	2,459
6	0,231	1,849	2,442	18	0,238	1,802	2,404
7	0,279	2,333	3,068	19	0,268	2,201	2,925
8	0,267	2,028	2,677	20	0,230	1,773	2,176
9	0,212	1,561	2,041	21	0,234	1,987	2,743
10	0,229	1,808	2,616	22	0,249	1,990	2,467
11	0,270	2,464	4,044	23	0,216	1,703	2,380
12	0,231	1,855	2,600	24	0,253	2,250	3,829

Tabla 13. Rugosidades medias calculadas para los ensayos realizados en fresadora Odisea con fresa de 4 mm de diámetro.

Los resultados de las rugosidades en los ensayos realizados en la fresadora Lagun L650 con la herramienta de 4 mm de diámetro se encuentran recogidos en la Tabla 14, y, obteniendo los valores medios, se obtiene la Tabla 15.

Nº ensayo	Ra (µm)	Rz (µm)	Rt (µm)	Nº ensayo	Ra (µm)	Rz (µm)	Rt (µm)
1	0,290	1,906	2,309	13	0,238	1,880	2,064
	0,297	1,983	2,358		0,246	1,765	2,285
	0,325	2,212	2,604		0,253	1,862	2,697
2	0,326	2,325	3,028	14	0,256	2,236	3,336
	0,292	2,133	2,529		0,253	1,920	3,114
	0,313	2,418	2,846		0,280	2,138	2,791
3	0,314	2,574	3,303	15	0,248	1,750	2,146
	0,339	2,474	2,749		0,232	1,859	2,702
	0,352	2,521	3,236		0,250	1,844	2,550
4	0,296	2,359	3,132	16	0,277	2,028	2,768
	0,286	1,964	2,769		0,290	2,179	2,607
	0,294	2,275	2,728		0,299	2,119	2,418
5	0,338	2,478	3,146	17	0,316	2,365	2,991
	0,317	2,178	2,445		0,300	2,297	2,957
	0,323	2,273	2,655		0,286	2,148	2,764
6	0,358	2,695	3,888	18	0,298	2,127	2,560
	0,358	2,593	3,711		0,315	2,390	3,119
	0,336	2,311	2,863		0,336	2,355	2,701
7	0,272	2,023	2,681	19	0,317	2,584	3,352
	0,266	2,094	2,652		0,293	2,299	2,649
	0,273	2,098	2,575		0,321	2,491	2,829
8	0,296	2,338	2,725	20	0,335	2,691	3,091
	0,336	2,547	3,029		0,345	2,873	4,465
	0,342	2,704	3,944		0,356	2,889	3,822
9	0,308	2,301	3,097	21	0,272	2,064	2,471
	0,261	2,004	2,497		0,264	2,292	3,175
	0,270	1,932	2,327		0,286	2,268	2,890
10	0,366	2,355	2,733	22	0,282	2,199	2,453
	0,338	2,498	3,292		0,287	2,096	2,657
	0,345	2,158	2,592		0,277	2,199	3,358
11	0,319	2,167	2,504	23	0,326	2,401	2,997
	0,324	2,358	2,762		0,308	2,440	3,172
	0,312	2,309	2,801		0,325	2,509	2,725
12	0,264	2,189	3,212	24	0,326	2,700	3,370
	0,266	2,006	2,267		0,346	2,686	3,506
	0,264	1,975	2,539		0,331	2,455	2,989

Tabla 14. Rugosidades obtenidas en los ensayos realizados en fresadora Lagun L650 con fresa de 4 mm de diámetro.

Nº ensayo	Ra media (µm)	Rz media (µm)	Rt media (µm)	Nº ensayo	Ra media (µm)	Rz media (µm)	Rt media (µm)
1	0,304	2,034	2,424	13	0,246	1,836	2,349
2	0,310	2,292	2,801	14	0,263	2,098	3,080
3	0,335	2,523	3,096	15	0,243	1,818	2,466
4	0,292	2,199	2,876	16	0,289	2,109	2,598
5	0,326	2,310	2,749	17	0,301	2,270	2,904
6	0,351	2,533	3,487	18	0,316	2,291	2,793
7	0,270	2,072	2,636	19	0,310	2,458	2,943
8	0,325	2,530	3,233	20	0,345	2,818	3,793
9	0,280	2,079	2,640	21	0,274	2,208	2,845
10	0,350	2,337	2,872	22	0,282	2,165	2,823
11	0,318	2,278	2,689	23	0,320	2,450	2,965
12	0,265	2,057	2,673	24	0,334	2,614	3,288

Tabla 15. Rugosidades medias calculadas para los ensayos realizados en fresadora Lagun L650 con fresa de 4 mm de diámetro.

La Tabla 16 recoge los valores de rugosidad de todos los ensayos realizados en la máquina-herramienta Lagun L650 con la fresa de 2,5 mm de diámetro y la Tabla 17 recoge los valores medios de rugosidad en cada ensayo.

Nº ensayo	Ra (µm)	Rz (µm)	Rt (µm)	Nº ensayo	Ra (µm)	Rz (µm)	Rt (µm)
1	0,307	2,407	2,897	13	0,323	2,879	4,088
	0,324	2,731	3,510		0,542	5,148	9,333
	0,328	2,661	3,137		0,582	5,116	9,867
2	0,291	2,394	3,894	14	0,364	3,082	4,259
	0,296	2,441	3,56		0,290	2,521	3,978
	0,269	2,499	3,391		0,305	2,722	3,973
3	0,294	2,424	2,802	15	0,255	2,076	2,413
	0,331	2,566	3,214		0,283	2,227	2,822
	0,444	3,146	4,350		0,259	2,075	2,405
4	0,309	2,455	3,495	16	0,301	3,100	4,830
	0,328	2,594	3,112		0,405	3,665	4,485
	0,323	2,724	3,165		0,309	2,636	3,577
5	0,242	2,276	2,962	17	0,288	2,168	2,519
	0,310	2,190	2,501		0,304	2,258	3,050
	0,294	2,321	2,471		0,278	2,028	2,382
6	0,274	2,134	2,686	18	0,267	1,958	2,402
	0,247	1,969	2,729		0,310	2,205	2,468
	0,246	2,034	2,334		0,282	2,132	2,399
7	0,284	2,573	3,120	19	0,256	1,976	2,241
	0,266	2,406	3,125		0,247	2,031	2,650
	0,257	1,994	2,233		0,272	2,133	2,905
8	0,284	2,487	3,188	20	0,281	2,134	2,733
	0,251	1,972	2,603		0,274	2,267	3,188
	0,278	2,261	2,924		0,283	2,512	3,531
9	0,268	1,946	2,587	21	0,248	2,124	2,529
	0,247	2,269	3,728		0,247	2,071	2,994
	0,259	2,183	2,720		0,251	2,053	2,403
10	0,280	2,147	2,659	22	0,309	2,794	3,474
	0,258	2,128	2,592		0,352	3,029	4,948
	0,257	2,265	2,766		0,508	4,433	7,516
11	0,268	2,156	2,478	23	0,246	1,984	2,481
	0,274	2,294	2,897		0,251	2,224	3,398
	0,265	2,007	2,409		0,291	2,555	3,525
12	0,299	2,201	2,545	24	0,292	2,426	2,878
	0,268	2,055	2,515		0,277	2,158	2,757
	0,262	2,100	2,516		0,275	2,406	3,249

Tabla 16. Rugosidades obtenidas en los ensayos realizados en fresadora Lagun L650 con fresa de 2,5 mm de diámetro.

Nº ensayo	Ra media (µm)	Rz media (µm)	Rt media (µm)	Nº ensayo	Ra media (µm)	Rz media (µm)	Rt media (µm)
1	0,320	2,600	3,181	13	0,482	4,381	7,763
2	0,285	2,445	3,615	14	0,320	2,775	4,070
3	0,356	2,712	3,455	15	0,266	2,126	2,547
4	0,320	2,591	3,257	16	0,338	3,134	4,297
5	0,282	2,262	2,645	17	0,290	2,151	2,650
6	0,256	2,046	2,583	18	0,286	2,098	2,423
7	0,269	2,324	2,826	19	0,258	2,047	2,599
8	0,271	2,240	2,905	20	0,279	2,304	3,151
9	0,258	2,133	3,012	21	0,249	2,083	2,642
10	0,265	2,180	2,672	22	0,390	3,419	5,313
11	0,269	2,152	2,595	23	0,263	2,254	3,135
12	0,276	2,119	2,525	24	0,281	2,330	2,961

Tabla 17. Rugosidades medias calculadas para los ensayos realizados en fresadora Lagun L650 con fresa de 2,5 mm de diámetro.

Los valores medios de cada uno de los ensayos serán los posteriormente utilizados para realizar el análisis estadístico, de cara a estudiar la influencia de los distintos parámetros del proceso de mecanizado en las variables de estudio. Por otro lado, hay ciertos ensayos, como puede ser el ensayo número 13 realizado en Lagun

L650 con herramienta de 2,5 mm de diámetro, en los que se podía apreciar a simple vista defectos en el mecanizado, con marcas visibles de “sobremecanizado” o pequeñas rayas realizadas por la fresa durante el mecanizado.

6.1.2. Análisis de resultados

Para hacer el análisis de los resultados obtenidos se utilizó el programa informático R para programar los ANOVAs (del inglés *Analysis of Variance*) necesarios para obtener qué variables de las estudiadas son las más influyentes en los procesos de micromecanizado ensayados. Con dichos ANOVAs se puede estudiar la influencia por separado del avance, profundidad y trayectoria para todas las rugosidades estudiadas, además de estudiarlas conjuntamente para ver la influencia de las combinaciones simples entre dos variables. Los resultados obtenidos se presentan entre la Tabla 18 y la 29.

Factores principales e interacciones					
Factor	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
<i>f</i>	3	0,0059238	0,00197460	14,3361	0,003825**
<i>t</i>	1	0,0000510	0,00005104	0,3706	0,565010
<i>p</i>	2	0,0003911	0,00019554	1,4197	0,312745
<i>f:t</i>	3	0,0003825	0,00012749	0,9256	0,483634
<i>t:p</i>	2	0,0000016	0,00000079	0,0057	0,994274
<i>f:p</i>	6	0,0030676	0,00051126	3,7119	0,067742.
Res	6	0,0008264	0,00013774		

Tabla 18. Resultados ANOVA Ra fresa 4 mm en Odisea.

Factores principales e interacciones					
Factor	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
<i>f</i>	3	0,28094	0,093646	2,0199	0,21269
<i>t</i>	1	0,07031	0,070308	1,5166	0,26422
<i>p</i>	2	0,03622	0,018110	0,3906	0,69267
<i>f:t</i>	3	0,05109	0,017030	0,3673	0,77962
<i>t:p</i>	2	0,02081	0,010404	0,2244	0,80540
<i>f:p</i>	6	1,02371	0,170619	3,6803	0,06895
Res	6	0,27816	0,046361		

Tabla 19. Resultados ANOVA Rz fresa 4 mm en Odisea.

Factores principales e interacciones					
Factor	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
<i>f</i>	3	0,4548	0,15160	0,1848	0,9030
<i>t</i>	1	1,3263	1,32634	1,6167	0,2506
<i>p</i>	2	0,0690	0,03452	0,0421	0,9591
<i>f:t</i>	3	0,9912	0,33038	0,4027	0,7566
<i>t:p</i>	2	0,2864	0,14318	0,1745	0,8440
<i>f:p</i>	6	4,9811	0,83019	1,0119	0,4944
Res	6	4,9223	0,82039		

Tabla 20. Resultados ANOVA Rt fresa 4 mm en Odisea.

El criterio de significación empleado en el presente TFG es que el p-valor (Pr) sea inferior a 0,05, de manera que el parámetro es más significativo cuanto más próximo está el valor de $Pr(>F)$ (el p-valor) a 0. Adicionalmente, para todos los ANOVAs realizados se comprueba la normalidad de los residuos mediante el test de Shapiro-Wilk, concluyendo que no existe evidencia de ausencia de normalidad ($p < W$). En este caso, los resultados se muestran en la Tabla 21.

ANOVA	W	p-valor
<i>Ra</i>	0,941	0,173
<i>Rz</i>	0,925	0,077
<i>Rt</i>	0,863	0,004

Tabla 21. Comprobación normalidad de ANOVAs de fresa 4 mm en fresadora Odisea.

Para estos ensayos el factor con mayor nivel de significación sobre la rugosidad media *Ra*, que va a ser sobre la que se haga más hincapié en el total de los ensayos, se trata del avance *f*. Por otro lado, ni la profundidad ni la trayectoria tienen influencia sobre *Ra*, *Rz* y *Rt* al estudiarlas de forma aislada. Sin embargo, al analizar los efectos combinados de dichas variables, se puede apreciar que la combinación de avance y profundidad sí es relativamente determinante sobre las rugosidades *Ra* y *Rz*.

Por otra parte, al analizar los ANOVAs para *Rz* y *Rt* se puede observar que en estas variables el avance no es significativo. Por lo tanto, se trata de un resultado que no concuerda con lo obtenido para *Ra*.

Por otro lado, se ve que la trayectoria en esta serie de ensayos realizados en la fresadora Odisea no es un factor a tener en cuenta sobre la rugosidad obtenida con el criterio de significación empleado, pero la profundidad de pasada sí es relevante, si bien mucho menos que el avance, puesto que la combinación de los dos factores es de cierta importancia en el acabado obtenido.

Factores principales e interacciones					
Factor	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
<i>f</i>	3	0,0051421	0,0017140	2,3353	0,17330
<i>t</i>	1	0,0000184	0,0000184	0,0250	0,87947
<i>p</i>	2	0,0073081	0,0036540	4,9785	0,05316
<i>f:t</i>	3	0,0008771	0,0002924	0,3984	0,75938
<i>t:p</i>	2	0,0000902	0,0000451	0,0615	0,94095
<i>f:p</i>	6	0,0053093	0,0008849	1,2056	0,41311
Res	6	0,0044038	0,0007340		

Tabla 22. Resultados ANOVA *Ra* fresa 4 mm en Lagun L650.

Factores principales e interacciones					
Factor	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
<i>f</i>	3	0,25287	0,084289	2,8295	0,12878
<i>t</i>	1	0,00901	0,009009	0,3024	0,60221
<i>p</i>	2	0,41918	0,209588	7,0357	0,02671*
<i>f:t</i>	3	0,09876	0,032919	1,1051	0,41740
<i>t:p</i>	2	0,11051	0,055256	1,8549	0,23595
<i>f:p</i>	6	0,26958	0,044930	1,5083	0,31516
Res	6	0,17873	0,029789		

Tabla 23. Resultados ANOVA *Rz* fresa 4 mm en Lagun L650.

Factores principales e interacciones					
Factor	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
<i>f</i>	3	0,78898	0,262993	6,9976	0,02192*
<i>t</i>	1	0,11111	0,111112	2,9564	0,13633
<i>p</i>	2	0,37462	0,187312	4,9839	0,05305.
<i>f:t</i>	3	0,36350	0,121168	3,2240	0,10351
<i>t:p</i>	2	0,23950	0,119750	3,1863	0,11405
<i>f:p</i>	6	0,46072	0,076786	2,0431	0,20293
Res	6	0,22550	0,037583		

Tabla 24. Resultados ANOVA *Rt* fresa 4 mm en Lagun L650.

De nuevo se vuelve a estudiar la normalidad mediante el test de Shapiro-Wilk, concluyendo que no existe evidencia de ausencia de normalidad ($p < W$).

ANOVA	W	p-valor
<i>Ra</i>	0,940	0,163
<i>Rz</i>	0,850	0,002
<i>Rt</i>	0,868	0,005

Tabla 25. Comprobación normalidad de ANOVAs de fresa 4 mm en fresadora Lagun.

En este caso, los resultados obtenidos de los ANOVAs indican que el avance es influyente en *Rt* pero no en *Rz* y siendo menos influyente que la profundidad de pasada en *Ra*. Por otro lado, dicha profundidad de pasada también es significativa en *Rz*, pero no en *Rt*. Esta disparidad en los resultados puede deberse a muchos factores como pequeñas vibraciones causadas por el propio mecanizado, por los efectos del “size effect” o del “run out”, que no se pueden cuantificar en este caso al no disponer de las herramientas necesarias para su medición. Sin embargo, analizando la influencia del avance sobre las tres rugosidades, se observa que en dos de ellas sí que es significativo y en la tercera está muy cerca de serlo. Además, estas diferencias con respecto al primer ensayo pueden ser el resultado del hecho de haber mecanizado todas las ranuras en este caso mediante el mismo programa, habiendo perdido ligeramente la linealidad del ensayo.

Por otro lado, la profundidad en este caso se muestra especialmente determinante sobre el acabado superficial obtenido, siendo significativa tanto para el valor obtenido de R_a como de R_z , cosa que no ocurría de la misma manera en el caso de los ensayos realizados en la fresadora Odisea. Ciertamente, se trata de unos resultados que, en comparación con los obtenidos para el avance, son bastante parecidos (aunque la profundidad de pasada salga más determinante), aunque la diferencia existente con respecto al primer ensayo puede haber sido esa mayor pérdida de linealidad con respecto al realizado en la fresadora Odisea.

Comparando los ensayos realizados en la fresadora Lagun L650 empleando la herramienta de 4 mm de diámetro con los realizados en la fresadora Odisea, se puede observar que en ambos la trayectoria seguida durante el mecanizado se trata de un factor no influyente sobre los resultados obtenidos.

Factores principales e interacciones					
Factor	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
f	3	0,0233621	0,0077874	6,4100	0,02666*
t	1	0,0003920	0,0003920	0,3227	0,59060
p	2	0,0181881	0,0090940	7,4856	0,02342*
$f:t$	3	0,0018601	0,0006200	0,5104	0,68968
$t:p$	2	0,0006231	0,0003115	0,2564	0,78187
$f:p$	6	0,0118802	0,0019800	1,6298	0,28391
Res	6	0,0072892	0,0012149		

Tabla 26. Resultados ANOVA R_a fresa 2,5 mm en Lagun L650.

Factores principales e interacciones					
Factor	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
f	3	2,25133	0,75044	6,0607	0,03013*
t	1	0,00180	0,00180	0,0146	0,90790
p	2	1,89194	0,94597	7,6398	0,02242*
$f:t$	3	0,16788	0,05596	0,4519	0,72533
$t:p$	2	0,20062	0,10031	0,8101	0,48814
$f:p$	6	1,41509	0,23585	1,9048	0,22633
Res	6	0,74293	0,12382		

Tabla 27. Resultados ANOVA R_z fresa 2,5 mm en Lagun L650.

Factores principales e interacciones					
Factor	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
f	3	10,6815	3,5605	5,6168	0,03547*
t	1	0,0004	0,0004	0,0006	0,98155
p	2	6,0874	3,0437	4,8015	0,05686.
$f:t$	3	0,5045	0,1682	0,2653	0,84826
$t:p$	2	1,3736	0,6868	1,0835	0,39653
$f:p$	6	8,9861	1,4977	2,3626	0,15964
Res	6	3,8034	0,6339		

Tabla 28. Resultados ANOVA R_t fresa 2,5 mm en Lagun L650.

Los códigos de significación se repiten con respecto a los indicados en los ANOVAs anteriores. Al estudiar la normalidad mediante el test de Shapiro-Wilk, se puede observar que no hay evidencias de que en este ensayo no haya normalidad ($p < W$).

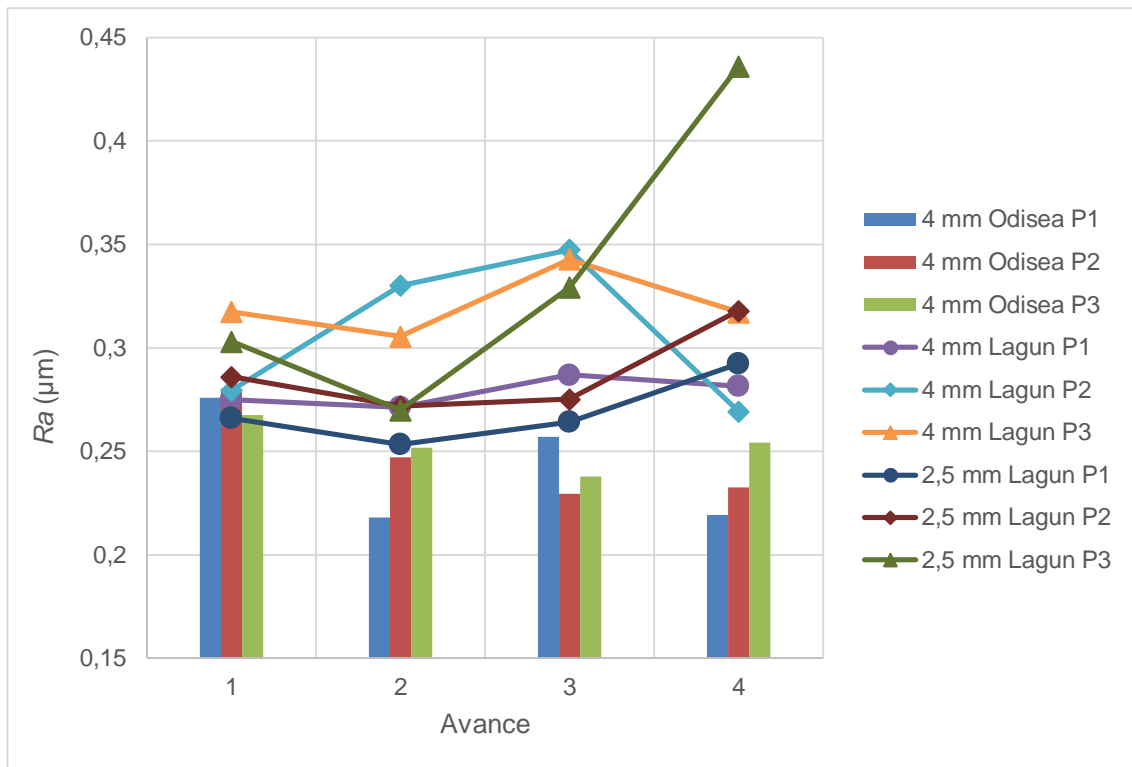
ANOVA	W	p-valor
<i>Ra</i>	0,876	0,007
<i>Rz</i>	0,910	0,035
<i>Rt</i>	0,881	0,009

Tabla 29. Comprobación normalidad de ANOVAs de fresa 2,5 mm en fresadora Lagun.

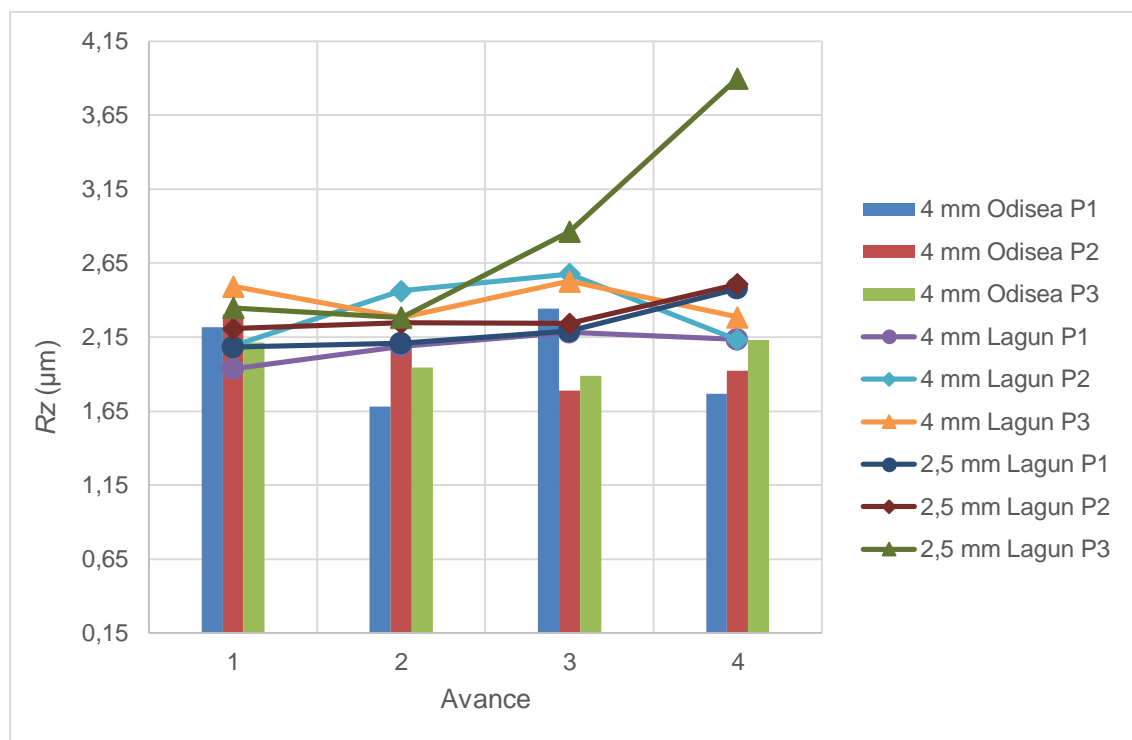
En este ensayo con herramienta de 2,5 mm se puede observar que, de nuevo, los parámetros más influyentes son el avance y la profundidad de pasada. Así, el avance es más influyente en la rugosidad media *Ra* y en *Rt*, mientras que la profundidad de pasada tiene mayor importancia en el valor de *Rz*. Sin embargo, este ensayo arroja unos valores similares a los dos anteriores, si bien en el ANOVA realizado para la determinación de *Ra* se puede ver que para una herramienta de 2,5 mm es muy importante tanto la profundidad de pasada como el avance seleccionados, por lo que, si se busca un acabado superficial óptimo, habrá que limitar dichos valores de velocidad de avance y profundidad de mecanizado, influyendo sobre todo en los tiempos de mecanizado obtenidos.

Por último, se puede afirmar que la trayectoria de la pasada de mecanizado realizada no es significativa, de igual manera a como ocurría en los dos primeros grupos de ensayos realizados, por lo que se puede afirmar que es un factor no significativo en los resultados del micromecanizado en lo que corresponde a acabados superficiales.

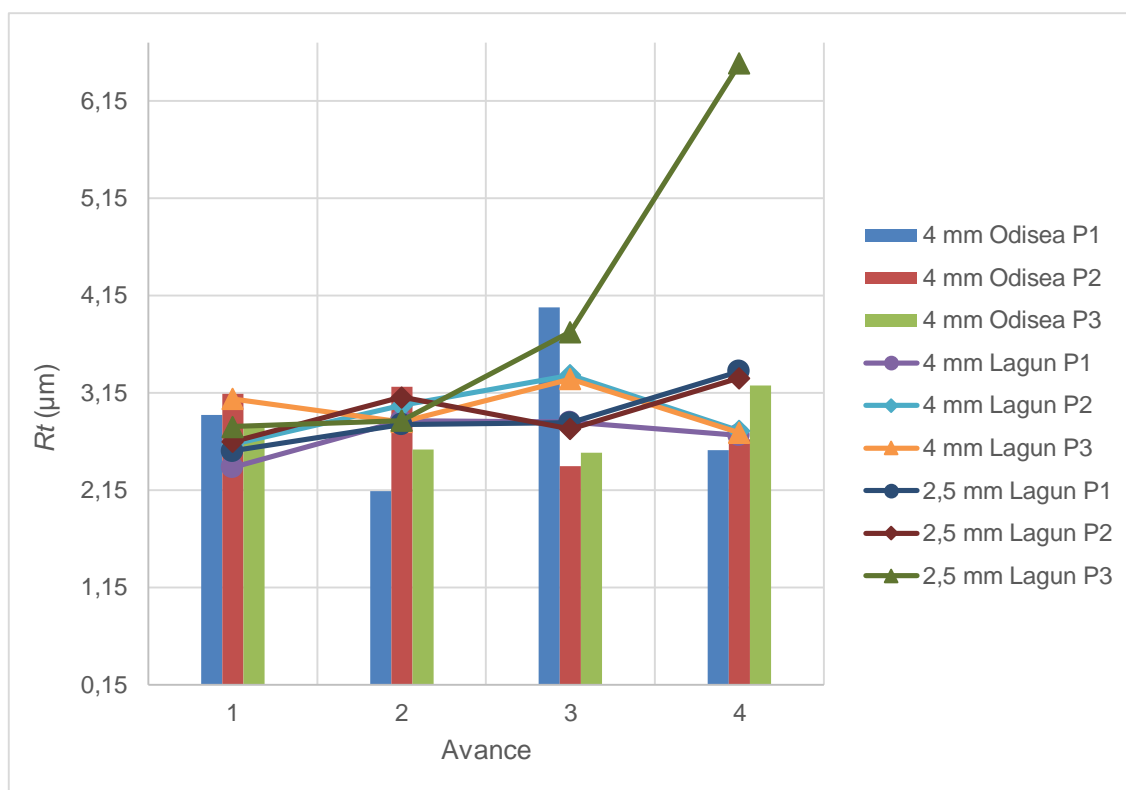
Una vez analizada la influencia o no de cada una de las tres variables de avance, trayectoria y profundidad para cada uno de los ensayos realizados con las tres herramientas, se pueden obtener las Gráficas 1, 2 y 3, que relacionan el acabado superficial obtenido con el diámetro de la herramienta y los diferentes avances, profundidades, y fresadoras empleadas (se omitirá aquí el parámetro de trayectoria puesto que se ha podido observar que no es significativo):



Gráfica 1. Comparación de R_a con respecto al avance para cada fresadora, p y h .



Gráfica 2. Comparación de R_z con respecto al avance para cada fresadora, p y h .



Gráfica 3. Comparación de R_t con respecto al avance para cada fresadora, p y h .

Si se analizan esas Gráficas 1, 2 y 3 se puede ver como hay una tendencia a obtener un peor acabado del mecanizado al aumentar el avance por diente, como era de suponer por los estudios realizados anteriormente. En efecto, se observa que en el caso de las herramientas de 4 mm el comportamiento del mecanizado es algo más estable, cosa que se puede achacar al hecho de que el “*size effect*” es tan acusado que la rugosidad resultante no depende de la misma manera del valor de avance como ocurriría en un proceso de mecanizado convencional, sino que este parámetro, aun siendo significativo, pierde su predominancia sobre los resultados obtenidos. Sin embargo, al utilizar la fresa de 2,5 mm, el proceso de micromecanizado realizado se comporta de forma diferente, viendo como sí que hay una tendencia a aumentar la rugosidad superficial al aumentar el avance por diente, por lo que se puede afirmar que, si se aumenta la velocidad de avance, se produce una disminución de la calidad del acabado superficial, siempre que se mantenga la misma herramienta y cuando el espesor de la viruta no deformada sea suficientemente pequeño en comparación con el radio de punta de la herramienta, de cara a eliminar el efecto del “*size effect*”, acercándose el proceso más al mecanizado a macroescala.

Por otro lado, si se estudian los resultados obtenidos atendiendo a la profundidad de pasada, de nuevo se pueden observar resultados parecidos: en los ensayos realizados con las fresas de 4 mm de diámetro hay cierta disparidad en los resultados obtenidos, teniendo en cuenta que el resultado esperado sería que la rugosidad superficial aumentase al aumentar la profundidad de pasada, cosa que sí que ocurre en el caso de la fresa de 2,5 mm empleada en la fresadora Lagun L650, debido a que en este caso el proceso se aproxima en mayor medida al mecanizado convencional al producirse mayor corte y menor rozamiento, y eliminando en parte el “*size effect*”.

Si se analizan los resultados de los ensayos hechos tanto en la fresadora Odisea, como en la fresadora Lagun L650, ambos con las herramientas de 4 mm de diámetro, y con unos valores de avance y profundidad de pasada similares sobre las gráficas presentadas anteriormente, se puede observar que los valores de R_a y de R_z obtenidos en los ensayos realizados en la fresadora Odisea son, por lo general, menores que los que se midieron para los ensayos hechos en la fresadora Lagun L650. De hecho, los valores de R_a y R_z obtenidos en la fresadora Lagun L650 son, de media, un 17,34 y un 10,10% superiores a los obtenidos en la máquina Odisea. Este hecho puede chocar en un primer momento, puesto que la máquina-herramienta Odisea se supone para uso educacional, mientras que la Lagun L650 se trata de una máquina más empleada para la industria, más pesada y de tamaño mucho mayor. Sin embargo, existe un por qué, y es que el hecho de que las dimensiones de la máquina-herramienta Lagun L650 sean mayores produce una mayor cantidad de vibraciones en la herramienta por el hecho de encontrarse el husillo mucho más alejado de la zona donde éste se sujeta, por lo que al girar se pueden producir pequeñas vibraciones provocadas por minúsculas variaciones en la uniformidad de la masa del husillo, ya que al estar éste tan extraído en su punta (y por ende, en la herramienta) esas pequeñas vibraciones afectarían en mayor medida. De hecho, las máquinas específicas para micromecanizado suelen ser máquinas de pequeño tamaño, lo que concuerda con este resultado obtenido. Por su parte, en los valores de R_t hay una gran disparidad por lo que no son comparables.

Si ahora lo que se realiza es la comparación entre los dos ensayos realizados con la fresadora Lagun L650, se puede observar que los resultados obtenidos con la herramienta de 2,5 mm son mejores, exceptuando los ensayos realizados a alta

profundidad. Se trata de un resultado esperado ya que en ese caso el filo de herramienta es menor y el proceso se hace más estable a bajas cargas como se produciría con profundidades de pasada menores; sin embargo, a alta carga (profundidad grande) la fresa de 2,5 mm tendería a flectar y vibrar más que la de 4 mm por su menor rigidez, por lo que se obtienen peores resultados de acabado superficial.

En las tablas anteriormente presentadas acerca de la rugosidad superficial se presentan una serie de valores que se encuentran muy alejados de otros valores “normales” medidos en el resto de ranuras, y, en algún caso, en la misma ranura. Esto se debe a pequeños fallos que se producen durante el propio mecanizado, de forma que se crea una pequeña imperfección, que puede ser perfectamente resultado de una viruta adherida a la herramienta, o a una cierta vibración producida durante un instante de tiempo muy pequeño (algo que es habitual cuando se trabaja a velocidad de avance muy lenta y a bajas cargas).

Según lo anterior, se tomaron las Imágenes 30, 31, 32, 33, 34 y 35 de algunas ranuras, tanto curvas como rectas, de los ensayos realizados mediante las dos fresadoras utilizadas y para cada una de las herramientas, para poder apreciar las diferencias en los resultados del mecanizado.

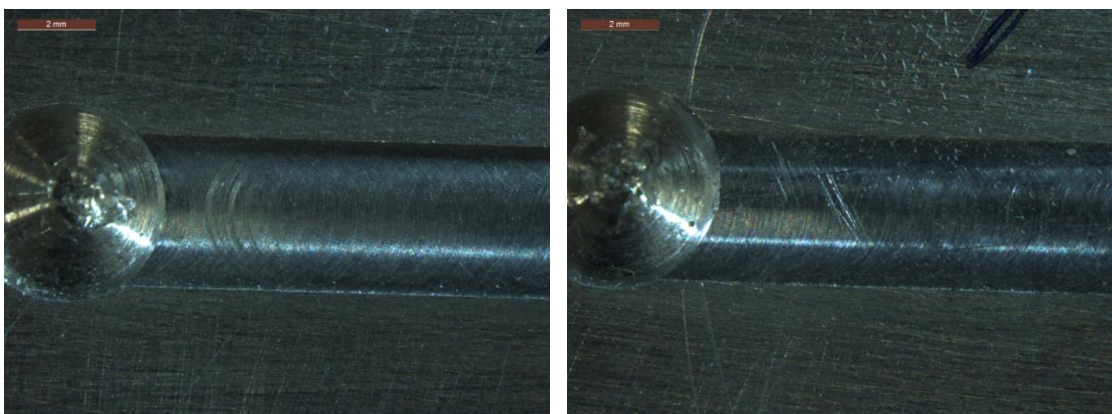


Imagen 30. Ranuras rectas mecanizadas en fresadora Odisea con fresa de 4 mm de diámetro. Izquierda: ranura sin defectos (ensayo 2). Derecha: ranura con defectos (ensayo 4).

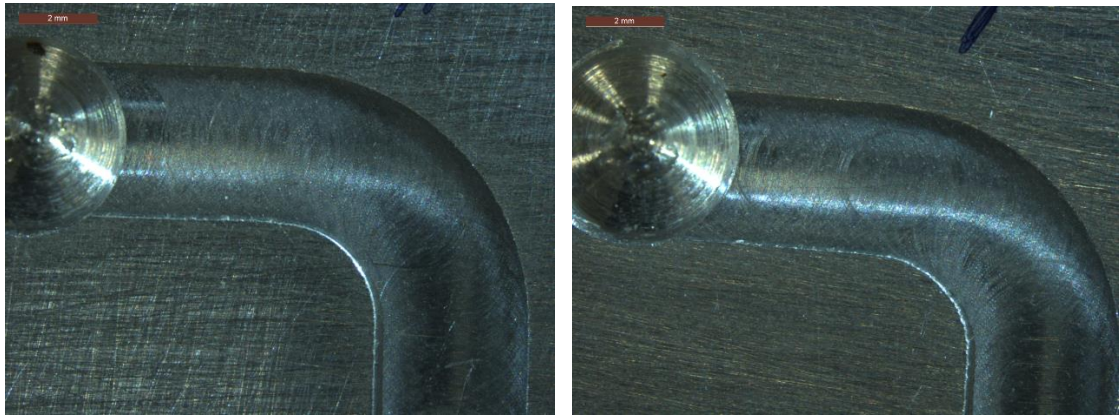


Imagen 31. Ranuras curvas mecanizadas en fresadora Odisea con fresa de 4 mm de diámetro. Izquierda: ranura sin defectos (ensayo 17). Derecha: ranura con defectos (ensayo 8).

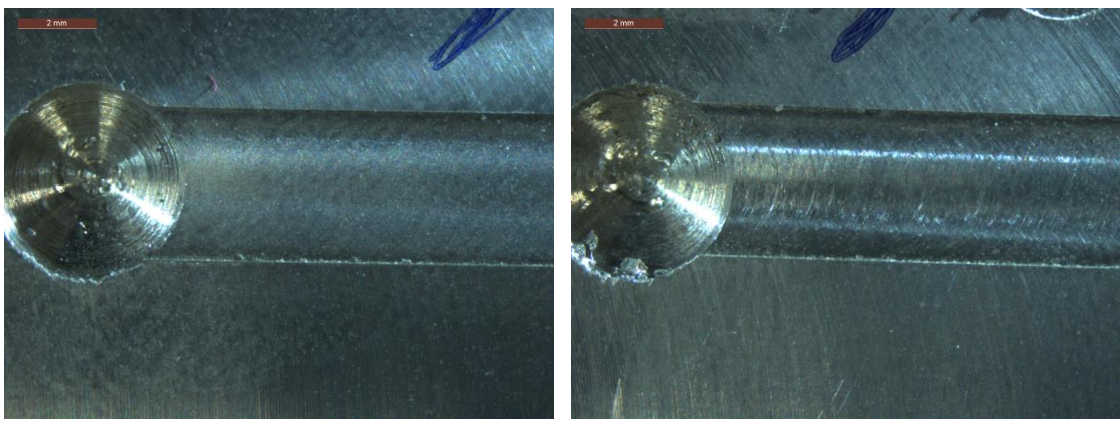


Imagen 32. Ranuras rectas mecanizadas en fresadora Lagun L650 con fresa de 4 mm de diámetro. Izquierda: ranura sin defectos (ensayo 1). Derecha: ranura con defectos (ensayo 7).

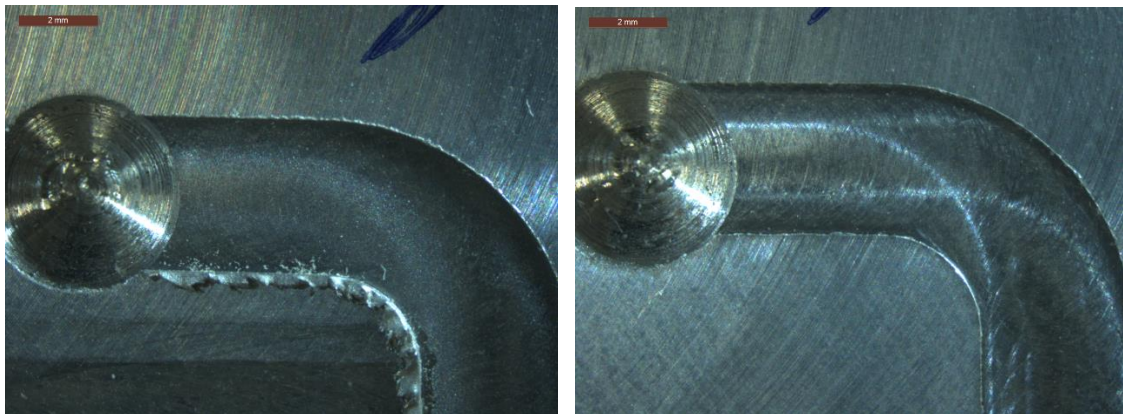


Imagen 33. Ranuras curvas mecanizadas en fresadora Lagun L650 con fresa de 4 mm de diámetro. Izquierda: ranura sin defectos (ensayo 8). Derecha: ranura con defectos (ensayo 23).

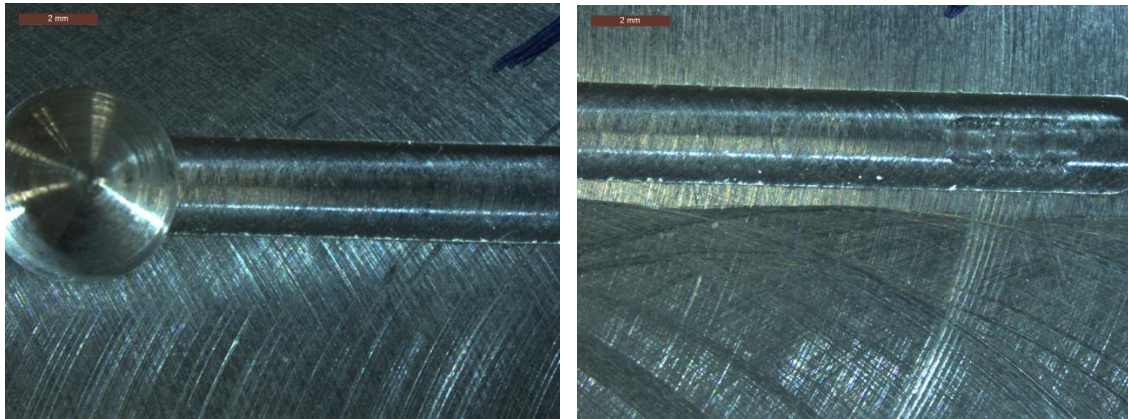


Imagen 34. Ranuras rectas mecanizadas en fresadora Lagun L650 con fresa de 2,5 mm de diámetro. Izquierda: ranura sin defectos (ensayo 5). Derecha: ranura con defectos (ensayo 8).

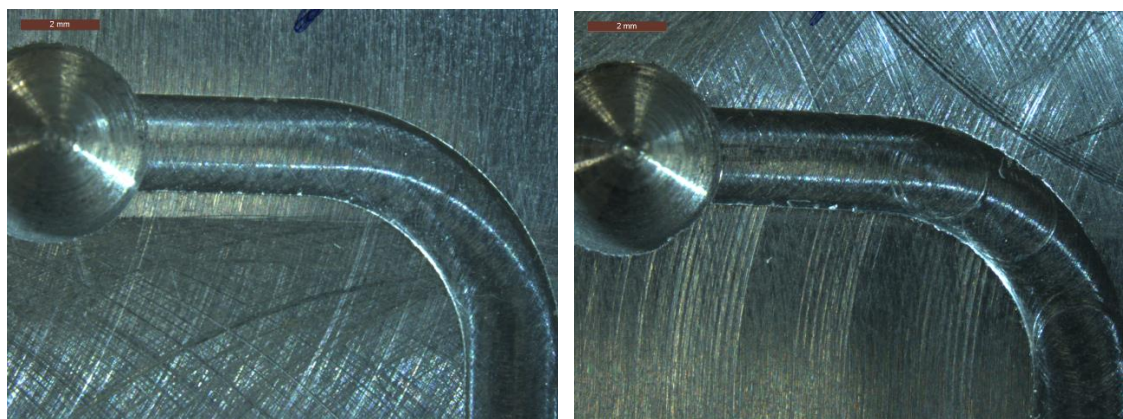


Imagen 35. Ranuras curvas mecanizadas en fresadora Lagun L650 con fresa de 2,5 mm de diámetro. Izquierda: ranura sin defectos (ensayo 9). Derecha: ranura con defectos (ensayo 13).

En las Imágenes 30, 31, 32, 33, 34 y 35 se pueden apreciar pequeñas rayas producidas por la fresa durante su avance, lo que haría que se perdiera la calidad superficial requerida en los procesos. Estos “fallos” se podrían haber eliminado de los análisis realizados, pero no se ha hecho así puesto que pueden tener relación con la pérdida de estabilidad de los procesos de mecanizado, por ejemplo, al utilizar velocidades de avance grandes y profundidades grandes como, por ejemplo, en el ensayo 13 realizado en la fresadora Lagun L650 con la herramienta de 2,5 mm de diámetro (cuya ranura está presentada en la Imagen 35 derecha). Por lo tanto, es importante tener en cuenta que este tipo de fallos se pueden dar con determinadas combinaciones de parámetros de corte en las operaciones de micromecanizado, como ya se ha visto. Dichos defectos, a su vez, pueden ser los causantes de que las gráficas de rugosidad frente al avance tengan ese pico tan grande para la línea de 2,5 mm Lagun $p3$, ya que con el avance $f4$ ($2 \mu\text{m}/\text{diente}$) es donde se encuentran los fallos más claros. Estos defectos de mecanizado pueden afectar a los ANOVAs realizados, pero no son eliminables puesto que es resultado del propio mecanizado analizado.

6.2. Fuerzas

6.2.1. Obtención de resultados

Para la obtención de los resultados referentes a fuerzas se empleó el dinamómetro Kistler analizado en el apartado 3.1.3., midiendo en cada ensayo los esfuerzos en las direcciones X, Y y Z, de cara a realizar un estudio de dicha fuerza respecto a los diferentes parámetros modificados durante las operaciones de mecanizado.

Durante los ensayos realizados se fijó una velocidad de adquisición de datos de 20 datos por segundo. Con dicha velocidad de adquisición de datos se obtuvieron una gran cantidad de datos, los cuáles fue necesario filtrar, empleando la transformada de Wavelet para eliminar la señal de ruido (Lauro *et al.*, 2015) con el apoyo del profesor Dr. Carlos Henrique Lauro. Los resultados fueron los contenidos en las Tablas 30, 31 y 32.

Es necesario puntualizar que para el cálculo de F_m se ha realizado como la resultante de las fuerzas en el plano XY, puesto que la fuerza en la dirección del eje Z no es indicativa de este tipo de micromecanizado e introduciría un cierto error en la medida de F_m .

Nº ensayo	F_x (N)	F_y (N)	F_z (N)	F_m (N)	Nº ensayo	F_x (N)	F_y (N)	F_z (N)	F_m (N)
1	0,410	0,610	0,680	0,734	13	0,200	0,410	1,030	0,459
2	0,680	1,040	0,530	1,245	14	0,380	0,390	1,140	0,541
3	-0,080	0,960	0,760	0,964	15	0,420	0,720	1,080	0,832
4	0,440	0,460	1,030	0,638	16	0,090	0,580	0,730	0,584
5	0,160	0,660	0,950	0,679	17	0,150	0,920	0,730	0,936
6	0,620	0,990	0,810	1,167	18	0,160	1,260	1,220	1,271
7	0,600	0,810	1,110	1,008	19	0,710	1,020	1,110	1,243
8	0,170	0,950	1,460	0,967	20	0,530	0,920	0,980	1,063
9	0,130	0,590	1,030	0,603	21	0,570	0,960	1,270	1,117
10	0,090	0,920	1,240	0,924	22	0,130	0,680	1,160	0,694
11	0,800	1,340	0,800	1,564	23	0,020	0,740	0,910	0,743
12	0,060	1,040	1,090	1,039	24	0,630	0,950	1,030	1,146

Tabla 30. Fuerzas resultantes en ensayo con fresa de 4 mm en Odisea.

Nº ensayo	F_x (N)	F_y (N)	F_z (N)	F_m (N)	Nº ensayo	F_x (N)	F_y (N)	F_z (N)	F_m (N)
1	-0,040	0,170	0,150	0,170	13	-0,310	0,450	0,180	0,546
2	-0,410	0,720	0,960	0,827	14	-0,330	0,430	-0,540	0,536
3	0,000	0,950	0,980	0,946	15	-0,310	0,470	-0,530	0,560
4	-0,300	0,390	1,150	0,491	16	0,410	0,580	-0,550	0,710
5	-0,520	0,630	1,460	0,814	17	-0,360	0,870	-0,930	0,940
6	-0,700	1,090	1,790	1,293	18	-0,540	1,380	-1,450	1,479
7	-0,430	0,610	2,070	0,749	19	-0,660	0,750	-1,130	1,000
8	-0,570	0,870	1,670	1,040	20	-0,560	0,740	-1,430	0,930
9	-0,280	0,570	1,090	0,634	21	-0,710	0,810	-1,830	1,082
10	-0,320	0,940	1,110	0,995	22	-0,430	0,410	-1,440	0,593
11	-0,800	1,450	0,830	1,659	23	-0,430	0,500	-0,470	0,665
12	-0,490	0,820	0,370	0,952	24	-0,530	0,610	-0,080	0,803

Tabla 31. Fuerzas resultantes en ensayo con fresa 4 mm en Lagun L650.

Nº ensayo	F_x (N)	F_y (N)	F_z (N)	F_m (N)	Nº ensayo	F_x (N)	F_y (N)	F_z (N)	F_m (N)
1	0,732	0,120	-0,407	0,742	13	0,710	0,133	-0,425	0,722
2	0,528	-0,043	-0,463	0,530	14	0,689	0,105	-0,420	0,697
3	-0,357	-0,202	-0,402	0,410	15	0,633	0,144	-0,433	0,649
4	0,390	-0,388	-0,452	0,550	16	0,685	0,112	-0,422	0,695
5	0,498	-0,147	-0,483	0,519	17	0,516	0,015	-0,472	0,516
6	0,365	0,021	-0,263	0,365	18	0,683	0,087	-0,417	0,688
7	0,775	0,286	-0,174	0,826	19	0,686	0,052	-0,409	0,687
8	-0,707	1,151	-0,155	1,351	20	-0,156	-0,113	-0,424	0,193
9	-0,478	0,247	-0,078	0,538	21	0,364	-0,024	-0,426	0,365
10	0,976	0,831	-0,099	1,283	22	0,299	-0,043	-0,434	0,302
11	0,629	0,097	-0,396	0,636	23	0,381	-0,015	-0,428	0,381
12	0,681	0,080	-0,416	0,686	24	0,369	-0,008	-0,430	0,369

Tabla 32. Fuerzas resultantes en ensayo con fresa de 2,5 mm en Lagun L650.

6.2.2. Análisis de resultados

Los resultados de fuerzas de corte se estudiaron mediante un ANOVA para determinar qué variables son más significativas sobre las fuerzas resultantes del proceso de mecanizado. Para ello, en el ANOVA se trabajó haciendo uso de la fuerza resultante en el plano XY, F_m . Los resultados obtenidos fueron los recogidos en la Tabla 33.

Factores principales e interacciones					
Factor	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
f	3	0,25165	0,08388	9,3357	0,0111888*
t	1	1,06291	0,53145	59,1479	0,0001125***
p	2	0,24705	0,24705	27,4954	0,0019317**
$f:p$	6	0,05636	0,00939	1,0455	0,4791514
$f:t$	3	0,04525	0,01508	1,6788	0,2694998
$p:t$	2	0,06004	0,03002	3,3411	0,1058914
Res	6	0,05391	0,00899		

Tabla 33. Resultados ANOVA F_m fresa 4 mm en Odisea.

Aplicando el criterio de significación empleado en los anteriores ANOVAs, se puede apreciar que para este ensayo son significativas todas las variables estudiadas: avance, profundidad de pasada y trayectoria seguida en el mecanizado. Igual ocurre al estudiar la combinación de factores. De esta manera, hay una influencia clave de todos los factores estudiados, siendo el más significativo la profundidad, por delante de la trayectoria de mecanizado y el avance. Esto puede tener su explicación en que los avances son pequeños para cada uno de los tipos de mecanizado, y en las fuerzas de corte tiene una gran influencia la energía específica de corte; existiendo una relación directa entre dicha energía de corte específica y las fuerzas del proceso de mecanizado, al aumentar la profundidad aumenta el volumen cortado, incrementándose la energía específica y por tanto también las fuerzas. Por otra parte, la trayectoria de pasada tendría también una importante influencia, por el efecto que hay en el cambio de dirección durante la operación de mecanizado.

Sin embargo, los ensayos realizados en la fresadora Lagun L650 aportan unos datos dispares con respecto al de 4 mm realizado en la fresadora Odisea como se observa en las Tablas 34 y 35.

Factores principales e interacciones					
Factor	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
<i>f</i>	3	0,46423	0,15474	14,9168	0,003451**
<i>t</i>	1	1,56558	0,78278	75,4580	5,591e-05***
<i>p</i>	2	0,00191	0,00191	0,1839	0,682980
<i>f:p</i>	6	0,25010	0,04168	4,0181	0,057368.
<i>f:t</i>	3	0,04240	0,01413	1,3623	0,340878
<i>p:t</i>	2	0,07463	0,03731	3,5969	0,094046.
Res	6	0,06224	0,01037		

Tabla 34. Resultados ANOVA *Fm* fresa 4 mm en Lagun L650.

Factores principales e interacciones					
Factor	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
<i>f</i>	3	0,09547	0,031823	1,5488	0,29624
<i>t</i>	1	0,16203	0,162033	7,8863	0,03083*
<i>p</i>	2	0,25478	0,127392	6,2003	0,03467*
<i>f:p</i>	6	0,18228	0,060759	2,9572	0,11979
<i>f:t</i>	3	0,11601	0,058005	2,8232	0,13674
<i>p:t</i>	2	0,75104	0,125173	6,0923	0,02244*
Res	6	0,12328	0,020546		

Tabla 35. Resultados ANOVA *Fm* fresa 2,5 mm en Lagun L650.

Se ha estudiado la normalidad de los ensayos mediante el test de Shapiro-Wilk, observándose que no hay evidencias de que no haya normalidad en los ensayos ($p < W$).

ANOVA	W	p-valor
Fresa 4 mm Odisea	0,952	0,301
Fresa 4 mm Lagun L650	0,971	0,699
Fresa 2,5 mm Lagun L650	0,870	0,005

Tabla 36. Comprobación normalidad de ANOVAs de fuerzas.

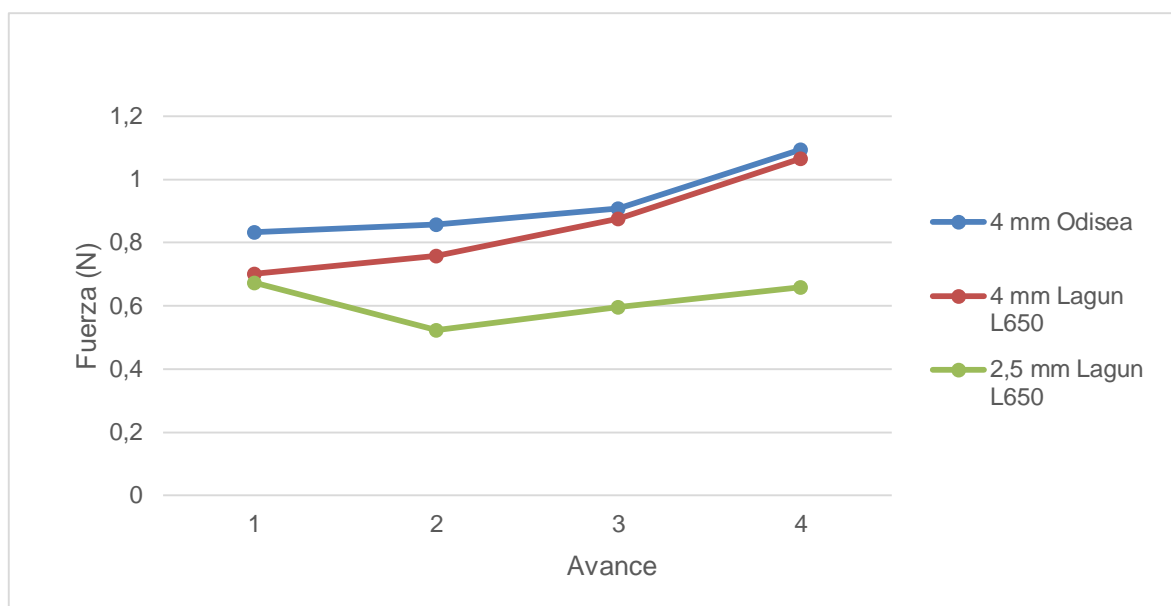
Si se analizan esos ANOVAs, se puede ver que para el ensayo hecho con la herramienta de 4 mm de diámetro realizado en la fresadora Lagun L650 se mantiene la importancia enorme de los factores de avance y, sobre todo, de profundidad de pasada. Sin embargo, no ocurre así con el parámetro de trayectoria del mecanizado, que aquí no es para nada influyente en los resultados al estudiar los factores por separado. Esta variación con respecto al ensayo de 4 mm de diámetro estudiado en la fresadora Odisea puede deberse a una pérdida de estabilidad del ensayo, por efectos como vibraciones, “*size effect*”, etc. Además, analizando la combinación de factores principales, se puede afirmar que hay una influencia en los resultados de la combinación de profundidad de pasada y trayectoria del mecanizado, por lo que no se

ha perdido, con respecto al primer ensayo analizado, toda la influencia de la trayectoria seguida en el mecanizado de la ranura.

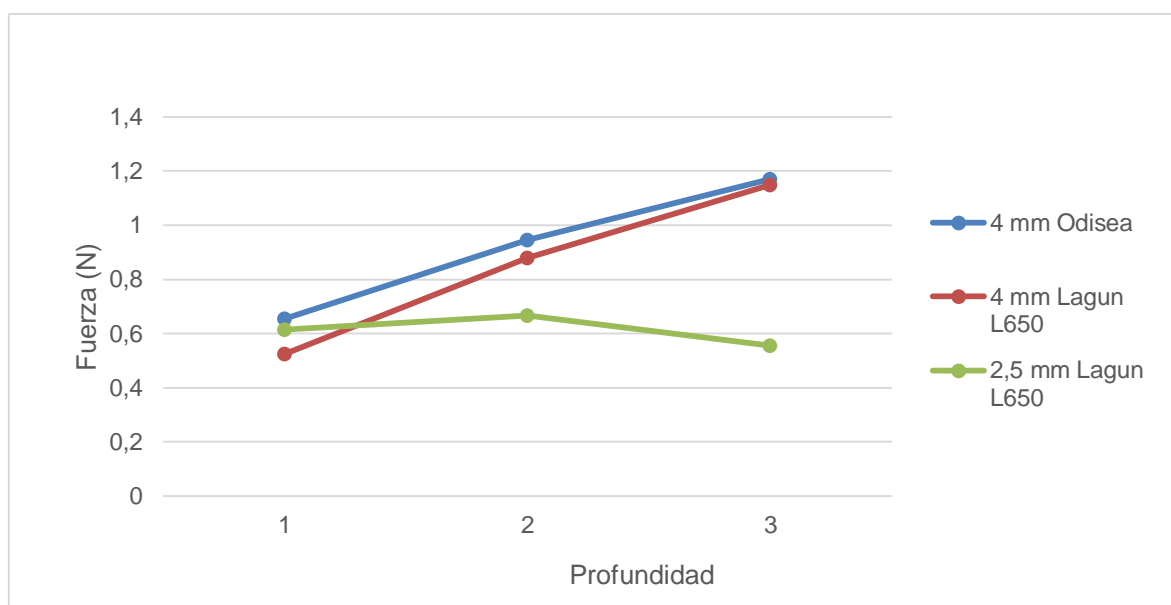
Por otra parte, en el ensayo hecho con la fresa de 2,5 mm de diámetro es en el que se encuentran unas variaciones más importantes con respecto a los dos anteriores, viendo que en los factores principales no hay ninguno de ellos que sea influyente, mientras que en la combinación de dichos factores sí que aparecen como importantes la trayectoria, profundidad y la combinación de ambas.

Con estos resultados se puede afirmar que el avance es significativo en las operaciones de mecanizado realizadas, aunque en este último ensayo de 2,5 mm se haya observado que no hay influencia de dicho factor sobre las fuerzas resultantes del proceso. De hecho, con las dos herramientas de mayor diámetro (4 mm) dicho avance no es determinante en las fuerzas de corte, pero sí en la herramienta menor (2,5 mm). Esto puede ser debido a que al utilizar herramienta de 4 mm de diámetro el “*size effect*” es mayor por existir un radio de punta de la herramienta mayor también, que hace que conforme se aumenta el avance se produzca una mayor pérdida de linealidad y estabilidad en el proceso, aumentando las vibraciones y las fuerzas. Por otro lado, una vez se reduce suficientemente el diámetro de la herramienta, y por tanto su radio de punta, se ve que solo la profundidad y la trayectoria son significativas en el proceso: la primera por la influencia que tiene sobre la energía específica de corte en el mecanizado, y la segunda por el cambio en la dirección de las fuerzas que sufre la pieza y herramienta.

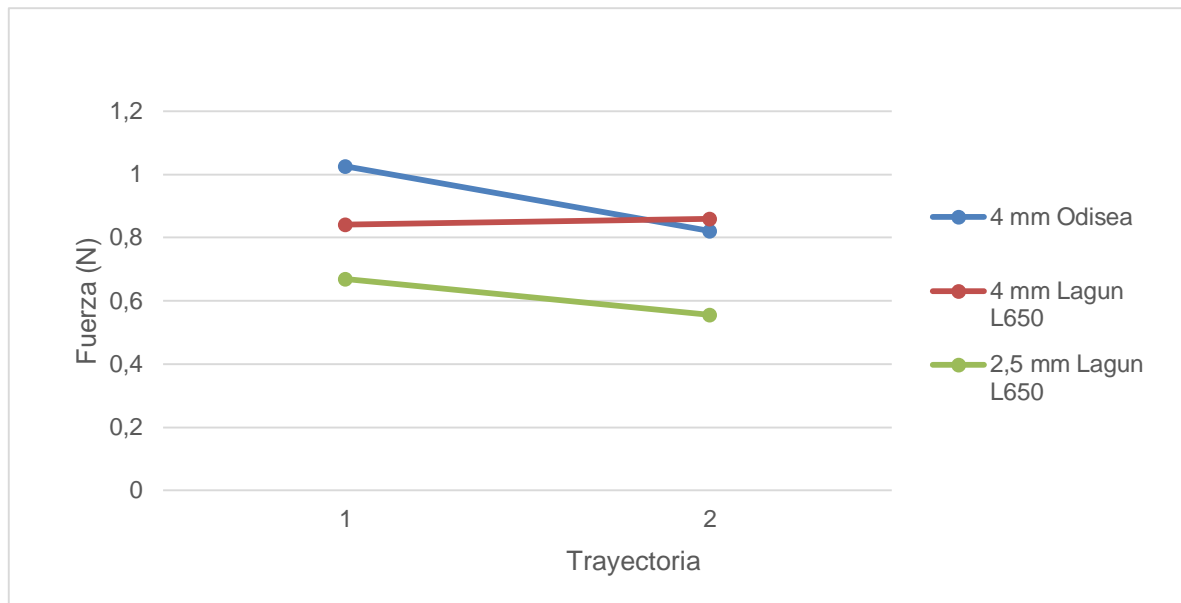
Por otra parte, se pueden obtener una serie de gráficas de la fuerza resultante respecto a los parámetros de avance, profundidad y trayectoria, se pueden obtener las Gráficas 4, 5 y 6. Para elaborar las gráficas se mantenido constante en cada serie de datos tanto la herramienta empleada como la máquina-herramienta en la que se realizaron los ensayos.



Gráfica 4. Representación fuerza resultante vs. avance.



Gráfica 5. Representación fuerza resultante vs. profundidad.



Gráfica 6. Representación fuerza resultante vs. trayectoria.

Si se analiza fuerza resultante frente al avance (Gráfica 4) se puede observar que, salvando el primer punto de la serie de 2,5 mm en Lagun L650 se produce un aumento de la fuerza resultante del proceso de mecanizado con el aumento del avance. Se trata de un resultado esperado puesto que al aumentar el avance la herramienta se desplaza más rápidamente, lo que hace que cada diente tenga que eliminar más cantidad de dicho material en la unidad de tiempo, aumentando la energía específica de corte y por lo tanto sufra un mayor esfuerzo. Además, si se atiende únicamente a las herramientas de 4 mm de diámetro se ve que en la fresadora Odisea las fuerzas son algo menores que en la fresadora Lagun L650, lo que puede ser debido a pequeñas inestabilidades en el proceso. De hecho, ambas series de datos tienen la misma tendencia al aumentar el avance. También se puede observar que, si únicamente se estudian las líneas obtenidas para los ensayos realizados en la fresadora Lagun L650, la línea de fuerza resultante en el mecanizado realizado con la fresa de 2,5 mm va por debajo de la de 4 mm, lo cual tiene sentido también debido a que se ha mecanizado una mayor cantidad de material en la unidad de tiempo por el aumento del diámetro de la herramienta, lo cual influye en la fuerza de corte al afectar a la energía específica de corte.

Si se realiza un análisis de la fuerza resultante frente a profundidad (Gráfica 5) se puede observar que dicha fuerza es directamente proporcional a la profundidad del corte cuando se emplea la herramienta de 4 mm tanto en la fresadora Odisea como

en la Lagun L650, siendo los resultados para las diferentes profundidades y la tendencia muy parecidos entre sí en ambas series, no existiendo por tanto diferenciación entre las dos máquinas-herramienta. Por otro lado, en el caso de la herramienta de 2,5 mm de diámetro empleada en la fresadora Lagun L650 se observa que la fuerza de corte no aumenta al aumentar la profundidad de la pasada de micromecanizado, sino que disminuye. Esto es debido a que cuando con esa herramienta aumentamos la profundidad de corte, el espesor de corte es lo suficientemente grande en comparación con el radio de punta de la herramienta, de manera que el “*size effect*” tiene una menor influencia en el proceso, produciéndose más estabilidad en el mecanizado, menos vibraciones y, por lo tanto, una menor fuerza que con profundidades menores en las que dicho efecto tiene mayor influencia. El mismo efecto por tanto cabría esperar en el caso de las herramientas de 4 mm de diámetro, pero, debido a que éstas tienen un radio de punta mayor, la relación entre el espesor de viruta no deformada y el radio de la punta de la herramienta no es suficientemente grande como para eliminar el efecto del “*size effect*” durante el micromecanizado, por lo que al aumentar la profundidad la herramienta se encuentra más presionada, aumentando las vibraciones por no producirse un corte “limpio”. Por otro lado, se observa que la fuerza resultante en los ensayos realizados en la fresadora Lagun L650 es menor en el caso de la herramienta de 2,5 mm a igual profundidad que la de 4 mm, por el hecho de tener menores vibraciones y una menor cantidad de material removido en la unidad de tiempo.

Por último, si se analiza la gráfica de fuerza resultante frente a trayectoria (Gráfica 6) para los ensayos realizados con fresas de 4 mm de diámetro hay una cierta disparidad en los resultados, de lo que se puede deducir que, al usar herramientas del mismo tamaño no hay una variación importante de la fuerza entre ambas máquinas-herramienta. En el caso de realizar la comparación entre los ensayos hechos en la fresadora Lagun L650 se ve que la herramienta de 2,5 mm de diámetro de nuevo sufre una fuerza menor que la de 4 mm, efecto explicable por el mismo fenómeno que sucede en las Gráficas 4 y 5: una menor cantidad de material mecanizado en la unidad de tiempo hace que haya una menor fuerza de corte. En cuanto al cambio de trayectoria no ha habido una gran variación de la fuerza en cada uno de los ensayos, sobre todo en los ensayos hechos con fresas de 4 y 2,5 mm en la fresadora Lagun L650, aunque existe mayor diferencia en el caso del ensayo de 4 mm en la fresadora

Odisea, pero teniendo en cuenta que no se trata de una variación muy grande en el caso de esta última máquina-herramienta, siendo ésta de aproximadamente 0,2 N, lo cual puede estar producido por una pérdida de estabilidad más acusada durante el ensayo.

6.3. Adhesión de material

Durante los procesos de mecanizado se puede producir el fenómeno de adhesión de la viruta del material mecanizado al cuerpo de la herramienta, lo que puede producir adicionalmente desgaste por adhesión de dicha viruta. Por lo tanto, se trata de otra de las variables del proceso estudiado a analizar, que nos puede indicar la influencia en los procesos de micromecanizado de las herramientas empleadas, y la adhesión y desgaste que éstas sufrirán.

Para analizar dicha adhesión del material mecanizado a las herramientas empleadas durante los ensayos anteriormente comentados, se utilizó el espectrómetro de masas M4 Tornado, y se tomaron fotos de todas las herramientas usadas para el micromecanizado de las ranuras ensayadas. De esta manera, se analizaron tres zonas en cada herramienta:

- Un punto en la cara de incidencia de la herramienta.
- Un mapeado de la cara trasera a la de incidencia en cada herramienta.
- Un mapeado de la cara de desprendimiento de cada herramienta.

De esta forma se analizarían las virutas obtenidas y su adhesión o no a cada zona de la herramienta. Se obtuvieron los resultados mostrados a continuación.

6.3.1. Herramienta de 4 mm empleada en fresadora Odisea

En esta herramienta se tomaron las siguientes imágenes (Imagen 36) de las dos disposiciones en las que se llevaron a cabo las fotos: tanto vertical como horizontalmente.

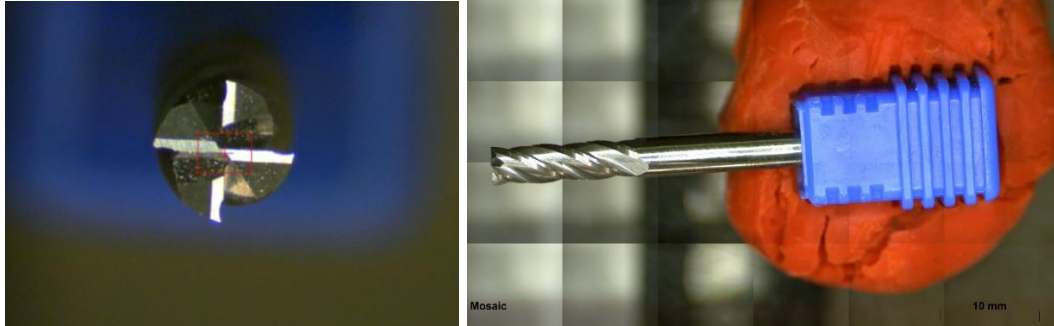


Imagen 36. Fresa de 4 mm empleada en fresadora Odisea. Izquierda: posición vertical. Derecha: posición horizontal.

Dicha disposición de las fresas va a ser igual en todos los análisis realizados, salvo en el caso de la de 4 mm empleada en fresadora Lagun L650 en su posición horizontal, ya que, en este caso, en lugar de utilizar plastilina para su sujeción, se utilizó espuma a la que se le cortó la forma del portaherramientas.

Las fotos de detalle de cada una de las zonas analizadas son las expuestas en las Imágenes 37 y 38.

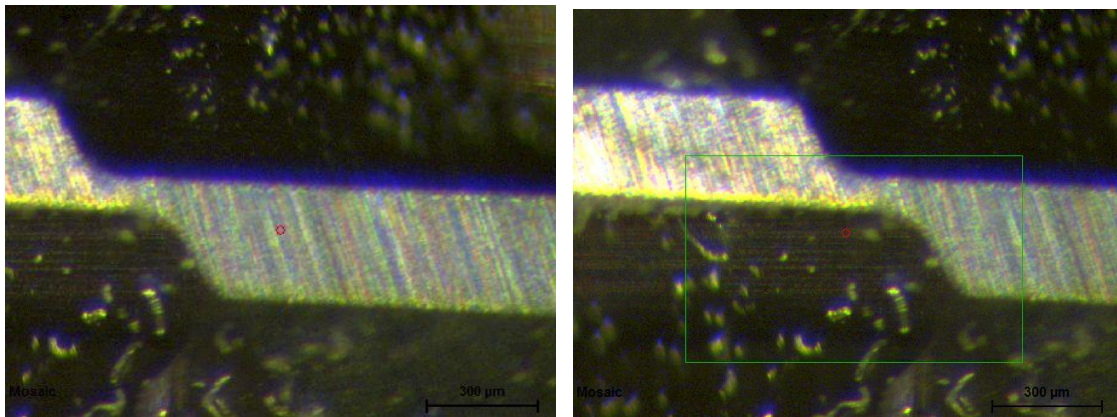


Imagen 37. Cara de incidencia (izquierda) y posterior a incidencia (derecha) analizada para fresa de 4 mm empleada en fresadora Odisea (puntos 1 y 2).

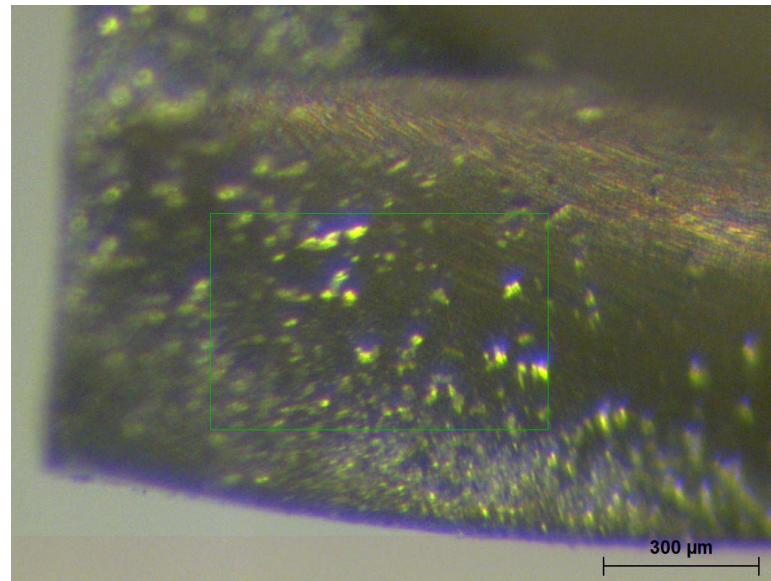


Imagen 38. Cara de desprendimiento para fresa de 4 mm empleada en fresadora Odisea (punto 3).

En dichas imágenes se puede apreciar cómo hay un fino polvo en la cara de desprendimiento de esta herramienta, mientras que en la cara de incidencia no se aprecian virutas del material mecanizado, y en la cara trasera a incidencia sí que se observan partículas de mayor tamaño que las obtenidas en la cara de incidencia. En efecto, el análisis realizado con el espectrómetro de masas Tornado M4 aportó los resultados mostrados en las Imágenes 39 y 40 y en la Tabla 37.

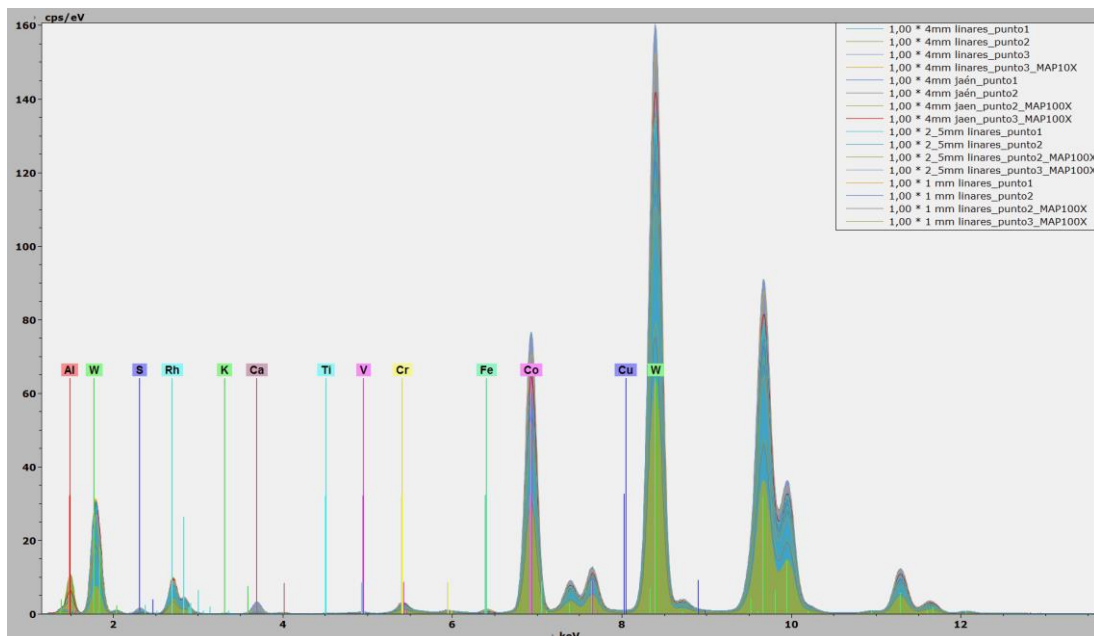


Imagen 39. Imagen del espectro total obtenido en los ensayos.

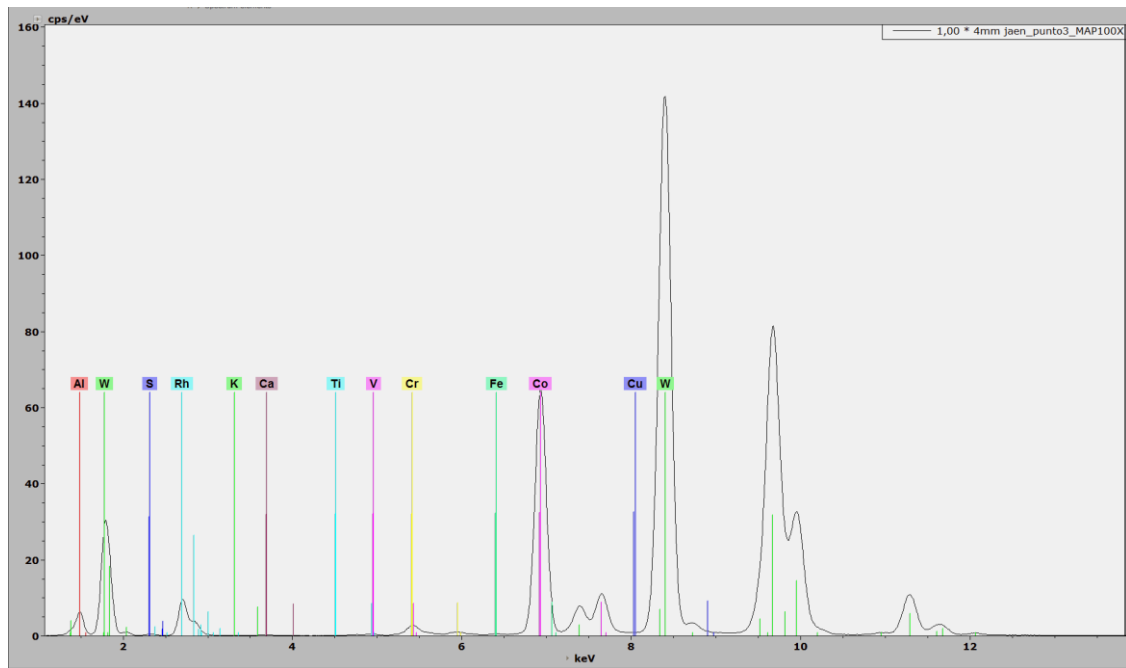


Imagen 40. Imagen de ejemplo del espectro obtenido para la fresa de 4 mm empleada en Odisea, realizando el mapeado del punto 3.

Espectro	4mm Odisea Punto 1	4mm Odisea Punto 2	4mm Odisea Mapeado 2	4mm Odisea Mapeado 3
Al	0,211901	1,570339	14,15399	14,35028
S	0	0	0	0
K	0,142235	0	0	0
Ca	0,197006	0,168795	0,171967	0,141463
Ti	0	0	0	0
V	0,118176	0,090222	0,087984	0,098817
Cr	0,608992	0,563176	0,511513	0,595434
Fe	0	0	0,00245	0,020333
Co	9,978448	9,02145	8,18807	9,090308
Cu	0	0	0	0
Rh	0	0	0	0
W	88,74324	88,58602	76,88403	75,70336

Tabla 37. Porcentaje de aleantes en la fresa de 4 mm (Odisea).

La cara de incidencia (punto 1) es la que menor contenido en aluminio tiene en este caso. Por otro lado, se desechará en este ensayo el punto 2 puesto que se realizó el mapeado de la superficie, en la que sí se aprecia un gran contenido de aluminio, al igual que ocurre en el mapeado realizado en el punto 3 (cara de desprendimiento). La

diferencia existente entre el punto 2 y el mapeado de dicha zona es que si se toma un punto puede ocurrir que se tome el análisis en una zona donde no haya una partícula de aluminio, por lo que se obtendría un valor bajo de aluminio, pudiendo existir igualmente en dicha zona. Sin embargo, en el análisis de la herramienta de 4 mm empleada en fresadora Lagun L650 se realizó un análisis de un único punto para el punto 2 por ser la primera en realizarse, obteniendo los resultados que se expondrán posteriormente. Por otro lado, las caras de incidencia se analizaron siempre por punto, en cada una de las herramientas estudiadas.

6.3.2. Herramienta de 4 mm empleada en Lagun L650

La disposición dentro de la máquina de esta fresa fue similar a la empleada con la de 4 mm de la fresadora Odisea en su posición vertical y similar en la posición horizontal salvo por el hecho de encontrarse sujeta aquí mediante una espuma.

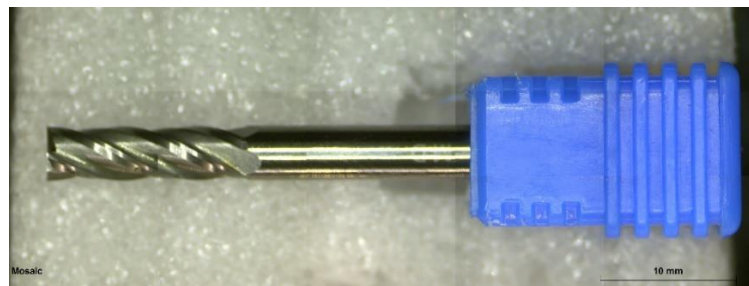


Imagen 41. Disposición horizontal de fresa de 4 mm utilizada en Lagun L650.

Por otro lado, se realizaron los análisis con el espectrómetro de masas de igual manera que se ha comentado en el apartado anterior, obteniendo las Imágenes 42 y 43.

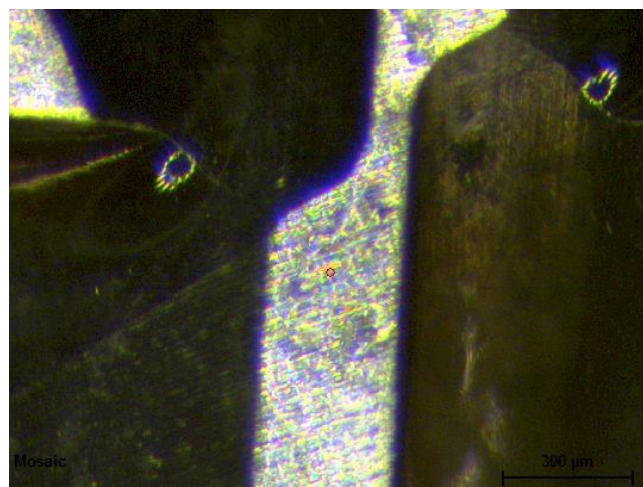


Imagen 42. Cara de incidencia y posterior analizadas en fresa de 4 mm usada en Lagun L650.

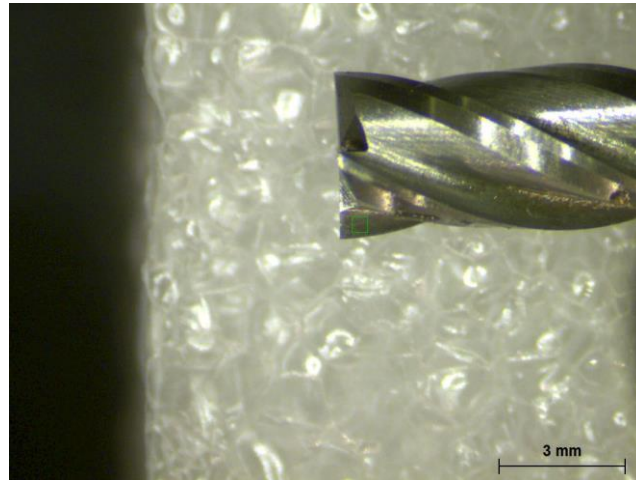


Imagen 43. Cara de desprendimiento de fresa de 4 mm utilizada en Lagun L650.

Este fue el primero de todos los ensayos, por lo que se realizó el análisis de la cara posterior a incidencia mediante un punto y no mediante un mapeado de la superficie. Los resultados fueron los expuestos en la Tabla 38.

Espectro	4mm Lagun Punto 1	4mm Lagun Punto 2	4mm Lagun Punto 3	4mm Lagun Mapeado 3
Al	1,366785	0,548952	4,081026	5,65402
S	0	0	0	0
K	0	0,017306	0,038517	0
Ca	0,220269	0,417343	1,658525	0,834817
Ti	0,018758	0,017081	0,029157	0,024066
V	0,113963	0,103317	0,107357	0,10482
Cr	0,640119	0,629434	0,649603	0,635544
Fe	0,008307	0,035403	0,082408	0,126999
Co	10,05895	10,00969	10,39897	9,984671
Cu	0	0	0	0
Rh	0	0	0	0
W	87,57285	88,22148	82,95443	82,63506

Tabla 38. Porcentaje de aleantes en la fresa de 4 mm (Lagun L650).

Las concentraciones de aluminio en los diferentes puntos de la herramienta analizados cambian con respecto a la herramienta de 4 mm de diámetro. En la cara de incidencia (punto 1) se tiene una mayor cantidad de aluminio acumulada que en la fresadora Odisea, mientras que en las caras posterior a incidencia (punto 2) y

desprendimiento (punto 3 y su mapeado) los valores de aluminio obtenidos menores que los obtenidos en la fresadora Odisea, pero muy superiores a la cara de incidencia.

6.3.3. Herramienta de 2,5 mm empleada en Lagun L650

Para realizar el análisis de esta herramienta se volvió a disponer de la misma manera que en el caso de la herramienta de 4 mm en la fresadora Odisea. Se obtuvo la Imagen 44.

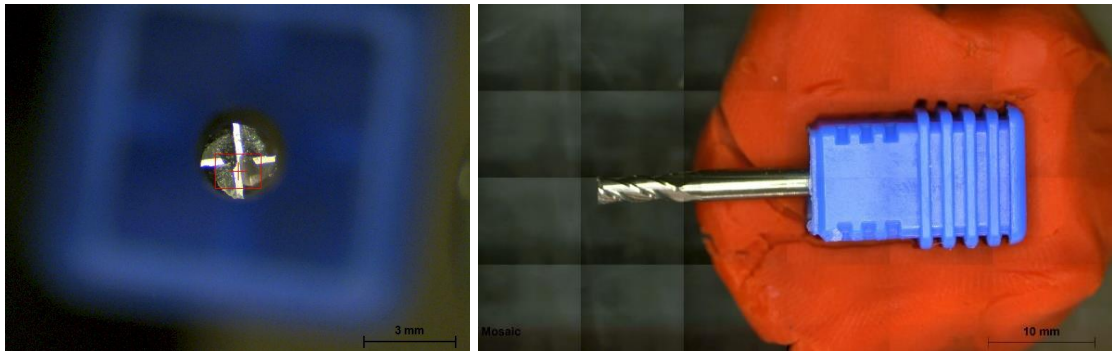


Imagen 44. Izquierda: disposición vertical de fresa de 2,5 mm empleada en Lagun L650. Derecha: disposición horizontal de fresa de 2,5 mm empleada en Lagun L650.

De nuevo se realizaron los mismos análisis que en los apartados anteriores, siendo las zonas estudiadas las mostradas en las Imágenes 45 y 46.

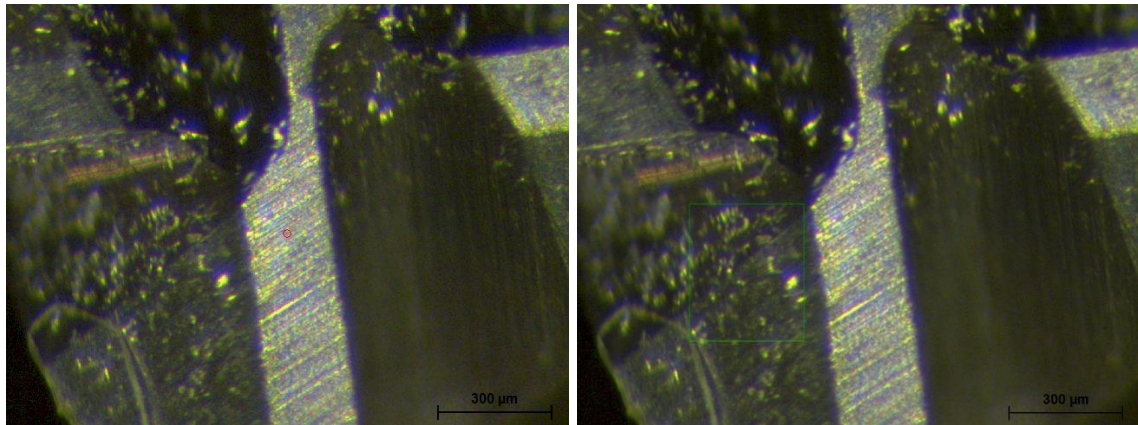


Imagen 45. Cara de incidencia (izquierda) y posterior a incidencia (derecha) analizadas en fresa de 2,5 mm utilizada en Lagun L650.

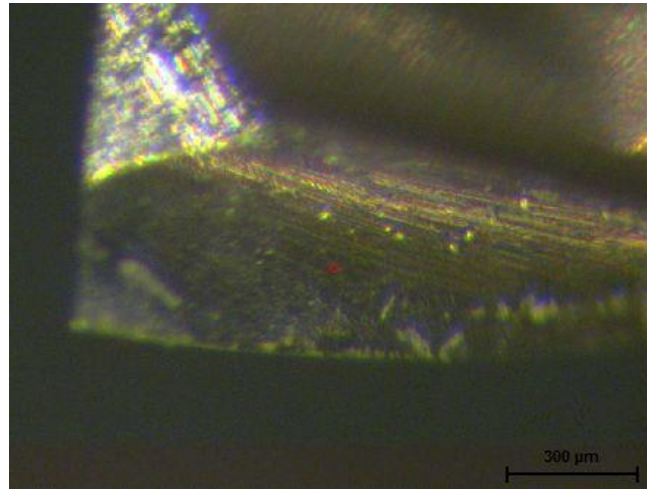


Imagen 46. Cara de desprendimiento analizada en fresa de 2,5 mm usada en Lagun L650.

Y los resultados de análisis realizado por el espectrómetro de masas fueron los que se presentan en la Tabla 39.

Espectro	2,5 mm Lagun Punto 1	2,5 mm Lagun Punto 2	2,5 mm Lagun Mapeado 2	2,5 mm Lagun Mapeado 3
Al	13,00454	10,49221	24,81301	2,518325
S	0	0	0	0
K	0	0	0	0,131658
Ca	0,167875	0,16181	0,131541	0,22402
Ti	0	0	0	0,004573
Cr	0,595257	0,594739	0,487134	0,693398
Fe	0,016117	0,01115	0,048836	0,032056
Co	9,242057	9,50207	7,571171	10,3723
Cu	0	0	0	0
Rh	0	0	0	0
W	76,93984	79,20138	66,9196	85,99802

Tabla 39. Porcentaje de aleantes en la fresa de 2,5 mm (Lagun L650).

La cantidad de aluminio existente en la cara de incidencia (punto 1) es mucho mayor a las obtenidas en las herramientas de 4 mm de diámetro. Igual sucede en la cara posterior a la incidencia (punto 2). Sin embargo, en la cara de desprendimiento analizada mediante el mapeado del punto 3 se tiene una medición de aluminio muy inferior a las obtenidas en las herramientas anteriormente estudiadas.

6.3.4. Análisis de los resultados

Una vez obtenidas las cantidades de todos los elementos que se encuentran depositados sobre las fresas, se puede ver que:

- En la fresa de 4 mm empleada en la fresadora Odisea se observa una cantidad de aluminio en la cara de incidencia de 0,21%, en la cara posterior a incidencia un 14,15% al hacer el mapeado y un 1,57% al medir sobre un punto, y sobre la cara de desprendimiento un 14,35%.
- En la fresa de 4 mm empleada en la fresadora Lagun L650 se aprecia una cantidad de aluminio en la cara de incidencia de 1,37%, en la cara posterior a incidencia un 0,55% al medir sobre un punto, y sobre la cara de desprendimiento un 5,65%.
- En la fresa de 4 mm empleada en la fresadora Lagun L650 se observa una cantidad de aluminio en la cara de incidencia de 13,00%, en la cara posterior a incidencia un 24,81% al hacer el mapeado y un 10,49% al medir sobre un punto, y sobre la cara de desprendimiento un 2,52%.

No se han tenido en cuenta el resto de materiales contenidos en las herramientas, puesto que, al ser una aleación con una base de aluminio de en torno al 93,75% de dicho elemento, el resto de elementos de aleación van a estar en muy poca medida sobre las herramientas.

Es necesario tener en cuenta un factor que va a afectar mucho en estos casos: el radio de punta de la herramienta. Dicho radio de punta es el factor determinante en la aparición del “*size effect*” o efecto del tamaño. De esta manera, el radio de punta de la herramienta es directamente proporcional al diámetro de la misma, por lo que el “*size effect*” será más acusado en el caso de las herramientas de 4 mm que en la de 2,5 mm.

Comparando los resultados obtenidos en los análisis realizados a las tres herramientas, se puede ver que la cantidad de material adherido en la cara de incidencia es una cantidad muy pequeña en los casos de las herramientas de 4 mm de diámetro, y mucho mayor en el caso de la herramienta de 2,5 mm de diámetro. Este efecto se puede explicar con el hecho de que la fresa con diámetro de 2,5 mm tiene un menor radio de punta que las de 4 mm, de forma que el efecto del “*size effect*” es menor, cortando más la herramienta el material con la punta en lugar de deformarlo, y quedando dicho material en parte adherido a la zona de incidencia de la herramienta.

En lo que respecta a la cara posterior a la incidencia, en las dos fresas de 4 mm de diámetro se aprecia una menor cantidad de aluminio que en la de 2,5 mm. Además, se puede apreciar una variación grande entre los puntos 2 de las herramientas de 4 mm, explicada por el hecho de existir en la fresadora Lagun L650 un método de evacuación de la viruta mediante un chorro de aire, accionado intermitentemente durante el mecanizado para evitar arañazos de las fresas sobre la pieza, mientras que en la Odisea simplemente se soplabla la superficie de la pieza para limpiarla. Por otro lado, el contenido de la herramienta de 2,5 mm es tan superior por el hecho anteriormente comentado: la herramienta cortaba de mejor manera el material (sin llegar a ser como en el caso de un mecanizado convencional en el que la viruta desliza sobre la cara de desprendimiento) quedando adherido a la cara de incidencia, y deslizándose hacia la cara posterior a ésta. Eso explica la mayor cantidad de aluminio concentrada en esta zona en la herramienta de 2,5 mm de diámetro.

Analizando los resultados obtenidos en los análisis realizados sobre las caras de desprendimiento de las fresas, se puede ver que en este caso las cantidades de material adherido a las herramientas de 4 mm de diámetro son mucho mayores que la cantidad que se encuentra en la fresa de 2,5 mm. Si a la vez se estudia la topología de las virutas, se puede observar en las imágenes anteriores que, en el caso de las herramientas de 4 mm, tanto la empleada para los ensayos realizados en la fresadora Odisea como la usada en la máquina Lagun L650, la viruta toma forma de un fino polvo adherido sobre todo sobre la cara de desprendimiento, mientras que en la fresa de 2,5 mm de diámetro se aprecian virutas de tamaño algo mayor. Al no producirse el proceso de corte de igual manera que en un mecanizado convencional, sino más bien de una especie de “*abrasión*” con la herramienta por el rozamiento con la misma, la

viruta no pasa a la cara de desprendimiento directamente, sino que, tras ser cortada, al tratarse de polvo muy fino al utilizar herramientas de 4 mm de diámetro, ésta se queda suspendida y la cara de desprendimiento la recoge por el propio movimiento rotativo de la herramienta. De forma que, en la fresa de 2,5 mm al ser la viruta de mayor tamaño, esto no ocurre de igual manera, no depositándose sobre la cara de desprendimiento.

Para analizar el desgaste del filo de la herramienta por el proceso de micromecanizado realizado, se observaron las herramientas mediante el microscopio estereoscópico visto en el apartado 3.1.7., obteniendo las Imágenes desde la 47 a la 52, donde se muestran los filos y punta de las herramientas.

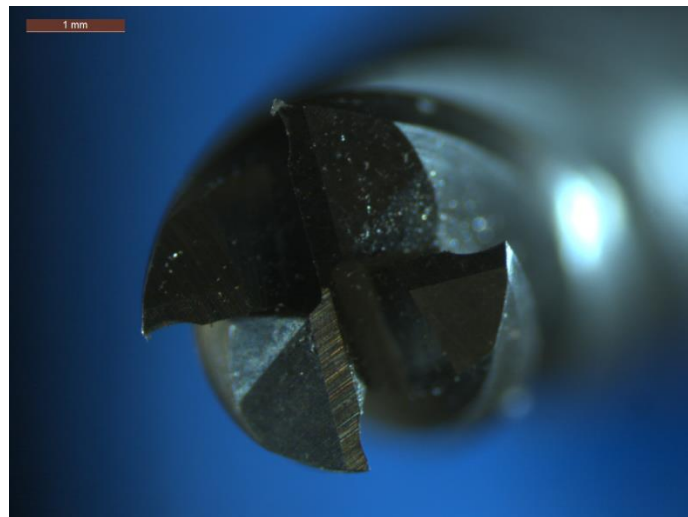


Imagen 47. Extremo de fresa de 4 mm utilizada en fresadora Odisea (vertical).

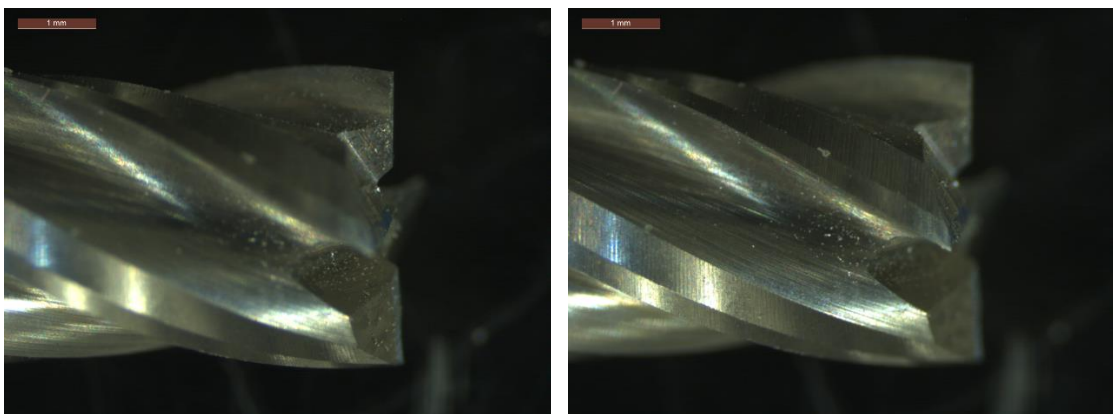


Imagen 48. Extremo de fresa de 4 mm utilizada en fresadora Odisea (horizontal). Izquierda: vista de cara de desprendimiento y posterior a incidencia. Derecha: vista de filo de la fresa.

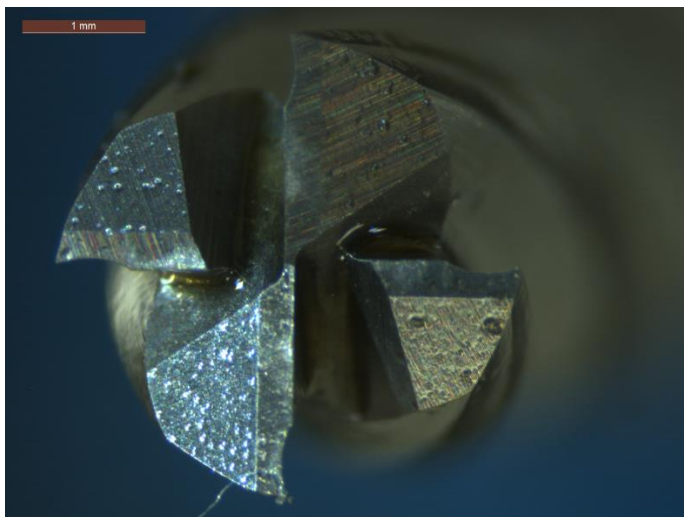


Imagen 49. Extremo de fresa de 4 mm utilizada en Lagun L650 (vertical).

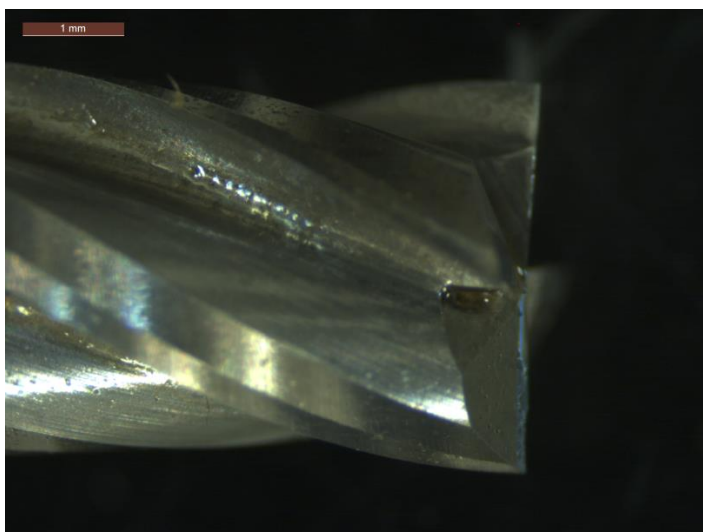


Imagen 50. Extremo de fresa de 4 mm utilizada en Lagun L650 (horizontal).

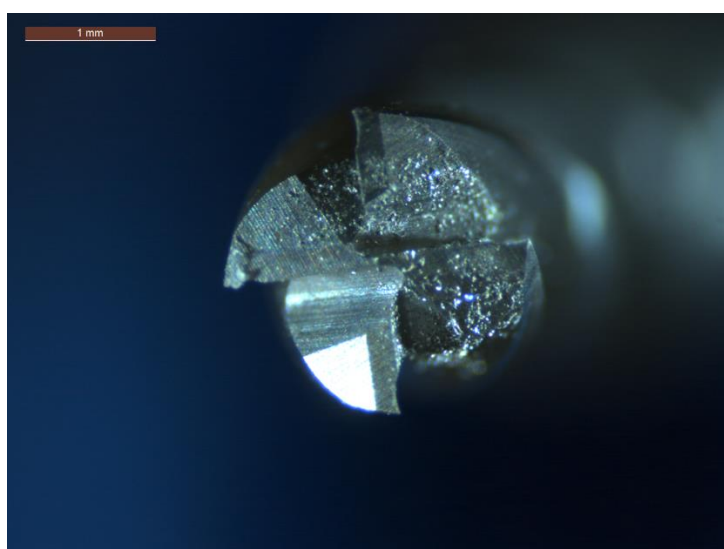


Imagen 51. Extremo de fresa de 2,5 mm utilizada en Lagun L650 (vertical).

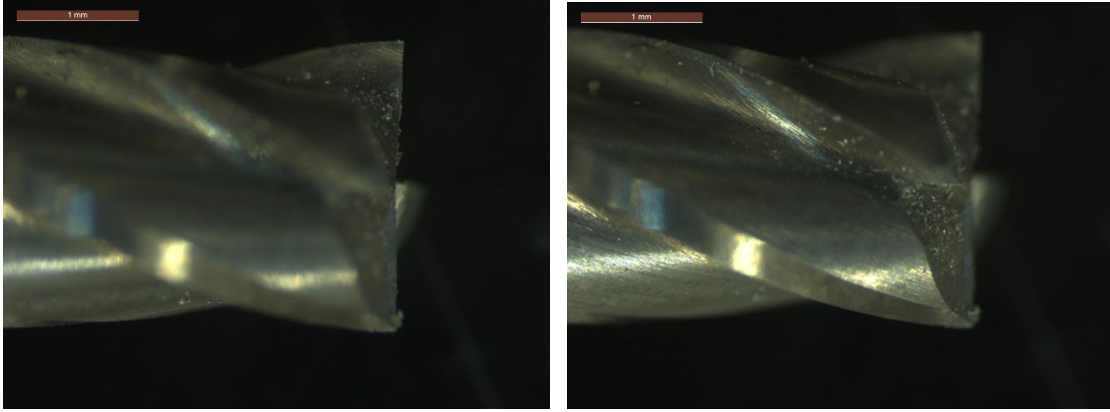


Imagen 52. Extremo de fresa de 2,5 mm utilizada en fresadora Lagun L650 (horizontal). Izquierda: vista de cara de incidencia. Derecha: vista de filo de la fresa y cara posterior a incidencia.

Si se analizan esas imágenes tomadas mediante el microscopio estereoscópico, se pueden confirmar los resultados obtenidos en el anterior apartado en lo que respecta a la adhesión de material a las herramientas. Se puede ver, de esta manera, la enorme cantidad de material adherido a la cara posterior a la de incidencia en el caso de la herramienta de 2,5 mm.

Por otro lado, en el caso del desgaste de la propia herramienta, apenas se puede apreciar desgaste de ningún tipo, aunque sí que hay unas pequeñas marcas sobre las caras de incidencia de las herramientas (se aprecia en las imágenes verticales), lo que confirmaría que existe “*size effect*” en la realización de estos ensayos y que no se corta el material de igual manera que en el mecanizado convencional a macroescala, en el que el desgaste principalmente ocurriría en la cara de desprendimiento. En cuanto al desgaste de la cara de desprendimiento, no se aprecia tal tipo de muescas características sobre dichas caras, por lo que también quedaría confirmado que la viruta no desliza sobre esa cara sino sobre la de incidencia al utilizar herramientas de 2,5 y 4 mm con las profundidades de pasada empleadas.

Otro hecho a comentar se trata de la lubricación de fábrica de las herramientas. Se puede observar perfectamente como aún queda una pequeña cantidad de aceite en las imágenes de la fresa de 4 mm empleada en la Lagun L650, algo que indica el poco desgaste que tienen estas herramientas. En efecto, al ser la energía de corte tan pequeña por serlo también el área de la sección de corte (profundidad muy reducida) las herramientas no llegan a sufrir una gran abrasión.

7. Conclusiones y trabajos futuros

7.1. Conclusiones

Los ensayos realizados en el micromecanizado han dado una serie de resultados, de los cuáles se pueden sacar las siguientes conclusiones, motivadas por los objetivos expuestos en el apartado 1.2.:

- Para el micromecanizado, no siempre la variación de los parámetros de avance y profundidad de pasada actúan de la misma manera que en el mecanizado convencional, puesto que aparecen factores diferentes (como el “*size effect*”) que afectan más o menos según esos parámetros.
- Cuando se emplean herramientas de diámetro más pequeño, el “*size effect*” tiene una menor influencia en los resultados obtenidos, pareciéndose la operación más a un mecanizado a escala macrométrica. Además, al emplear herramientas más pequeñas se produce, por lo general, una mejora en los parámetros de rugosidad superficial, lo que se traduce en un mejor acabado superficial.
- La trayectoria seguida no afecta a la rugosidad superficial obtenida como resultado del proceso de corte en la dirección longitudinal de dicho corte.
- El avance y la profundidad de pasada sí que tienen una influencia clave en el proceso, y en aquellos en los que el “*size effect*” no tiene tanta influencia, el aumento de ambos parámetros produce un empeoramiento de la calidad superficial resultante.
- En la fresadora Odisea se han obtenido mejores resultados de rugosidad superficial que en la Lagun L650, por el menor tamaño de la misma, y por lo tanto la disminución de las inercias, voladizos y vibraciones provocados por la propia máquina-herramienta.
- Al emplear herramientas de menor tamaño se obtiene un mejor acabado superficial que con las de un mayor diámetro cuando se mecaniza a bajas cargas, pero al aumentar dicha carga se produce un aumento en la rugosidad superficial.
- El parámetro de avance tiene una relación de proporcionalidad directa con la fuerza resultante del proceso.

- La profundidad de pasada afecta también a la fuerza resultante durante el corte, teniendo además influencia sobre el “*size effect*” y por lo tanto sobre las vibraciones y estabilidad del proceso. A mayor profundidad, si se usan herramientas más pequeñas, se produce una menor fuerza de corte por la eliminación del “*size effect*”, pero no así en herramientas grandes en las que no se puede salvar ese fenómeno.
- La trayectoria afecta al proceso en lo que a fuerzas se refiere, pero no cambiando de manera muy importante los valores de dichas fuerzas.
- Las fuerzas no varían mucho entre los ensayos realizados con herramienta de 4 mm entre una y otra fresadora, por lo que la máquina-herramienta no afecta mucho al proceso en lo que a fuerzas se refiere.
- Las fuerzas disminuyen al emplear una herramienta de menor diámetro.
- Al disminuir el diámetro de la herramienta el proceso se vuelve más estable y se observa que aumentan su influencia las diferentes variables estudiadas.
- Que durante la ejecución de los experimentos se pueden dar una serie de sucesos imprevistos que empeoran el acabado superficial por la pérdida de estabilidad del proceso, produciendo unas pequeñas marcas que, aunque parezcan casi inapreciables, afectan mucho a la rugosidad resultante.
- En las herramientas utilizadas, el desgaste ha sido mínimo. Por lo tanto, para micromecanizados puntuales se puede afirmar que las herramientas apenas sufren desgaste. Por otro lado, la cantidad de viruta adherida es bastante grande para los pocos ensayos hechos, por lo que para un mecanizado de mayor entidad tal vez sería necesario el cambio de herramienta por desgaste por adhesión y por abrasión de la viruta en la herramienta.

7.2. Trabajos futuros

La elaboración del anterior estudio se ha hecho como una aproximación al micromecanizado y a tratar de analizar la influencia de algunos parámetros de corte en los resultados obtenidos del proceso de corte. Sin embargo, el mismo estudio ha

suscitado una gran cantidad de preguntas que responder que no se han estudiado aquí, como pueden ser:

- Realizar un estudio de la rugosidad resultante del micromecanizado realizando un planeado de una superficie, y midiendo dicha rugosidad tanto longitudinal como transversalmente a la dirección de mecanizado.
- Analizar el desgaste producido en las herramientas al realizar tiradas de ensayos mayores a las aquí estudiadas.
- Estudiar los procesos de micromecanizado realizados mediante fresado periférico, variando velocidades de avance, velocidades de giro, profundidades de pasada radiales y axiales.
- Realizar ensayos empleando acelerómetros para medir las vibraciones al realizar el micromecanizado y cuantificar las pérdidas de estabilidad por “*size effect*” o por otros procesos que eliminan la linealidad del proceso.
- Analizar el proceso de modo similar al realizado, pero utilizando herramientas de menor diámetro que las aquí empleadas, y comparar los resultados con los disponibles en estos ensayos.

8. Bibliografía

- Afazov, S.M., Zdebski, D., Ratchev, S.M., Segal, J., Liu, S. (2012). Effects of micro-milling conditions on the cutting forces and process stability. *Journal of Materials Processing Technology* 213(5), pp. 671-684
- Alhadeff, L.L., Marshall, M.B., Curtis, D.T., Slatter, T. (2018). Protocol for tool wear measurement in micro-milling. *Wear* 420–421(15), pp. 54-67
- Aramcharoen, A., Mativenga, P.T. (2008). Size effect and tool geometry in micromilling of tool Steel. *Precision Engineering* 33(4), pp. 402-407
- Bandapalli, C., Sutaria, B.M., Bhatt, D.V., Singh, K.K. (2017). Experimental investigation and estimation of surface roughness using ANN, GMHD & MRA models in high speed micro end milling of titanium alloy (Grade-5). *Materials Today: Proceedings* 4, pp. 1019-1028
- Bao, W.Y., Tansel, I.N. (2000). Modeling micro-end-milling operations. Part I: analytical cutting forced model. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 40(15), pp. 2155-2173
- Bissacco, G., Hansen, H.N., Slunsky, J. (2008). Modeling the cutting edge radius size effect for force prediction in micro milling. *CIRP Annals* 57(1), pp.113-116
- Boswell, B., Islam, M.N., Davies, I.J. (2017). A review of micro-mechanical cutting. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 94(1–4), pp. 789–806
- Doi, T., Marinescu, I.D., Kurokawa, S. (2011). *Advances in CMP Polishing Technologies*. Editor: William Andrew, Elsevier
- Eifler, M., Klauer, K., Kirsch, B., Seewig, J., Aurich, J.C. (2018). Micro-milling of areal material measures – influences on the resulting surface topography. *Procedia CIRP* 71, pp. 122-127
- Filiz, S., Conley, C.M., Wasserman, M.B., Ozdoganlar, O.B. (2007). An experimental investigation of micro-machinability of copper 101 using tungsten carbide micro-endmills. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 47(7–8), pp. 1088-1100
- Gao, S., Huang, H. (2017). Recent advances in micro- and nano-machining technologies. *Frontiers of Mechanical Engineering* March 2017 12(1), pp. 18–32
- Gentili, E., Tabaglio, L., Aggogeri, F. (2005). Review on micromachining techniques. . In: Kuljanic E. (eds) *AMST'05 Advanced Manufacturing Systems and Technology*. CISM International Centre for Mechanical Sciences (Courses and Lectures) 486. Springer, Vienna
- Germain, D., Fromentin, G., Poulachon, G., Bissey-Breton, S. (2013). From large-scale to micromachining: A review of force prediction models. *Journal of Manufacturing Processes* 15(3), pp. 389-401
- Jackson, M.J. (2013). Analysis of Contact Between Chip and Tool Using Nanostructured Coated Cutting Tools (Chapter 1). In: *Micromachining with Nanostructured Cutting Tools*, 7-27
- Jin, X., Altintas, Y. (2013). Chatter stability model of micro-milling with process damping. *J. Journal of Manufacturing Science and Engineering* 135(3), pp. 031011

- Kiswanto, G., Zariatin, D.L., Ko, T.J. (2014). The effect of spindle speed, feed-rate and machining time to the surface roughness and burr formation of Aluminum Alloy 1100 in micro-milling operation. *Journal of Manufacturing Processes* 16(4), pp. 435-450
- Komatsu, T., Yoshino, T., Matsumura, T., Torizuka, S. (2012). Effect of Crystal Grain Size in Stainless Steel on Cutting Process in Micromilling. *Procedia CIRP* 1, pp. 150-155
- Kumar, P., Kumar, M., Bajpai, V., Nirmal, K. S. (2017). Recent advances in characterization, modeling and control of burr formation in micro-milling. *Manufacturing Letters* 13, pp. 1-5
- Kuram, E., Ozcelik, B. (2013). Multi-objective optimization using Taguchi based grey relational analysis for micro-milling of Al 7075 material with ball nose end mill. *Manufacturing* 46(6), pp. 1849-1964
- Lauro, C.H., Brandão, L.C., Carou, D., Davim, J.P. (2015). Specific cutting energy employed to study the influence of the grain size in the micro-milling of the hardened AISI H13 steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 81, pp. 1591-1599.
- Lauro, C.H., Filho, S.L.M.R., Baldo, D., Cerqueira, S.A.A.G., Brandão, L.C. (2016). Optimization of micro milling of hardened steel with different grain sizes using multi-objective evolutionary algorithm. *Measurement* 85, pp. 88-99
- Lekkala, R., Bajpai, V., Singh, R.K., Joshi, S.S. (2011). Characterization and modeling of burr formation in micro-end milling. *Precision Engineering* 35(4), pp. 625-637
- Malekian, M., Park, S.S., Jun, M.B.G. (2009). Modeling of dynamic micro-milling cutting forces. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 49(7-8), pp. 586-598
- Ma, Y., Wan, M., Zhang, W. (2016). Effect of cutter runout on chatter stability of milling process. *Procedia CIRP* 56, pp. 115-118
- Matsumura, T., Tamura, S. (2017). Cutting force model in milling with cutter runout. *Procedia CIRP* 58, pp. 566-571
- Medeossi, F., Sorgato, M., Bruschi, S., Savio, E. (2018). Novel method for burrs quantitative evaluation in micro-milling. *Precision Engineering* 54, pp. 379-387
- Niu, J., Peng, J., Ding, Y., Zhu, L. (2018). Evaluation indicators of the runout effects on milling forces and regenerative stability. *Procedia CIRP* 77, pp. 98-101
- de Oliveira, F.B., Rodrigues, A.R., Coelho, R.T., de Souza, A.F. (2014). Size effect and minimum chip thickness in micromilling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 89, pp. 39-54
- Saptaji, K., Subbiah, S., Dhupia, J.S. (2012). Effect of side edge angle and effective rake angle on top burrs in micro-milling. *Precision Engineering* 36(3), pp. 444-450
- Shaw, M.C. (2003). The size effect in metal cutting. *Sadhana* 28(5), pp. 875-896
- Singh, K.K., Kartik, V., Singh, R. (2018). Stability modeling with dynamic run-out in high speed micromilling of Ti6Al4V. *International Journal of Mechanical Sciences* 150, pp. 677-690

- Singh, K.K., Singh, R., Kartik, V. (2015). Comparative study of chatter detection methods for high-speed micromilling of Ti6Al4V. *Procedia Manufacturing* 1, pp. 593-606
- Sun, Q., Cheng, X., Liu, Y., Yang, X., Li, Y. (2017). Modeling and Simulation for Micromilling Mechanisms. *Procedia Engineering* 174, pp. 760-766
- Totis, G., Sortino, M. (2010). Development of a modular dynamometer for triaxial cutting force measurement in turning. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 51(1), pp. 34-42
- Uriarte, L., Eguia, J., Egaña, F. (2009) Micromilling machines (Chapter 11). In: *Machine Tools for High Performance Machining* pp. 369-397, Editors: López de Lacalle L., Lamikiz A., Springer
- Vázquez, E., Gomar, J., Ciurana, J., Rodríguez, C.A. (2014). Analyzing effects of cooling and lubrication conditions in micromilling of Ti6Al4V. *Journal of Cleaner Production* 87, pp. 906-913
- Wang, J., Kweon, S.H., Yang, S.H. (2005). A study on roughness of the micro-end-milled surface produced by a miniature machine tool. *Journal of Materials Processing Technology* pp. 162–163, pp. 702-708
- Wu, X., Li, L., He, N. (2016). Investigation on the burr formation mechanism in micro cutting. *Precision Engineering* 47, pp. 191-196
- Yuan, Y., Jing, X., Ehmann, K.F., Cao, J., Li, H., Zhang, D. (2018). Modeling of cutting forces in micro end-milling. *Journal of Manufacturing Processes* 31, pp. 844-858
- Yuan, Z.J., Zhou, M., Dong, S. (1996). Effect of diamond tool sharpness on minimum cutting thickness and cutting surface integrity in ultraprecision machining. *Journal of Materials Processing Technology* 62(4), pp. 327-330
- Zhang, X., Yu, T., Wang, W. (2017). Prediction of cutting forces and instantaneous tool deflection in micro end milling by considering tool run-out. *International Journal of Mechanical Sciences* 136, pp. 124-133
- Zhang, X., Ehmann, K.F., Yu, T., Wang, W. (2016). Cutting forces in micro-end-milling processes. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 107, pp. 21-40