

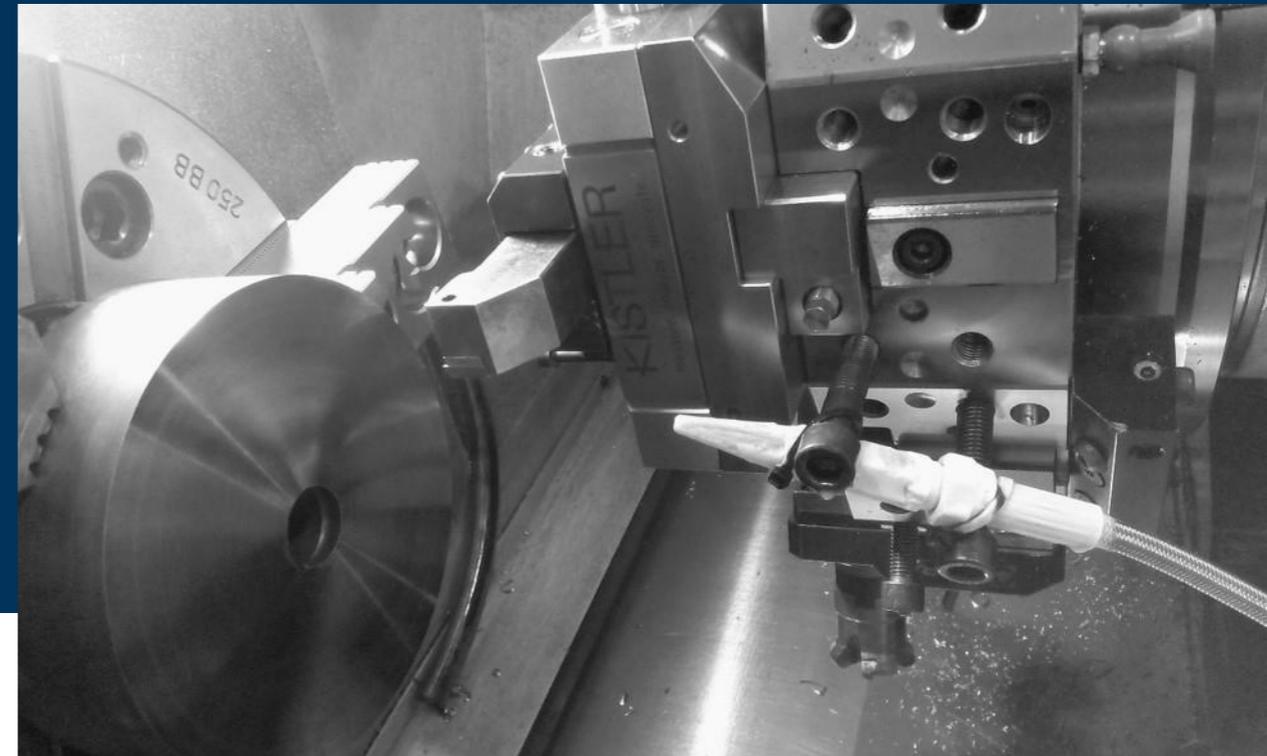
Mecanizado en aleaciones base níquel: Influencia de la aleación, lubricación, métodos asistidos y alternativos

MECANIZADO EN ALEACIONES BASE NÍQUEL: INFLUENCIA DE LA ALEACIÓN, LUBRICACIÓN, MÉTODOS ASISTIDOS Y ALTERNATIVOS

TESIS DOCTORAL

presentada para optar al título de **Doctor Ingeniero Industrial**

Alfredo Suárez González



Alfredo Suárez González

DIRECTORES

Prof. Luis Norberto López de Lacalle

Dr. Fernando Veiga Suárez

Bilbao, mayo 2019



Universidad del País Vasco Euskal Herriko Unibertsitatea

Departamento de Ingeniería Mecánica / Ingeniaritza Mekanikoa Saila



Universidad del País Vasco Euskal Herriko Unibertsitatea

INGENIARITZA
MEKANIKOA
SAILA
DEPARTAMENTO
DE INGENIERÍA
MECÁNICA

Tesis Doctoral

**Mecanizado en aleaciones base níquel:
Influencia de la aleación, lubricación,
métodos asistidos y alternativos**

Presentada por:

D. Alfredo Suárez González

en el

Departamento de Ingeniería Mecánica

perteneciente a la

Universidad del País Vasco – Euskal Herriko Unibertsitatea

Para la obtención del título de

Doctor Ingeniero Industrial

Dirigida por

Prof. D. Luis Norberto López de Lacalle

Dr. D. Fernando Veiga Suárez

Bilbao, mayo de 2019

Tesis Doctoral

**Mecanizado en aleaciones base níquel:
Influencia de la aleación, lubricación,
métodos asistidos y alternativos**

Presentada por:

D. Alfredo Suárez González

en el

Departamento de Ingeniería Mecánica

perteneciente a la

Universidad del País Vasco – Euskal Herriko Unibertsitatea

Para la obtención del título de

Doctor Ingeniero Industrial

Dirigida por

Prof. D. Luis Norberto López de Lacalle

Dr. D. Fernando Veiga Suárez

Bilbao, mayo de 2019

*A mi familia, en especial a mis padres (M^a Jesús y Delfín), por toda una vida de
esfuerzo.*

*A mi mujer, Maida, mis hijas Nahia y June, por estar siempre a mi lado, en los
buenos y malos momentos.*

Quiero aprovechar estas líneas para agradecer a todas las personas que me han apoyado durante el desarrollo de esta tesis.

En primer lugar, quiero mencionar a mis directores de tesis, Luis Norberto López de Lacalle y Fernando Veiga. A Berti, por sus consejos, ánimos y apoyo durante el desarrollo de todo este trabajo. A Fernando, por toda la ayuda, colaboración y motivación para llegar a culminar esta tesis. Un especial agradecimiento a Roberto Polvorosa, incansable durante todo el proyecto Himmoval, sin su esfuerzo esta tesis no se habría completado. No puedo dejar de agradecer esta tesis a Anders Wretland, responsable de fabricación en GKN Aerospace (Suecia), por la orientación técnica y paciencia para alcanzar resultados interesantes para la industria y la comunidad científica.

Quiero mencionar a todos mis compañeros del área de fabricación avanzada de Tecnalía que me han acompañado durante todos estos años, con quienes resulta muy fácil colaborar y trabajar. En especial a “mi equipo” de tecnología WAAM, formado por Teresa Artaza, José Gorrotxategi, Gorka Puertas y Angel San Román por su implicación y colaboración en todos los retos que les propongo.

A todos ellos, muchas gracias.

Por último, un agradecimiento muy especial merece la comprensión, paciencia y el ánimo recibidos de mi familia y amigos.

Resumen

El número de aviones aumentará considerablemente en los próximos 20 años, según el pronóstico de mercado global de Airbus (AGMF). Para 2034 se estima que más de 38.000 aeronaves estarán en servicio. De estos, 19,000 son aviones nuevos necesarios para dar respuesta al crecimiento del sector, mientras que 13,000 serán sustituciones, lo que eleva a 32,000 los nuevos aviones que deben ser construidos.

Esto conduce a una necesidad cada vez mayor de trabajar con materiales resistentes a altas temperaturas que son los comúnmente utilizados en los motores de los aviones. Las superaleaciones utilizadas en la industria aeroespacial, como las base níquel y las aleaciones de titanio, se emplean generalmente debido a su combinación única de propiedades como alta resistencia a elevadas temperaturas, resistencia a la degradación química y resistencia al desgaste.

El objetivo del presente trabajo de tesis doctoral es el resultado del proyecto HIMMOVAL, Grant Agreement 620134, financiado por el programa Clean-Sky JU, con el objetivo de investigar nuevos métodos de fabricación para aumentar la productividad durante el mecanizado de aleaciones base níquel

Durante esta tesis, el estudio se ha enfocado en dos aproximaciones diferentes para desarrollar métodos de fabricación más productivos.

La primera parte del desarrollo se ha centrado en estudiar métodos de mecanizado convencional en diferentes aleaciones. Dentro de este apartado, la tesis ha generado y desarrollado nuevo conocimiento en diferentes aleaciones base níquel (Inconel 718, Waspaloy and Haynes 282), teniendo en cuenta el efecto de los tratamientos térmicos, caracterización metalúrgica, ensayos de maquinabilidad y el efecto de diferentes estrategias de lubricación en el mecanizado y su impacto en la herramienta de corte. Aspectos considerados durante la experimentación fueron:

- Diferentes estados (tratamiento envejecido y solucionado)
- Tamaño de grano (grano pequeño y grano grande)
- Ensayos con lubricación normal (6bar) y ensayos a alta presión (80bar): incluyendo el efecto en el desgaste de la herramienta.

La segunda parte del desarrollo se ha centrado en estudiar métodos no convencionales de mecanizado. Las tecnologías exploradas durante esta parte de la investigación han sido tecnologías de corte por agua y abrasivo (AWJ), corte por hilo (WEDM), corte por láser y mecanizado asistido por ultrasonidos (UVAM).

La aleación seleccionada en esta parte del proyecto ha sido Inconel 718, porque es la aleación más comúnmente usada en los motores aeronáuticos. El Inconel 718 fue desarrollado para trabajar en condiciones de alta temperatura mientras mantiene sus propiedades mecánicas inalteradas.

Las tecnologías no convencionales fueron utilizadas para mecanizar Inconel 718 y la superficie mecanizada fue evaluada mediante un ensayo de fatiga en 4 puntos. Además, la superficie fue medida en términos de integridad superficial

- ✓ Rugosidad,
- ✓ Dureza,
- ✓ SEM y,
- ✓ Tensiones residuales,

Los resultados obtenidos fueron comparados con métodos convencionales de mecanizados utilizados como línea de referencia.

Índice de contenidos

ÍNDICE DE CONTENIDOS	1
ÍNDICE DE FIGURAS	5
ÍNDICE DE TABLAS	13
NOMENCLATURA	14
CAPÍTULO I : INTRODUCCIÓN	I-1
1 Contexto tecnológico e industrial	I-1
2 Planteamiento del Trabajo de Tesis Doctoral. Objetivos	I-4
3 Organización del Trabajo de Tesis Doctoral	I-6
CAPÍTULO II : ESTADO DEL ARTE	II-1
1 Introducción	II-1
2 Materiales Base Níquel	II-3
3 Mecanizado Convencional	II-7
3.1 Mecanizado Alta Velocidad	II-7
3.2 Monitorización Proceso	II-9
4 Mecanizado Asistido	II-11
4.1 Mecanizado a Alta Presión.....	II-14
4.2 Mecanizado Criogénico.....	II-16
4.3 Mecanizado Asistido mediante vibraciones	II-20
4.4 Mecanizado Asistido térmicamente	II-23
5 Tecnologías Alternativas o No Convencionales	II-26
5.1 Fabricación aditiva	II-27
5.2 Mecanizado mediante tecnología corte por agua y abrasivo	II-28
5.3 Mecanizado asistido por láser	II-38
5.4 Mecanizado mediante electroerosión por hilo	II-42
6 Post procesados	II-44
6.1 Agua a Alta Presión	II-45

6.2	Pulido Láser	II-48
6.3	Bruñido	II-51
6.4	Rectificado	II-56

CAPÍTULO III : REFRENTADO EN ALEACIONES BASE NÍQUEL **III-1**

1	Introducción.....	III-1
2	Set-up.....	III-3
2.1	Máquinas	III-3
2.2	Equipamiento Alta Presión	III-4
2.3	Temperatura Herramienta corte	III-9
2.4	Monitorización Proceso	III-12
2.5	Experimentación	III-14
3	Resultados Lubricación Normal.....	III-26
3.1	Desgaste Flanco y Notch	III-26
3.1.1	Inconel 718	III-26
3.1.2	Waspaloy	III-26
3.1.3	Haynes 282.....	III-27
3.2	Fuerzas Durante Mecanizado	III-28
3.2.1	Inconel 718	III-28
3.2.2	Waspaloy	III-29
3.2.3	Haynes 282.....	III-30
3.3	Comparativa entre diferentes aleaciones para mismas condiciones de corte III-31	
3.3.1	Desgaste Herramienta	III-31
3.3.2	Fuerzas Mecanizado.....	III-33
3.4	Efecto en el material mecanizado	III-36
3.4.1	Forma y tamaño viruta	III-36
3.4.2	Inspección Metalúrgica	III-38
3.5	Simulación Mecanizado Haynes 282.....	III-39
3.5.1	Modelo.....	III-39

3.5.2	Validación	III-40
3.5.3	Discusión de resultados	III-40
3.5.4	Conclusiones Lubricación Normal	III-43
4	Resultados de mecanizado a alta presión	III-44
4.1	Efecto en desgaste herramienta (Desgaste Flanco y Notch)	III-44
4.1.1	Inconel 718	III-44
4.1.2	Waspaloy	III-48
4.1.3	Haynes 282	III-49
4.2	Fuerzas Durante Mecanizado	III-50
4.2.1	Inconel 718	III-50
4.2.2	Waspaloy	III-59
4.2.3	Haynes 282	III-60
4.3	Efecto en el material mecanizado (Tamaño y forma viruta)	III-60
4.3.1	Inconel 718	III-60
4.3.2	Waspaloy	III-62
4.3.3	Haynes 282	III-63
4.4	Adhesion	III-64
5	Conclusiones	III-66

CAPÍTULO IV : TECNOLOGÍAS ALTERNATIVAS PARA EL MECANIZADO INCONEL 718 SGA

1	Introducción	IV-1
2	Set-up	IV-3
2.1	Equipamiento	IV-3
3	Materiales y métodos	IV-9
3.1	Material Analizado	IV-9
3.1.1	Preparación Probetas	IV-11
3.1.2	Descripcion ensayo fátiga y condiciones	IV-13
3.2	Tecnologías utilizadas para extracción de probetas	IV-15
3.2.1	Mecanizado Convencional	IV-15
3.2.2	Mecanizado asistido por ultrasonidos	IV-17

- 3.2.3 Mecanizados No Convencionales IV-19
- 4 Resultados y discusión..... IV-21**
 - 4.1 Rugosidad..... IV-21
 - 4.2 Dureza superficial IV-23
 - 4.3 Resultados ensayo fatiga en 4 puntos..... IV-24
 - 4.4 Evaluación Tensiones Residuales..... IV-26
- 5 Conclusiones..... IV-29**

- CAPÍTULO V : APORTACIONES Y LÍNEAS FUTURAS DEL TRABAJO V-1**
 - 1 Aportaciones V-1**
 - 2 Líneas futuras..... V-4**

- REFERENCIAS..... 1**

Índice de figuras

Figura I-1: Estimación número de aviones hasta 2034.....	I-1
Figura I-2: Límite MRR, depende del límite térmico y de límite mecánico..	I-2
Figura I-3. Fabricación mediante combinación tecnologías No convencionales y convencionales.	I-5
Figura I-4. Esquema y enfoque tesis.	I-7
Figura II-1: Curvas con constante MRR para diferentes valores de velocidad avance y velocidad de corte.....	II-5
Figura II-2: Haynes282 desarrollado específicamente para aeronáutica.	II-7
Figura II-3: Mapa fuerzas reales durante el superacabado de un troquel de estampación.....	II-10
Figura II-4: Definicion sistema referencia herramienta y pieza.	II-10
Figura II-5: Fuerzas medidas y estimadas en un mecanizado transversal....	II-10
Figura II-6: Izq) Inserto Nusselt. Dcha) Intercara herramienta-viruta-lubricante... ..	II-16
Figura II-7: Nickel backscatter para (a) Regular (b) segunda generación de insertos.	II-16
Figura II-8: Taladrado de Titanio6Al4V con refrigeración criogénica (CO ₂).	II-17
Figura II-9: Simulación y test. (a) Boquilla convergente; (b) Boquilla Convergente-divergente (Laval).	II-18
Figura II-10: Vida herramienta durante fresado Inconel 718.....	II-19
Figura II-11: Experimental set-up.	II-19
Figura II-12: Vida herramienta Inserto VCGW 160408.	II-19
Figura II-13: Mapa parametros para asegurar condiciones optimas de vibraciones.....	II-21
Figura II-14: a) Formación viruta en taladrado convencional, b) Segmentación Viruta en taladrado asistido por vibraciones.	II-21
Figura II-15: Set-up experimental para torneado asistido por ultrasonidos. ...	II-22
Figura II-16: Topografía superficie acero templado con y sin vibraciones en operaciones de fresado.....	II-22
Figura II-17: Set-up experimental, simulación FEM durante taladrado asistido por ultrasonidos.	II-23

Figura II-18: Termografía durante taladrado (a) sin asistencia US y (b) asistido por US.....	II-23
Figura II-19: Efecto de la temperatura en la tensión última de rotura de diferentes materiales.....	II-24
Figura II-20: Esquema mecanizado asistido mediante plasma.....	II-24
Figura II-21: Desgaste de flanco en función de longitud mecanizada.....	II-24
Figura II-22: Perfil tensiones residuales medidos en materia C45 endurecido por inducción.....	II-25
Figura II-23: Deposición de Inconel 718 mediante láser.....	II-27
Figura II-24: Simulación proceso laser cladding.....	II-28
Figura II-25: Tecnología corte por agua y abrasivo (AWJ).....	II-29
Figura II-26: (a) Cabezal dinámico de corte (Omax Corporation) (b) Piezas cortadas en máquina de 5 ejes (WardJet) (c) Eje rotatorio (Omax Corporation)	II-30
Figura II-27: Aplicaciones avanzadas mediante AWJ (a) Máquina Gantry 5 ejes para recantado alas avión;(b) Brazo robótico 6 ejes sobre máquina Gantry.....	II-30
Figura II-28: Eliminación capa Alfa mediante WJ.....	II-31
Figura II-29: Decapado mediante WJ.....	II-32
Figura II-30: Ejemplo de pieza fresada en Inconel 718 mediante AWJ.....	II-33
Figura II-31: Abrasivo embebido en Inco718 cortado con AWJ. (a) SEM; (b) microscopio óptico.....	II-34
Figura II-32: Taladrado mediante AWJ: a) Pretaladrado inicial; b) corte.....	II-35
Figura II-33: Aproximación Gaussiana en diferentes test de fresado por AWJ.....	II-36
Figura II-34: Efecto trayectoria herramienta durante el fresado mediante AWJ. ...	II-36
Figura II-35: Generación superficies mediante AWJ.....	II-36
Figura II-36: Rugosidad media en la dirección longitudinal y transversal.....	II-37
Figura II-37: SEM de INCO 718 mecanizado mediante AWJ.....	II-37
Figura II-38: Experimentación y predicción taladrado mediante laser.....	II-39
Figura II-39: Arranque material mediante laser.....	II-40
Figura II-40: Efecto laser en el material.....	II-40

Figura II-41: Esquema de un sistema laser de Nd:YAG.	II-41
Figura II-42: Esquema de arranque laser (a) taladrado y (b) corte.	II-41
Figura II-43: Dureza medida después de aplicar PWJ en diferentes materiales biomédicos.....	II-46
Figura II-44: Probetas de fátiga, Pulidas (P), granalladas, y tratadas por WJ.	II-47
Figura II-45: Resistencia a fátiga en función de rugosidad y ondulación.	II-47
Figura II-46: BEI de sección transversal de (a) WJP 316 LVM y (b) WJP Ti6Al4V	II-48
Figura II-47: Esquema proceso púlido laser.	II-49
Figura II-48: Estrategia púlido laser.....	II-49
Figura II-49: Izqd) Superficie inicial. Dcha) Superficie después del púlido laser.	II-49
Figura II-50: Estructura metalúrgica, en 4 zonas y durezas medidas.	II-50
Figura II-51. Comparación entre superficie medida y estimada.....	II-50
Figura II-52: Probeta fátiga.....	II-50
Figura II-53: Dureza en la zona afectada térmicamente.	II-50
Figura II-54: Resultados de fátiga.	II-50
Figura II-55: (a) Resultados rugosidad obtenidos. (b) Dureza medida.....	II-53
Figura II-56: Probeta fátiga ensayo bruñido.	II-53
Figura II-57: Perfil tensiones residuales en probeta tratadas y no tratadas mediante bruñido.	II-53
Figura II-58: Resutados fátiga probetas tratadas y no tratadas mediante bruñido.....	II-53
Figura II-59: Esquema Bruñido	II-54
Figura II-60: (a) Microestructura después del bruñido en INCO 718; (b) Tensiones residuales en INCO 718 después de aplicar bruñido (c) Resultados fátiga en diferentes acabados superficiales.....	II-55
Figura II-61: Rugosidad obtenida en Ti6Al4V material.	II-56
Figura II-62: Herramientas de rectificado.	II-56
Figura III-1: Enfoque Capítulo III	III-1
Figura III-2: Aleaciones Testeadas y Estado.	III-2

Figura III-3: Diseño carcasa y boquilla lubricación cara desprendimiento.....	III-7
Figura III-4: Orientación Chorros Alta Presión dirigidos a la punta herramienta durante refrentado radial.....	III-7
Figura III-5: Portaherramientas modificado para ensayos Alta Presión. Fabricación y Validación.....	III-8
Figura III-6: Portaherramientas y Verificación.....	III-9
Figura III-7: Micro-taladrado para colocación de termopares.....	III-10
Figura III-8: Verificación agujeros fabricados mediante EDM.....	III-11
Figura III-9: Calibración termopares colocados en herramienta de corte y termopar libre.....	III-12
Figura III-10: Adquisición y Medición Fuerzas.....	III-12
Figura III-11: Adquisición y Medición Temperatura.....	III-13
Figura III-12: Dirección Fuerzas en mesa dinámometrica Kistler.....	III-13
Figura III-13: Medición Rugosidad.....	III-14
Figura III-14: Desviación Radial.....	III-14
Figura III-15: Discos de Inconel 718 tratados térmicamente.....	III-16
Figura III-16: Curvas tratamiento térmico en Inconel 718.....	III-17
Figura III-17: Curvas tratamiento térmico en Waspaloy.....	III-18
Figura III-18: Curvas tratamiento térmico en Haynes 282.....	III-19
Figura III-19: Composición química aleaciones testeadas.....	III-19
Figura III-20: Layout ensayo torneado y parámetros. Integración cámaras medición desgaste.....	III-21
Figura III-21: Procedimiento medición desgaste.....	III-22
Figura III-22: Inconel 718 SGA, T1, Pass03 (Test no válido).....	III-23
Figura III-23: Desgaste flanco en Inconel 718 SGS test 4.....	III-23
Figura III-24: Desgaste flanco en Inconel 718 LGA test 2.....	III-24
Figura III-25: Desgaste flanco en Waspaloy SGS test 4.....	III-24
Figura III-26: Desgaste flanco en Waspaloy LGA test 1.....	III-25
Figura III-27: Desgaste flanco en Haynes 282 LGA test 4.....	III-25
Figura III-28: Desgaste flanco y notch para todas las condiciones de Inconel 718.....	III-26

Figura III-29: Desgaste flanco y notch para todas las condiciones de Waspaloy	III-27
Figura III-30: Desgaste flanco y notch para todas las condiciones de Haynes 282.....	III-28
Figura III-31: Fuerzas medidas para todas las condiciones de Inconel 718.	III-29
Figura III-32: Fuerzas medidas para todas las condiciones de Waspaloy ...	III-30
Figura III-33: Fuerzas medidas para todas las condiciones de Haynes 282	III-31
Figura III-34: Desgaste de flanco para todas las aleaciones testeadas.	III-32
Figura III-35: Desgaste de notch para todas las aleaciones testeadas.....	III-33
Figura III-36: Fuerzas medidas en diferentes estados, SGA SGS, de las aleaciones testeadas.	III-34
Figura III-37: Fuerzas medidas en diferentes estado, LGA LGS, de las aleaciones testeadas	III-35
Figura III-38: Fuerza media en Waspaloy LGA.....	III-36
Figura III-39: Tamaño y forma viruta obtenida en Inconel 718, Waspaloy y Haynes 282.....	III-37
Figura III-40: Morfología viruta en Inconel 718, Waspaloy y Haynes 282	III-38
Figura III-41: Simulación herramienta de corte.....	III-39
Figura III-42. Formación Viruta en Haynes 282 LGA (izq) y Haynes LGS (dcha) con lubricación normal.	III-40
Figura III-43: Formación de viruta en diferentes ángulos de desprendimiento.....	III-40
Figura III-44: Formación de viruta en Haynes 282 LGA (arriba) y Haynes LGS (abajo) con diferentes ángulos de desprendimiento.	III-41
Figura III-45: Predicción fuerzas de corte en Haynes 282.	III-41
Figura III-46: Predicción longitud de corte en Haynes 282	III-42
Figura III-47: Predicción espesor viruta deformada en Haynes 282.	III-43
Figura III-48: Curvas desgaste flanco en Inconel 718.....	III-44
Figura III-49: Curvas desgaste notch en Inconel 718.	III-46
Figura III-50: Lubricación convencional frente alta presión. Área contacto herramienta viruta. Cara desprendimiento.	III-47
Figura III-51: Lubricación convencional frente alta presión. Cara incidencia.	III-48

Figura III-52: Desgaste flanco y notch en Waspaloy. Lubricación normal y alta presión.	III-49
Figura III-53: Desgaste flanco y notch en Haynes 282. Lubricación normal y alta presión.	III-49
Figura III-54: Fuerza Avance, F_x ; Fuerza Corte, F_y y Fuerza Pasiva, F_z	III-50
Figura III-55: Curva temperatura en diferentes ensayo y refrigeración.	III-53
Figura III-56: Patron temperatura en lubricación convencional sin viruta enrollada.	III-54
Figura III-57: Morfología viruta en Inconel 718 SGA con lubricación convencional.	III-55
Figura III-58: Fuera en la dirección de avance en Inconel 718 SGA con estrategia lubricación convencional.	III-55
Figura III-59: Área Corte medida en cara de desprendimiento de la herramienta en Inconel 718 con lubricación convencional.	III-56
Figura III-60: Geometría mallada en herramienta y portaherramientas para modelizado de temperatura en la intercara de corte.	III-57
Figura III-61: Comparación entre experimentación y simulación de temperaturas entre termopares colocados en la herramienta y máxima temperatura obtenida de la simulación de la intercara herramienta-viruta.	III-58
Figura III-62: Distribución temperatura en Inconel 718 con lubricación normal, 6 bar (arriba) y alta presión, 80 bar (abajo).	III-58
Figura III-63: Fuerzas de corte en Waspaloy, lubricación 6 bar y alta presión 80bar.	III-59
Figura III-64: Fuerzas de corte en Haynes 282, lubricación 6 bar y alta presión 80bar.	III-60
Figura III-65: Imagen virutas generada en diferentes pasadas y tipos de refrigeración.	III-61
Figura III-66: Patron deformación viruta en diferentes ensayos de lubricación	III-62
Figura III-67: Tamaño y forma viruta en Waspaloy. Lubricación 80 bar	III-63
Figura III-68: Tamaño y forma viruta en Haynes 282. Lubricación 80 bar....	III-63
Figura III-69: Herramienta. Imagenes SEM cara desprendimiento en lubricación 6 bar.	III-64

Figura III-70: Herramienta. Imagenes SEM cara desprendimiento en lubricación 80 bar.....	III-65
Figura III-71: Imagen SEM, vista general herramienta en lubricación convencional.....	III-65
Figura IV-1: Enfoque Capítulo IV.....	IV-1
Figura IV-2: Herramientas diseñadas para ensayo fátiga.....	IV-5
Figura IV-3: Muestra siendo escaneada con microscopio confocal.....	IV-6
Figura IV-4: Estado superficie de corte y microestructural para las tecnologías de corte.....	IV-8
Figura IV-5: Estado superficial y microestructura durante estrategia mecanizado asistido por ultrasonidos.....	IV-9
Figura IV-6: Tratamiento térmico aplicado al Inconel 718.....	IV-10
Figura IV-7: Perfil durezas antes del tratamiento térmico y después del mismo. Material Inconel 718 SGA.....	IV-11
Figura IV-8: Microestructura en estado solucionado.....	IV-11
Figura IV-9: Dimensiones probetas de fatiga.....	IV-12
Figura IV-10: Preparación material antes de cortar en diferentes tecnologías.....	IV-12
Figura IV-11: Distribución de probetas.....	IV-13
Figura IV-12: Esquema ensayo fátiga.....	IV-14
Figura IV-13: Ensayo fátiga terminada. Probeta obtenida mediante WEDM.....	IV-14
Figura IV-14: Carga, posición y curva tensión para una probeta fresada.....	IV-15
Figura IV-15: Herramienta fresado para extraer probetas de referencia.....	IV-16
Figura IV-16: Herramienta, set-up y máquina mecanizado asistido por ultrasonidos.....	IV-17
Figura IV-17: 14 probetas de fátiga para comparar mecanizado convencional y mecanizado asistido por ultrasonidos.....	IV-18
Figura IV-18: Probetas cortadas mediante AWJ y WEDM.....	IV-19
Figura IV-19: Probetas laser. No testeadas.....	IV-20
Figura IV-20: Matado aristas en probetas de fátiga.....	IV-20
Figura IV-21: Probetas de fátiga de diferentes tecnologías: fresado, AWJ y WEDM.....	IV-21

Figura IV-22: Muestras superficie obtenidas mediante AWJ, EDM, fresado convencional y fresado asistido por ultrasonidos.	IV-21
Figura IV-23: Topografía 3D de las superficies mecanizadas.....	IV-22
Figura IV-24: Valores rugosidad medio y desviación diferentes tecnologías.	IV-22
Figura IV-25: Medida dureza superficial.	IV-23
Figura IV-26: Resultados ensayos fátiga.....	IV-24
Figura IV-27: Imagenes SEM obtenidas x50 aumentos.....	IV-25
Figura IV-28: Micrografías SEM superficial de fractura, a 1.000x aumentos Fresado (a), AWJ (b), y 10.000x aumentos Fresado (c), AWJ (d).	IV-26
Figura IV-29: Medidas tensiones residuales.....	IV-27
Figura IV-30: Perfiles de tensiones residuales en dirección longitudinal de la muestra.....	IV-27
Figura IV-31: Resultados de fátiga comparados con las tensiones residuales. ...	IV-28

Índice de tablas

Tabla II-1: Influencia variables durante proceso de corte.	II-5
Tabla II-2. Resultado bruñido en Inconel 718.	II-55
Tabla III-1: Máquina utilizada.	III-4
Tabla III-2: Características Bomba Alta Presión	III-5
Tabla III-3: Características centro de mecanizado Kondia A6.	III-6
Tabla III-4: Características Centro Mecanizado Ibarria ZV25/U600.	III-6
Tabla III-5. Aleaciones testeadas, estado y tamaño de grano	III-15
Tabla III-6. Condiciones de contorno en herramienta para modelizar temperatura con diferentes estrategias de lubricación.	III-57
Tabla IV-1. Características centro de mecanizado Kondia A6.	IV-3
Tabla IV-2. Características máquina corte por agua y abrasivo AWJ.	IV-4
Tabla IV-3. Características máquina ONA AX3 WEDM.	IV-4
Tabla IV-4. Parámetros ensayos de fátiga.	IV-5
Tabla IV-5. Características perfilómetro tridimensional Leica DCM 3D.	IV-6
Tabla IV-6. Características microdurometro Future Tech FM-800	IV-7
Tabla IV-7. Composición química del material utilizado.	IV-10
Tabla IV-8. Condiciones de corte utilizadas para preparación de la chapa de Inconel 718.	IV-12
Tabla IV-9. Condiciones de corte de fresado.	IV-17
Tabla IV-10. Condiciones de corte para probetas de mecanizado.	IV-18

Nomenclatura

Acrónimos

SGA	Material tamaño Grano Pequeño y estado Envejecido (Small Grain Aged)
SGS	Material tamaño Grano Pequeño y estado Solucionado (Small Grain Solutioned)
LGA	Material tamaño Grano Grande y estado Envejecido (Large Grain Aged)
LGS	Material tamaño Grano Grande y estado Envejecido (Large Grain Solutioned)
HPC	Mecanizado asistido lubricación alta presión (High Pressure Cooling)
AWJ	Corte por agua y abrasivo (<i>Abrasive Water Jet</i>)
CAD	Diseño asistido por ordenador (<i>Computer Aided-Design</i>)
CAM	Fabricación asistida por ordenador (<i>Computer Aided-Manufacturing</i>)
UVAM	Mecanizado asistido por ultrasonido (Ultrasonic Vibration Assisted Milling)
EDM	Mecanizado por electroerosión (<i>Electrical Discharge Machining</i>)
WEDM	Mecanizado por electroerosión e hilo (<i>Wire Electrical Discharge Machining</i>)
LBM	Mecanizado por Laser (<i>Laser Beam Machining</i>)
PWJ	Corte por agua (<i>Water Jet</i>)
HAZ	Zona Afectada Térmicamente (Heat Affected Zone)
VAM	Mecanizado asistido por vibraciones
LMD	Laser Cladding (Laser Metal Deposition)

CAPÍTULO I

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1 Contexto tecnológico e industrial

El número de aviones aumentará considerablemente en los próximos 20 años, según el pronóstico de mercado global de Airbus (AGMF) [Airbus, 2015]. Para 2034 se estima que más de 38.000 aeronaves estarán en servicio. De estos, 19,000 son aviones nuevos necesarios para dar respuesta al crecimiento del sector, mientras que 13,000 serán sustituciones, lo que eleva a 32,000 los nuevos aviones que deben ser construidos (Figura I-1).

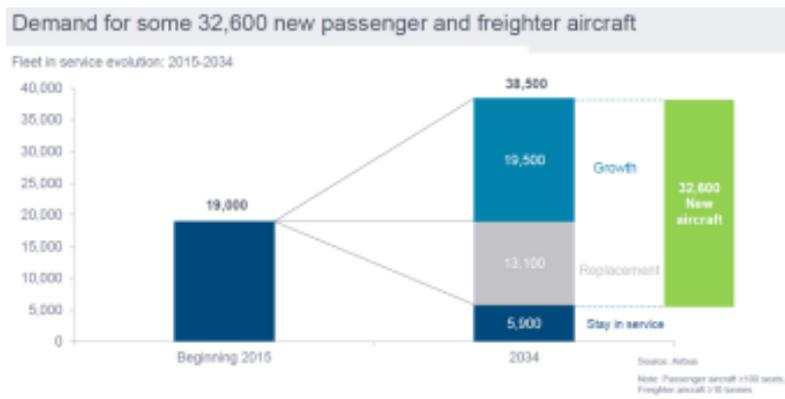


Figura I-1: Estimación número de aviones hasta 2034.

Esto conduce a una necesidad cada vez mayor de trabajar con materiales resistentes a altas temperaturas que son los comúnmente utilizados en los motores de los aviones. Las superaleaciones utilizadas en la industria aeroespacial, como los base níquel y las aleaciones de titanio, se emplean generalmente debido a su combinación única de propiedades como alta resistencia a elevadas temperaturas, resistencia a la degradación química y resistencia al desgaste.

Hoy en día, la fabricación de piezas de motor se hace únicamente mediante el uso de métodos convencionales de mecanizado (por ejemplo, fresado, torneado, rectificado) que obtienen la pieza partiendo de material principalmente forjado en diferentes formatos. Dado que el mecanizado convencional de súper aleaciones de alta resistencia (HRSA) esta bien estudiado, es posible conseguir piezas finales con altos requisitos de integridad superficial (por ejemplo, acabado superficial, microestructura, perfil de esfuerzos residuales). Sin embargo, en el mecanizado convencional, no es posible eliminar mucho material porque alto ratios de eliminación de material (MRR) están vinculadas con altas velocidades que hacen que una alta densidad de energía fluya de la pieza a través de la interfaz herramienta-pieza,

causando problemas de inestabilidad en el mecanizado. Por lo tanto, es necesario seleccionar un ratio de arranque de material bajo a la hora de mecanizar superaleaciones (HRSA) de manera convencional, con el objetivo de asegurar los requisitos de integridad de las piezas. Aunque se están desarrollando continuamente nuevos materiales y geometrías de herramientas con el objetivo de aumentar la productividad, con este enfoque solo se pueden esperar pequeños incrementos del ratio de arranque de material. Este concepto de ratio de arranque o MRR se muestra en la Figura I-2.

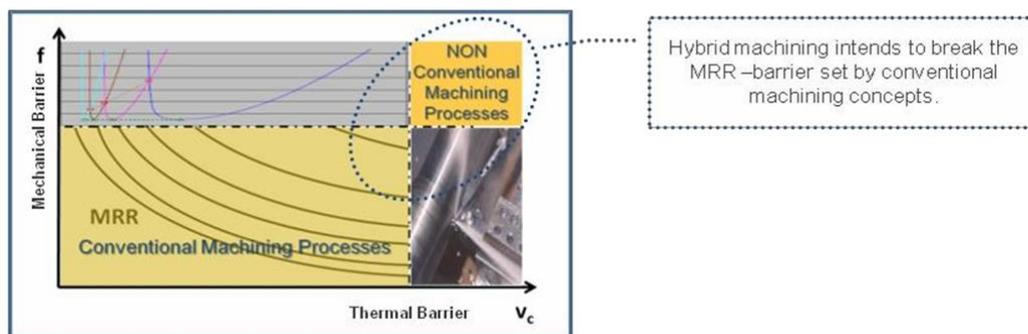


Figura I-2: Límite MRR, depende del límite térmico y de límite mecánico..

Los métodos de mecanizado no convencionales, como tecnología de corte por agua y abrasivo (AWJ), corte por laser, o los procesos de mecanizado a alta velocidad asistidos por calor o asistidos por ultrasonidos, representan una alternativa para un rendimiento más productivo que los métodos convencionales, ya que muestran una mayor tasa de arranque de material. Sin embargo, dado que estos métodos se caracterizan por una aplicación localizada de la energía generada por el proceso, su capacidad para proporcionar los requisitos de integridad superficial de los componentes hechos con superaleaciones aún no se ha validado.

Además de aumentar la productividad, aún más importante es asegurar la integridad superficial y la resistencia a fátiga de los componentes. Aumentar la productividad e incrementar las opciones de fabricación no sirve de nada si no se alcanzan las propiedades metalúrgicas y mecánicas de las piezas.

Esta es la reflexión lanzada por el programa Clean-Sky JU (**JTI-CS-2013-01-SAGE-02-033**) bajo el título “**High Speed metallic material removal under acceptable surface integrity for rotating frame (HIMMOVAL)**” con el objetivo de investigar métodos alternativos de fabricación que permitan incrementar la fabricación de motores aeronáuticos.

Los resultados generados permitirán una selección óptima de los procesos de arranque junto con sus parámetros bajo estrictos requisitos de integridad superficial para superaleaciones.

Los objetivos perseguidos por el programa Clean-Sky con el proyecto Himmoval, son los siguientes:

- 1) Dentro de los métodos convencionales de mecanizado, desarrollar nuevo conocimiento sobre mecanizado en diferentes aleaciones base níquel (Inconel 718, Waspaloy y Haynes 282)
- 2) Dentro de los métodos no convencionales de mecanizado, el objetivo es desarrollar diferentes tecnologías y analizar las propiedades sobre una aleación base níquel. Las tecnologías por investigar son las siguientes:
 - a. Corte por hilo (Wire Electron Discharge Machining (*WEDM*))
 - b. Corte por agua y abrasivo (Abrasive Waterjet (*AWJ*))
 - c. Corte por Laser (Laser Beam (*LB*))
 - d. Mecanizado Asistido por Ultrasonidos (Ultrasonic Vibration Assisted Milling (*UVAM*))

El consorcio HIMMOVAL esta formado por:

Aeronautic Industry (Topic Manager) - **GKN Aerospace**
Sweden



Research organisation (Coordinator) - **Tecnalia R&I**
Spain



University of Basque Country **UPV/EHU** -
Spain



Small-Medium Enterprise - **GeonX**
Belgium



Clean Sky Joint Undertaking - **Call SP1-JTI-CS-2013-01**



2 Planteamiento del Trabajo de Tesis Doctoral. Objetivos

En el presente trabajo de investigación, se ha planteado el objetivo de desarrollar un nuevo concepto de alta tasa de arranque de material metálico para la fabricación de componentes típicos de motores hechos mediante superaleaciones base níquel, combinando métodos de mecanizado no convencionales, como son, la tecnología de corte por agua y abrasivo (AWJ), , y el mecanizado convencional optimizado (Figura I-3). Además, se abordará la viabilidad de una mejora en la tasa de arranque de material cuando se utilizan estrategias de mecanizado convencional mediante estrategias de mecanizado a alta presión o mecanizado asistido por ultrasonidos. Los resultados generados permitirán una selección óptima de los procesos de arranque junto con sus parámetros según los estrictos requisitos de integridad superficial de los componentes del motor. Las principales características del concepto de alta tasa de arranque a ser desarrollado serán:

- ✓ Alta productividad a través de grandes capacidades de arranque de material mediante tecnologías no convencionales, AWJ, combinadas con altas tasas de tratamiento de superficie de LPB, así como datos de productividad optimizados sobre la maquinabilidad HRSA.
- ✓ Un menor coste derivado de los métodos seleccionados de mecanizado no convencionales (AWJ, WEDM) y mejora propiedades del material mediante postprocesados (LPB) que se incluirán en la secuencia de procesos.
- ✓ Generación de extensos datos experimentales sobre mecanizado convencionales y no convencionales para arranque de viruta de los materiales comúnmente utilizados en los motores de los aviones.
- ✓ Identificación a través de la monitorización de esas variables críticas (por ejemplo, temperatura del proceso, fuerzas del proceso) que afectan a la integridad superficial del componente cuando se utilizan métodos de mecanizado.
- ✓ Correlacionar las propiedades de las superaleaciones HRSA con los datos de maquinabilidad.

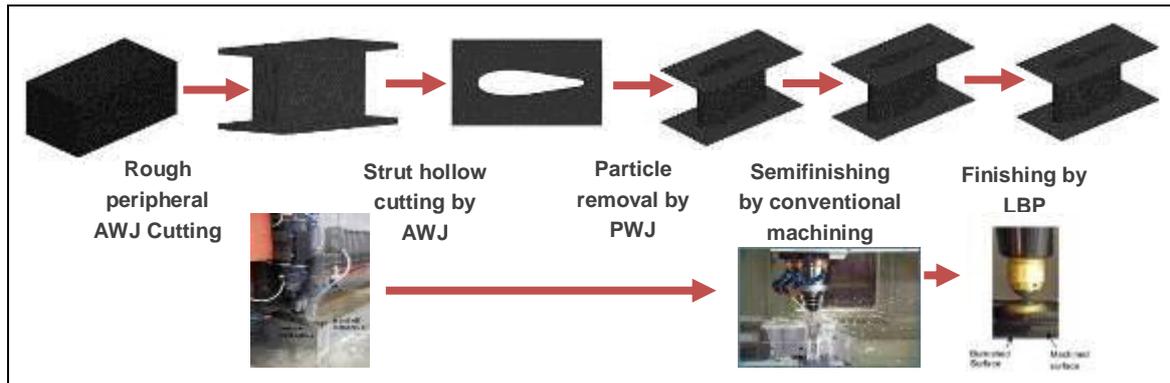


Figura I-3. Fabricación mediante combinación tecnologías No convencionales y convencionales.

La oportunidad de generar nuevo conocimiento alrededor de los materiales base níquel, el presente trabajo ha tenido dos fines claros:

1. Generar mayor conocimiento en el mecanizado convencional en diferentes aleaciones base níquel (Inconel 718, Waspaloy y Haynes 282),
2. Estudiar el impacto de tecnologías no convencionales (AWJ, WEDM) en la integridad superficial y resistencia a fatiga del Inconel 718 como métodos alternativos para la fabricación de piezas de motor.

Desde un punto de vista tecnológico, los objetivos concretos que ha perseguido este trabajo son:

1. Estudio operación de refrentado radial como operación de mecanizado convencional que permita comparar diferentes aleaciones, estados y tamaño de grano y poder correlacionar estos ensayos con la maquinabilidad del material y su impacto en la vida de la herramienta. Hacer extensivo este estudio al caso de lubricación normal (6bar) y lubricación a alta presión (80bar)
2. Adquisición de señales del proceso, fuerza, desgaste y temperatura durante la operación de refrentado radial que permitan detectar anomalías durante el proceso de mecanizado,
3. Estudiar la superficie generada en Inconel 718 después de ser mecanizada utilizando tecnologías no convencionales y evaluar su resistencia a fatiga.

3 Organización del Trabajo de Tesis Doctoral

Con el fin de abordar de una manera estructurada los objetivos tecnológicos que se han presentado en el apartado anterior, el presente trabajo de Tesis Doctoral se ha estructurado de la siguiente manera:

1. En el primer capítulo se ha presentado el contexto tecnológico e industrial asociado al desarrollo de nuevos procesos de fabricación alrededor de los materiales base níquel.
2. En el segundo capítulo, en primer lugar, se realiza una descripción de los materiales base níquel o materiales de alta resistencia utilizados principalmente en el sector aeronáutico. A continuación, se realiza una revisión de las diferentes tecnologías aplicadas en el mecanizado convencional de los materiales mencionados, incluyendo diferentes estrategias de lubricación y métodos asistidos para mejorar productividad del proceso de mecanizado. En este capítulo se muestran los diferentes estudios realizados sobre tecnologías no convencionales como alternativas al mecanizado convencional. Por último, se incluye un análisis sobre diferentes métodos de postprocesados con el objetivo de mejorar la integridad superficial de los materiales mecanizados.
3. En el tercer capítulo se realiza un estudio detallado sobre el refrentado radial en diferentes aleaciones base níquel (Inconel 718, Waspaloy y Haynes 282), teniendo en cuenta el estado del material y tamaño de grano después de los tratamientos térmicos aplicados. Dentro de este estudio se han comparado el impacto de las diferentes aleaciones en el desgaste de la herramienta (desgaste de flanco y notch) en condiciones de lubricación normal y lubricación a alta presión (80bar).
4. En el cuarto capítulo se estudian y analizan diferentes tecnologías no convencionales como alternativa para el mecanizado de Inconel 718. En este estudio se ha abordado, el impacto de utilizar mecanizado asistido por ultrasonidos, tecnología corte por agua y abrasivo (AWJ) y tecnología corte por hilo (WEDM) y su impacto sobre la integridad estructural del Inconel 718, correlacionando, rugosidad superficial, dureza y tensiones residuales con su vida a fátiga
5. En el quinto y último capítulo se presentan las principales aportaciones que realiza este trabajo de investigación sobre el estado del arte, así como las líneas de investigación que se abren con el mismo de cara al futuro

En el esquema de la Figura I-4, se resume el alcance de la tesis. Las líneas de investigación planteadas se centran en mejorar los procesos productivos

actuales, por un lado, incluyendo nuevas aleaciones base níquel e incrementando la vida de la herramienta utilizando lubricación a alta presión (CAPÍTULO III). Por otro lado, para poder aumentar la cadena de proveedores para dar respuesta al crecimiento en el sector aeronáutico, es necesario estudiar opciones diferentes al mecanizado convencional a través de tecnologías de alta energía de arranque. Este tipo de tecnologías, maduras en otras aplicaciones y sectores, necesitan validarse a nivel de integridad superficial antes de poder certificarse como alternativas para el mecanizado de componente de motor aeronáutico (CAPÍTULO IV)

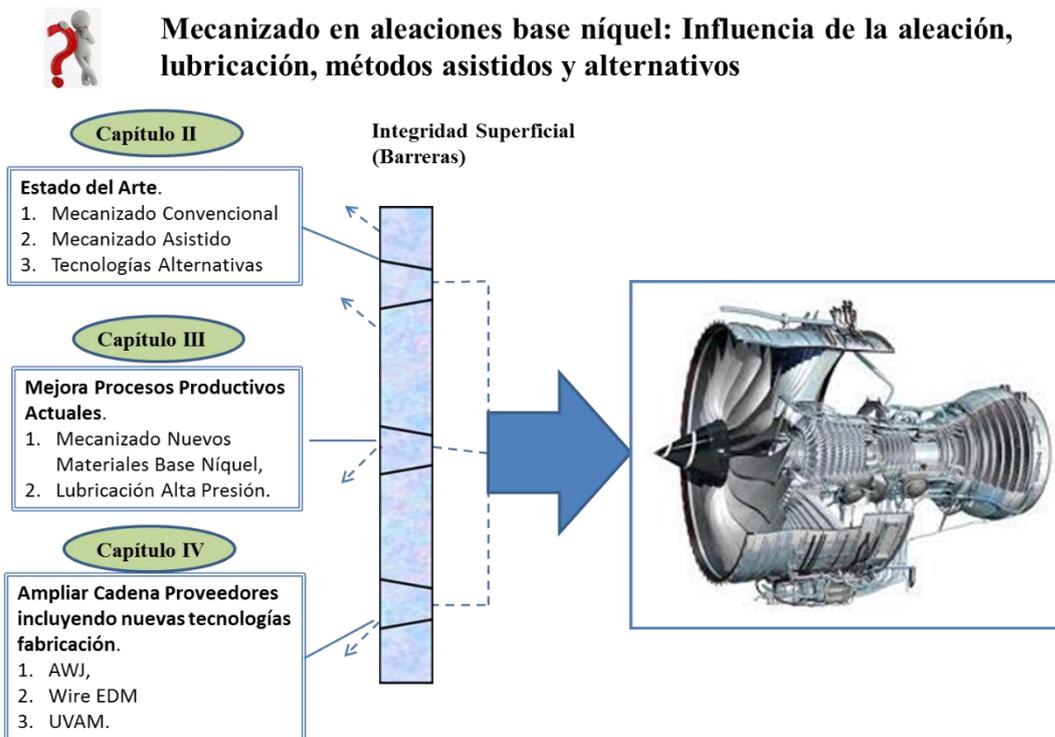


Figura I-4. Esquema y enfoque tesis.

CAPÍTULO II

CAPÍTULO II: ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se presenta el estado del arte relacionado con los materiales base níquel y su mecanizado. En primer lugar, se realiza una descripción de los materiales base níquel o materiales de alta resistencia utilizados principalmente en el sector aeronáutico. A continuación, se realiza una revisión de las diferentes tecnologías aplicadas en el mecanizado convencional de los materiales mencionados, incluyendo diferentes estrategias de lubricación y métodos asistidos para mejorar la productividad del proceso de mecanizado. En este capítulo también se muestran los diferentes estudios realizados sobre tecnologías no convencionales como alternativas al mecanizado convencional. Por último, se incluye un análisis sobre diferentes métodos de postprocesados con el objetivo de mejorar la integridad superficial de los materiales mecanizados.

1 Introducción

La industria aeroespacial se encuentra dentro de las industrias más demandantes de materiales con altas prestaciones. Los materiales utilizados en la construcción de aeronaves deben soportar elevadas cargas de trabajo y condiciones adversas, tanto las estructuras como los motores, exigiéndoles que se mantengan inalterables durante su vida útil siendo sometidos a elevadas exigencias mecánicas y muy altas temperaturas.

Los materiales más innovadores se encuentran localizados en los motores de los aviones, los cuales tienen que trabajar bajo severas condiciones de altas cargas, altas temperaturas y ambiente hostil con gran tendencia a la oxidación. Los materiales más comunes encontrados en los motores son los conocidos como superaleaciones, aunque también existen otros muchos como aceros o aleaciones de titanio. Entre las superaleaciones, las base níquel suponen el 50% en los motores de avión [Ezugwu, 2003], debido a su comportamiento inalterable contra la corrosión en ambientes agresivos, resistencia mecánica y fatiga térmica, creep y resistencia entre otros. Estas excepcionales propiedades hacen más complicado su mecanizado, razón por la cual son descritos como materiales difíciles de mecanizar [Ezugwu, 1999].

Entre las razones de su pobre maquinabilidad, se encuentran las siguientes:

- Rápido endurecimiento del material durante el mecanizado, común en materiales con matriz austenítica como las aleaciones base níquel. [Ezugwu, 2003].

- Los carburos abrasivos duros se originan generalmente en los bordes de grano debido a elementos como el tungsteno y el molibdeno, compuestos muy duros que causan una abrasión severa en el inserto de la herramienta.
- Baja conductividad térmica que causa concentración de temperaturas en la herramienta, originando problemas de difusión en la misma
- Relacionado con esas altas temperaturas, el problema del filo recrecido debido a la alta soldabilidad de estas superaleaciones con el material de la herramienta que puede causar rotura de la misma.

Los problemas identificados son líneas de investigación abiertas desde hace muchos años, especialmente las relativas a la selección del material y recubrimientos de las herramientas de corte, y estrategias de lubricación durante el mecanizado.

Respecto a las estrategias de refrigeración, varias líneas de investigación están abiertas como alternativas a los métodos tradicionales de lubricación, especialmente estrategias de Mínima Cantidad de Lubricante (MQL, siglas en inglés Minimum Quantity of Lubricant), estrategias de alta presión (HPC, siglas en inglés High Pressure Cooling) o estrategias de refrigeración criogénica con LN_2 y CO_2 . Machado y Wallbank [Machado, 1994] estudiaron estrategias de alta presión durante el mecanizado de Ti6Al4V y aleación 901 con una presión de refrigeración de 14.5 MPa dirigido a la cara de incidencia frente a estrategias convencionales de refrigeración. Encontraron que la vida de la herramienta aumentaba en el mecanizado de las aleaciones de titanio, pero estas mejoras eran despreciables cuando se mecanizaban aleaciones base níquel.

Por otro lado, Vagnorius y Sørby [Vagnorius, 2011] afirman que las estrategias de refrigeración a alta presión han sido satisfactorias con insertos de carburo, aumentando la vida de la herramienta. Estos mismos autores también han testeado insertos cerámicos SiAlON con resistencia mejorada al desgaste de notch durante el mecanizado de Inconel 718 comparando estrategia de alta presión frente a estrategias de refrigeración convencional. Observaron que no aumenta el desgaste de notch y además observaron que el desgaste de flanco se había reducido gracias a los beneficios obtenidos por la rotura de la viruta.

Las estrategias de alta presión mejoran los procesos de torneado debido a su capacidad para deformar la viruta ganando acceso a la zona de corte, lo que resulta en una zona más pequeña de contacto entre pieza-herramienta y

equivale a una reducción de temperatura y fuerzas en la zona de corte. Este fenómeno fue observado por Ezugwu y Bonney [Ezugwu, 2004] que mecanizaron Inconel 718 con herramientas de carburo a velocidades de hasta 50m/min utilizando tanto estrategias de lubricación convencional como diferentes niveles de alta presión hasta alcanzar un máximo de 203 bar. Encontraron que mantenían acabados superficiales aceptables mejorando la vida de la herramienta con alta presiones de lubricación.

No hay duda de que los procesos de mecanizado más investigados de las aleaciones de alta temperatura se han realizado utilizando lubricación, sin embargo, como sugieren algunos autores, el mecanizado sin lubricación puede conseguir calidad e integridad superficial comparable a las obtenidas con lubricación si se utilizan condiciones de corte optimizadas. Devillez et. al. [Devillez, 2007], [Devillez, 2011], demostraron realizando pruebas de torneado con lubricación y sin lubricación a diferentes velocidades de corte, con condiciones de semiacabado (0,5 mm de profundidad de corte y 0,1 mm/velocidad de avance) y utilizando una herramienta de carburo recubierto que se pueden conseguir calidades e integridad superficial equiparable en ambos casos.

2 Materiales Base Níquel

Las aleaciones base níquel son ampliamente usadas dentro del sector aeroespacial para la fabricación de componentes de turbinas, en el sector automoción dentro de los motores, en plantas eléctricas y en aplicaciones de alta temperatura. Aleaciones base níquel, forman parte de los materiales conocidos como difíciles de mecanizar, grupo S (naranja) según clasificación ISO de materiales junto a las aleaciones de Titanio.

El mecanizado de Inconel 718 supone bajas velocidades de corte por un lado y rápido desgaste de herramienta por otro, lo que resulta en largos tiempos de mecanizado y altos costes de fabricación. Las virutas que se generan durante el mecanizado normalmente son cintas alargadas en forma de maraña.

Por otro lado, las altas temperaturas y las cargas en el filo de la herramienta llevan a astillar el filo; Finalmente la presión de corte específica supera los 3000 N/mm². Ezugwu [Ezugwu, 2005] presentó una visión general de los principales avances en las técnicas de mecanizado para las superaleaciones base níquel y titanio. Una buena comprensión de los materiales de la herramienta de corte, las condiciones de corte, el tiempo de procesamiento y la funcionalidad del componente mecanizado conducirá a un mecanizado eficiente y económico. Diferentes técnicas de mecanizado asistido (asistidas por alta presión, asistidas

térmicamente...) han demostrado aumentar la productividad, por lo tanto, un menor costo de fabricación, sin efectos adversos en el acabado superficial, la integridad superficial, la circularidad y la variación de la dureza del componente mecanizado. La aplicación de nuevas técnicas y los materiales de herramientas de corte recientemente desarrollados en el mecanizado base níquel y las aleaciones de titanio han dado como resultado un aumento de varias veces en la vida de la herramienta sin comprometer el acabado superficial y la integridad de los componentes mecanizados. Estas mejoras se pueden lograr reduciendo las temperaturas generadas en la interfaz y alterando la forma de la viruta de formas continuas a discontinuas y segmentadas. Las aleaciones que son difíciles de cortar a temperatura ambiente pueden mecanizarse fácilmente a una temperatura elevada, hasta un nivel óptimo de temperatura, utilizando principios de mecanizado en caliente. La técnica de mecanizado híbrido que combina por un lado calentamiento de la pieza y por otro lado, lubricación criogénica de la herramienta de corte demuestra gran potencial para mejorar el mecanizado de las aleaciones base níquel y titanio.

Olovsjö et al. [Olovsjö, 2010-a], [Olovsjö, 2010-b], [Olovsjö, 2012] estudiaron el efecto del tamaño de grano en Inconel 718 forjado y Waspaloy sobre el desgaste de las herramientas de carburo cementado en su comportamiento de maquinabilidad, demostrando que el desgaste de flanco y notch están directamente relacionados con la dureza y el tamaño de grano respectivamente. S. Cedergren et al. [Cedergren, 2013], presentaron un trabajo completo en el que la influencia del tratamiento térmico del material de trabajo en la formación de viruta, al mecanizar Ti-6Al-4V. Se investigaron tres microestructuras diferentes; Equiaxed, bimodal y Widmanstätten, a través de la investigación microestructural de virutas, así como la respuesta sobre fuerzas de corte y emisión acústica. Los resultados de esta investigación subrayan la importancia de considerar la microestructura del material de trabajo cuando se estudia el proceso de formación de viruta y su impacto en las fuerzas de corte y la emisión acústica, al mecanizar Ti-6Al-4V.

Ana E. Bonilla et al [Bonilla, 2015-a], [Bonilla, 2016] presentaron un estudio sobre la combinación de un modelo de desgaste de herramientas y curvas de MRR, asumiendo una profundidad de corte constante. Estas curvas (Figura II-1) permitirán al planificador del proceso ajustar los datos de corte para optimizar la capacidad de la herramienta con respecto a la tasa de arranque y al volumen total de material que se eliminará en la pieza durante la vida de la herramienta de corte. Los resultados mostraron que es posible obtener un rango limitado de parámetros de corte desde donde el programador CAM puede seleccionar los datos de corte asegurando ambos objetivos.

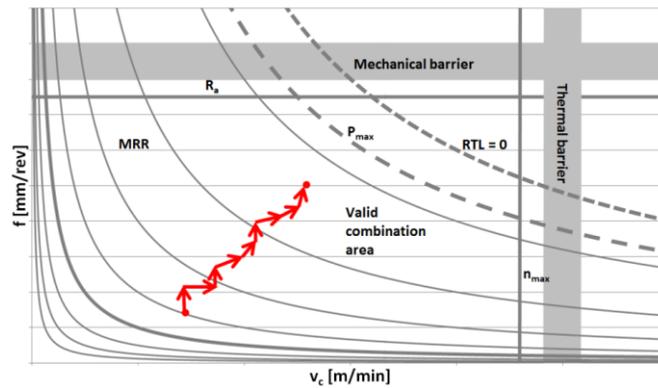


Figura II-1: Curvas con constante MRR para diferentes valores de velocidad avance y velocidad de corte.

Las tres principales variables que influyen en el proceso de corte [Bonilla, 2015-b] son la velocidad de corte, el avance y la profundidad de corte, que constituyen los datos de corte. Otras variables que influyen son el material a mecanizar; la aplicación de fluido de corte y su presión considerada como condiciones de refrigerante; y la herramienta de corte, incluido el material de la herramienta, la geometría de la herramienta y el radio de la punta. La Tabla II-1 resume cómo las tres variables principales influyen de manera positiva o negativa en el valor de por ejemplo, velocidad de arranque de material, longitud de viruta, tiempo de mecanizado, área de corte, desgaste de la herramienta, vida útil de la herramienta, fuerzas de corte, potencia de corte, temperaturas generadas y rugosidad superficial alcanzada. (↑) representa una influencia positiva, (↓) representa una influencia negativa y (-) representa ninguna influencia.

	Datos de Corte:		Herramienta:		Otros:		Exigencias de la superficie:			
	Tasa de arranque de material	Longitud de la viruta	Tiempo de mecanizado	Área de corte	Desgaste Herramienta	Vida de la herramienta	Fuerzas de corte	Potencia de corte	Temperatura generada	Ra (Rugosidad superficial)
Datos de Corte:										
Velocidad de Corte	↑	-	↓	-	↑	↓	-	↑	↑	-
Avance	↑	↓	↓	↑	↑	↓	↑	↑	↑	↑
Profundidad de Corte	↑	-	-	↑	↑	↓	↑	↑	↑	-

Tabla II-1: Influencia variables durante proceso de corte.

✓ Haynes 282

La aleación Haynes 282 es una superaleación forjada de base níquel, desarrollada en 2005, para aplicaciones estructurales de alta temperatura, inicialmente aplicada a aplicaciones aeronáuticas [Buckson, 2012], aunque la naturaleza de las aplicaciones de Haynes 282 lo hace susceptible a la fatiga. Entre los fallos se encuentran la fatiga de ciclo bajo (LCF) controlada por tensión y el crecimiento de grietas por fatiga (FCG) [Boehlert, 2011]. Posee una combinación única de resistencia a la fluencia, estabilidad térmica, soldabilidad y capacidad de fabricación que no se encuentra en las aleaciones comerciales disponibles actualmente como Inconel 718 o Waspaloy. Las aleaciones base níquel son un miembro del grupo de materiales difíciles de cortar [Thakur, 2015].

Un atributo clave de la aleación HAYNES 282 es su lenta velocidad de precipitación gamma-prime, que es altamente deseable para mejorar la capacidad de fabricación por dos razones principales. Uno, la formación de gamma-prime durante el tratamiento térmico es un factor clave en el craqueo por deformación. Dos, deja tiempo suficiente para que la aleación se enfríe después del recocido de la solución sin la formación de la fase gamma prime, lo que reduciría la capacidad de conformado en frío [Haynes International].

Como una superaleación en base níquel, la Haynes 282 tiene una matriz austenítica (γ) cúbica centrada en la cara y está endurecida principalmente por gamma prime (γ'). La aleación también contiene pequeñas cantidades de carburos diversos. Los carburos pueden proporcionar cierto grado de fortalecimiento de la matriz, particularmente en las superaleaciones en base cobalto, y son necesarios para el control del tamaño de grano en algunas aleaciones forjadas. Los carburos encontrados en las superaleaciones cumplen tres funciones principales. Primero, los carburos generados alrededor del grano, cuando se forman correctamente, fortalecen el límite del grano, actuando como barreras para el movimiento de las dislocaciones, previniendo o retardando el deslizamiento del límite del grano, y permiten la relajación de tensiones. Segundo, si los carburos finos se precipitan en la matriz, proporcionan mejores resultados de carga. Tercero, los carburos pueden atar ciertos elementos que de otra manera promoverían la inestabilidad durante el servicio. Una particularidad del Haynes 282 es el alto porcentaje de molibdeno (> 6% en peso) que forma carburos M₆C a temperaturas entre 815°C y 870°C. M₆C, que tiene una estructura cúbica compleja, estos carburos son más estables a altas temperaturas [Donachie, 2002].

Las características de la aleación HAYNES 282 lo hacen adecuado para aplicaciones críticas de turbinas de gas, como la fabricación de láminas, anillos sin soldadura y de soldadura rápida a tope, y cajas que se encuentran en compresores, cámaras de combustión y secciones de turbinas, Figura II-2. En las turbinas de los aviones, la nueva aleación será útil para los componentes de escape y boquilla. En las turbinas de gas terrestres, la aleación HAYNES 282 es un buen candidato para las secciones de transición y otros componentes de la ruta de gas caliente.

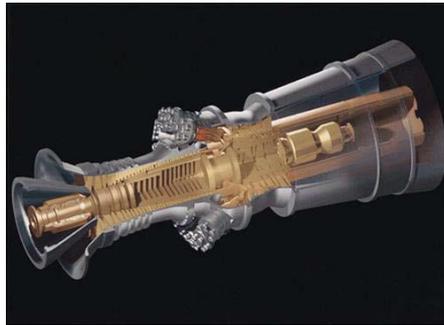


Figura II-2: Haynes282 desarrollado específicamente para aeronáutica.

Actualmente, no hay información disponible sobre la maquinabilidad del material y el comportamiento del desgaste de la herramienta en las aplicaciones de corte de la superaleación Haynes 282 recientemente desarrollada [Hood, 2011]. Por lo tanto, entre los objetivos del presente trabajo, hay una prueba sistemática para estudiar las características de desgaste de la herramienta y las fuerzas durante las operaciones de torneado en la superaleación Haynes 282.

3 Mecanizado Convencional

3.1 Mecanizado Alta Velocidad

López de Lacalle et al. [López de Lacalle, 2000-a] investigaron en el mismo proyecto posibles aspectos de mejora en el corte de viruta de dos aleaciones que se utilizan con frecuencia en la industria aeroespacial, la aleación basada en titanio alfa-beta Ti6Al4V y la aleación de níquel generalmente conocida como tipo 718. Ambas aleaciones son ampliamente utilizadas en la fabricación de diferentes partes de turbo motores, considerando sus excelentes características mecánicas y su resistencia a altas temperaturas. Estas aleaciones, sin embargo, son extremadamente difíciles de fresar, debido a diferentes factores. Por este motivo, su fresado, taladrado y torneado se realizan a velocidades y avances muy bajos. La influencia de la geometría y el

revestimiento de la herramienta, y de los parámetros del proceso (es decir, la velocidad de corte, avance por diente y la profundidad del corte radial), se investigó para aumentar la productividad del proceso de fresado [López de Lacalle, 2000-a]. Las condiciones de corte resultantes de este estudio demostraron tener éxito en aumentar la eficiencia en el fresado de piezas hechas de estos materiales. [López de Lacalle, 2000-a] [López de Lacalle, 2000-a].

Beranoagirre [Beranoagirre, 2011] muestra los resultados del fresado de tres aleaciones diferentes de aluminio y titanio de la denominada gamma TiAl (o aluminas de titanio). Estas aleaciones se solidifican en la fase gamma, siendo este un caso poco común en los materiales industriales. Este tipo de aleación de titanio presenta propiedades mecánicas mejoradas incluso a altas temperaturas, la relación entre resistencia-peso y resistencia-baja corrosión es mayor que las aleaciones de titanio de tipo alfa-beta más conocidas. Sin embargo, una falta absoluta de recomendaciones para los parámetros de mecanizado está retrasando mucho el uso de gamma TiAl en aplicaciones de automoción y aeronáuticas. Este trabajo presenta los principales resultados de un largo programa de pruebas en tres aleaciones, con diferentes campos de aplicación. La principal conclusión es que son materiales difíciles de cortar, incluso más difíciles de mecanizar que las aleaciones de titanio. Además, después de la prueba, se obtuvieron el desgaste de flanco y el tiempo de corte efectivo con diferentes condiciones de corte. La conclusión fue que la velocidad de corte tiene la influencia principal en la durabilidad de las herramientas de fresado final. Un pequeño aumento en el valor de este parámetro reduce enormemente la vida útil de la herramienta. Los valores obtenidos se pueden aplicar directamente en aplicaciones industriales donde el mecanizado es la operación principal. [Beranoagirre, 2011]

Calleja et al. [Calleja, 2013], considerando la demanda existente de mejores tecnologías de fabricación, desarrollaron un caso de estudio basado en operaciones de acabado Inconel 718 para mejorar las estrategias de fabricación basadas en las fuerzas de mecanizado durante el mecanizado. Sin embargo, para realizar esto, fue necesario desarrollar un modelo estático para la predicción de fuerzas de mecanizado y validarlo con las fuerzas de mecanizado reales medidas durante el proceso. En esta investigación se muestra un modelo de predicción de fuerzas para las herramientas de fresa de punta cónica. Para la geometría de la herramienta y el material de la pieza dados, los resultados experimentales muestran que existe una correspondencia entre las fuerzas predichas y las fuerzas reales medidas.

Urbicain et al. [Urbicain, 2013] enfrentaron el problema de definir gráficos de estabilidad al cortar Inconel 718. El método predice las zonas libres de vibración en la vibración longitudinal cuando la herramienta vibra en la dirección tangencial. Este caso puede ocurrir en casos de torneado longitudinal cuando el portaherramientas debe sobresalir largas distancias. El estudio propuso un modelo dinámico 1/2DOF para implementar el efecto del modo tangencial en la regeneración de virutas en el plano regenerativo basado en obtener experimentalmente un factor de desplazamiento dinámico. Los resultados experimentales validaron el modelo de fuerza desarrollado que, por lo tanto, proporciona un enfoque fiable para obtener condiciones libres de chatter.

En los casos de chatter debido a los modos en dirección tangencial, el efecto de la velocidad de corte es incluso más pronunciado que en otros casos de torneado donde el desplazamiento relativo de la herramienta de trabajo tiene lugar en el plano regenerativo XZ del espesor de viruta. De hecho, puede llevar a diferencias de hasta el 500% en la profundidad de corte admisible. Sin embargo, el corte a altas velocidades de corte conducirá a un mayor desgaste de la herramienta. Por lo tanto, se debe mantener un compromiso entre la velocidad de corte y la profundidad de corte. Se ha observado que, a pesar de que la herramienta SNMG tenía valores más altos de rigidez y amortiguación que la herramienta VBMT, el límite crítico a bajas velocidades de corte no supone ningún beneficio.

Campa et al. [Campa, 2007] informaron sobre un modelo dinámico tridimensional para el cálculo de los lóbulos de estabilidad de las partes de baja rigidez que se aplica para la predicción de vibraciones durante el fresado de acabado de las piezas aeronáuticas que incluyen paredes delgadas y espesores finos. Por lo tanto, se puede hacer una selección precisa tanto de la profundidad de corte axial como de la velocidad del husillo. Se aplicó la siguiente metodología: primero, se realiza un análisis modal del dispositivo, en segundo lugar, se calculan los lóbulos de estabilidad; finalmente las pruebas de fresado validan el enfoque. Los diagramas de lóbulos obtenidos para las paredes delgadas son precisos, definiendo un límite aproximado de estabilidad.

3.2 Monitorización Proceso

López de Lacalle et al. [López de Lacalle, 2006] mostraron una herramienta de diagnóstico para el mecanizado de piezas complejas (con características similares a las piezas reales). El sistema genera mapas espaciales de las fuerzas de corte, medidos en tiempo real durante el mecanizado, lo que permite

un mayor análisis de causa-efecto offline (Figura II-3). Este enfoque genera más información que las pruebas de mecanizado lineal clásico, en las que las fuerzas solo se registran en función del tiempo, perdiendo su relación con la geometría de la pieza. Se mostraron tres casos de estudio para las aplicaciones de esta herramienta de diagnóstico, en la que aparecen problemas de corte conocidos. También se pueden detectar otros problemas, como zonas de material no homogéneo, relacionadas con el mecanizado de cavidades profundas o el corte interrumpido.

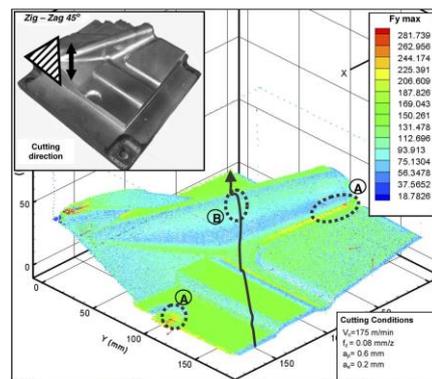


Figura II-3: Mapa fuerzas reales durante el superacabado de un troquel de estampación.

Lamikiz [Lamikiz, 2004] propuso un modelo que puede estimar las fuerzas de corte en superficies inclinadas mecanizadas tanto para fresado ascendente como descendente (Figura II-4 y Figura II-5). Se desarrolló un modelo semi-mecánico que calcula las fuerzas de corte basándose en un conjunto de coeficientes que dependen del material, la herramienta, las condiciones de corte, la dirección de mecanizado y la pendiente de la superficie.

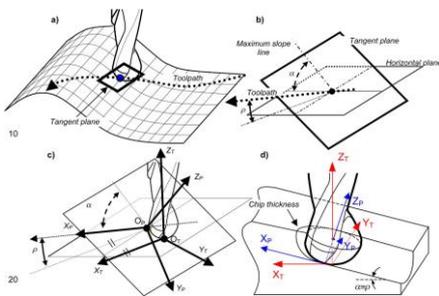


Figura II-4: Definición sistema referencia herramienta y pieza.

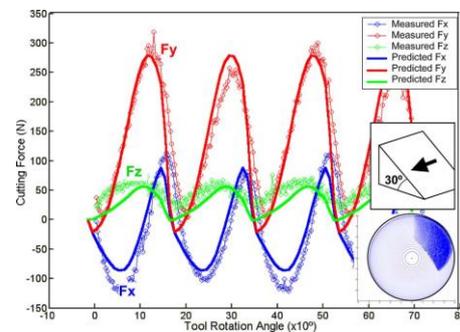


Figura II-5: Fuerzas medidas y estimadas en un mecanizado transversal.

Rivero [Rivero, 2008] evaluó la idoneidad de un sistema de control de desgaste de herramientas basado en señales internas de máquinas herramienta. Mostró un procedimiento de monitorización sin sensores para el fresado en seco y de

alta velocidad de aleaciones de aluminio aeroespaciales. Los experimentos de alta velocidad en seco se realizaron utilizando piezas de aluminio Al 7075-T6. Los datos del sensor de las señales internas se compararon y analizaron, evaluando la desviación en variables representativas en los dominios de tiempo y frecuencia. El análisis de la señal confirmó la relevancia de las señales de fuerza de corte para el control del desgaste de la herramienta en el fresado a alta velocidad de aleaciones de aluminio.

4 Mecanizado Asistido

Las aleaciones base níquel son ampliamente utilizadas para componentes aeroespaciales y de turbinas, piezas automotrices de alto rendimiento como turbocompresores y válvulas, componentes para centrales eléctricas y para varias aplicaciones de alta temperatura. En estrecha relación con las propiedades inherentes a las aleaciones, tales como alta resistencia a altas temperaturas y resistencia a la deformación, son aleaciones de baja maquinabilidad y causan altas fuerzas de corte durante la mayoría de los procesos de corte de metal estándar y, por consiguiente, demuestran altas tasas de desgaste incluso durante el mecanizado ligero. Por lo tanto, el grupo de materiales referidos como "aleaciones base níquel" se incluyen en la llamada familia de materiales difíciles de cortar, formando parte del grupo ISO S (naranja) junto con las aleaciones de titanio [Dudzinski, 2004], [Choudhury, 1998], en los que la fuerza de corte específica alcanza y supera los 3.000 N/mm². El mecanizado de las aleaciones de alta temperatura requiere una baja velocidad de corte y siempre provoca un desgaste agresivo de las herramientas, lo que resulta en largos tiempos de mecanizado y altos costos de fabricación. Además, las virutas suelen ser de tipo cinta y se enredan fácilmente [Corduan, 2003], [Klocke, 2011], y, por lo tanto, representan un obstáculo importante para la automatización de procesos y la seguridad del operario.

En vista de las propiedades anteriores, la alta temperatura de la superficie de incidencia de la herramienta combinada con la también alta carga mecánica en el filo de la herramienta, conduce a un rápido desgaste de la herramienta con la probabilidad de astillar el borde cortante. En tales eventos, el fallo catastrófico del filo, es a menudo el caso, genera daños en ambas partes, tanto en la herramienta como en la pieza mecanizada.

Olovsjö et al. [Olovsjö, 2010-a] informaron sobre la gran influencia del tratamiento térmico y el efecto del tamaño de grano en la maquinabilidad de la

aleación. Este último no solo en términos de tasa de desgaste, sino también en relación con la apariencia de las rebabas y el desgaste de notch.

En un esfuerzo por mejorar la capacidad de mecanizado de estos materiales, se reportaron algunos estudios sobre diferentes estrategias de mecanizado, herramientas de corte especiales y procesos de mecanizado no convencionales [Corduan, 2003], [Alberdi, 2010]. Sin embargo, cada nueva tecnología emergente debe demostrar la viabilidad de la tecnología y eliminar cualquier duda al saltar al siguiente Nivel de Preparación para la Fabricación (MRL). De esta manera, el uso de la vibración ultrasónica en diferentes procesos de fabricación está bien documentado en los últimos 50 años. El mecanizado ultrasónico (EE. UU.) se ha aplicado principalmente en cerámicas y compuestos sinterizados y, aunque las tasas de eliminación no son altas, los ultrasonidos se adaptan muy bien a estos tipos de materiales frágiles. Recientemente Celaya *et al.* [Celaya, 2010-a], introdujeron la vibración ultrasónica como un proceso para asistir a las operaciones de mecanizado convencionales (torneado y taladrado / fresado), en lugar de utilizar solo el régimen de vibro-impacto del movimiento ultrasónico. Esta técnica se denomina Mecanizado Asistido por Vibración Ultrasónica (UVAM) [Celaya, 2010-a] o el tipo específico denominado Mecanizado Ultrasónico Rotatorio (RUM) [Maurotto, 2016]. La asistencia al proceso hace posible la aplicación de tecnología ultrasónica en el mecanizado de materiales no frágiles pero difíciles de cortar [Astashov, 2007].

El mecanizado ultrasónico asistido ha demostrado ser una técnica eficiente para mejorar la maquinabilidad percibida de varios materiales aeroespaciales como aluminio [Babitsky, 2004], aceros [Celaya, 2010-a], compuestos y aleaciones basadas en níquel como Inconel 718 [Ahmed, 2006]. La ruptura de viruta, la generación de rebabas, la rugosidad de la superficie, la vida útil de la herramienta y las fuerzas de corte fueron algunos de los parámetros estudiados con vibración aplicada en procesos de corte convencionales

Los fundamentos del mecanizado ultrasónico se basan en las vibraciones controladas del portaherramientas a una frecuencia por encima del rango audible de hasta 30-60 kHz aproximadamente, lo que provoca un movimiento extremadamente rápido en la herramienta de corte de pequeña amplitud, en una dirección específica.

Los primeros estudios en mecanizado asistido por ultrasonidos se centraron en el torneado, ya que fue y siempre se ha considerado el proceso de fabricación más simple de estudiar, principalmente debido a su continuidad. Maurotto *et al.* [Maurotto, 2013] realizaron algunas pruebas experimentales en aleación de

titanio β , que dieron como reducciones sustanciales en la fuerza de corte y una mejor calidad de la superficie, en comparación con el torneado convencional con los mismos parámetros de corte. Los resultados análogos para la reducción de la fuerza, relacionados con la reducción del grosor de la viruta sin cortar, fueron obtenidos por otros autores que también trabajan con materiales difíciles de cortar [Babitsky, 2004], [Ahmed, 2006], [Silberschmidt, 2014].

Otra aplicación investigada de VAM es en la perforación de aleaciones aeroespaciales, ya que la industria aeronáutica es muy restrictiva en términos de integridad superficial del orificio. Las variables clave en estos procesos son el estado final de la superficie interna de los orificios junto con la reducción de la fuerza o la rotura de viruta. Entonces, Pujana *et al.* [Pujana, 2009] demostraron que la asistencia ultrasónica ayuda a reducir las fuerzas de perforación, pero en el proceso se alcanza una temperatura de punta de perforación más alta en comparación con la perforación convencional, fenómeno más pronunciado a medida que aumenta la amplitud de vibración. Otras variables de mecanizado, como la frecuencia, también fueron probadas por otros autores [Hsu, 2009], [Churi, 2006].

No obstante, el fresado asistido por vibración (VAM) ha sido el menos estudiado entre los procesos industriales más comunes. De todos modos, trabajos anteriores relacionados con materiales aeroespaciales encontraron mejoras en la calidad de la superficie aplicando el fresado asistido por vibración, como Ostasevicius *et al.* hicieron [Ostasevicius, 2013]. Por otro lado, Maurotto *et al.* [Maurotto, 2016] investigaron el efecto de la frecuencia en las tensiones residuales en el fresado asistido por ultrasonido de AISI 316L que alcanza frecuencias de hasta 60 kHz, pero encontraron los mejores resultados en el rango de baja frecuencia. Otros trabajos relacionados con el fresado ultrasónico se centraron también en las características de la superficie [Seguy, 2008], [Grazeviciute, 2008].

A pesar del vasto conocimiento sobre el mecanizado asistido por vibración, bien conocido desde hace décadas, DMG-Mori Seiki® solo lo introdujo en la industria de la fabricación de fresas, bajo la marca Sauer®, que recibe el nombre de RUM [Maurotto, 2016] a esta variante tecnológica.

Celaya *et al.* [Celaya, 2010-b] realizaron una descripción completa y clara de los procesos de mecanizado asistidos. El objetivo de las técnicas de mecanizado asistido es mejorar el proceso de corte actuando sobre el mecanismo de extracción de la viruta, es decir, la operación básica es un proceso de mecanizado. Pero se agrega una acción externa para mejorar y facilitar la formación de virutas. Hoy en día, existen cuatro técnicas más

extendidas debido a su viabilidad y expectativas industriales: Mecanizado asistido por chorro (JAM), también conocido como Mecanizado asistido por alta presión, Mecanizado asistido criogénico (CAM), Mecanizado asistido por ultrasonidos (UAM) y Mecanizado mejorado térmicamente (TEM)). La base de cada tecnología es diferente, pero el objetivo es el mismo, la mejora de la productividad de los procesos de arranque de material sin un aumento dramático en el consumo de energía o nuevas instalaciones costosas. Solo en el caso de las técnicas asistidas por láser, el costo de un equipo adicional es alto, pero la eliminación del proceso de rectificado en este caso puede ser un factor para una reducción general de los costos de producción.

4.1 Mecanizado a Alta Presión

El uso de aleaciones base níquel se usa ampliamente para componentes aeroespaciales y de turbinas, partes de automóviles como turbocompresores, plantas de energía estacionarias y aplicaciones médicas. Por lo tanto, se ha realizado un importante esfuerzo de investigación para mejorar las tecnologías de producción relativas al mecanizado. Las aleaciones base níquel son miembros de los llamados materiales difíciles de cortar [Dudzinski, 2004], [Choudhury, 1998]. El mecanizado de Inconel 718 se caracteriza por bajas velocidades de corte por un lado y un desgaste excesivo de la herramienta por el otro, lo que resulta en largos tiempos de mecanizado y altos costos de fabricación. Las virutas son generalmente de cinta y formas enmarañadas [Corduan, 2003], [Shaw, 2005]. Por otro lado, la alta temperatura y la carga en el filo de la herramienta llevan a un desgaste crítico de la herramienta con una alta probabilidad de astillado. Olovsjö et al. estudiaron en profundidad la gran influencia de la microestructura y el tratamiento térmico de estas aleaciones base níquel en su comportamiento de maquinabilidad [Olovsjö, 2010-a], [Olovsjö, 2012].

El refrigerante a alta presión (HPC) es una tecnología cada vez más demandada en la industria. Los fundamentos de la técnica se establecieron en la década de 1950 [Pigott, 1952]; desde entonces, ha mostrado un gran potencial, especialmente en el mecanizado de materiales difíciles de cortar, como lo demostraron Lacalle et al. [López de Lacalle, 2000-b]. Sin embargo, la tecnología requiere una comprensión profunda de los conceptos de mecanizado, determinando los ajustes óptimos, a saber, presión, caudal, alineación del chorro, método de suministro y velocidad de corte. Se informó que la presión de umbral necesaria para asegurar una mejora en la operación de maquinado era superior a 70 bar; no hay mejoras importantes como resultado de una mayor presión [Krämer, 2014], aunque algunas

investigaciones sugieren lo contrario [Ezugwu, 1999]. En HPC, el suministro de refrigerante puede utilizarse de dos maneras principales; a) el lubricante se suministra simultáneamente en el ala de la herramienta y en las caras de incidencia, o b) a través de un canal delgado dentro del inserto de corte [Dahlmann, 2002]. El chorro de refrigerante a alta presión debe apuntar directamente a la zona de corte, tratando de alcanzar la zona de corte de la herramienta donde se genera la temperatura máxima, en contraste con las estrategias de lubricación convencionales en las cuales el refrigerante inunda toda la zona de corte. Por lo tanto, si el área de contacto de la viruta con la herramienta se reduce demasiado, la temperatura y la carga mecánica actuarán en un área pequeña de la zona de corte con una carga específica mayor [Krämer, 2014], [Courbon, 2009].

Diferentes artículos han demostrado que el factor clave al torneado de aleaciones de alta resistencia es el desgaste de notch, que es el principal modo de fallo de las herramientas. Varios autores han investigado los mecanismos de desgaste y la evolución del patrón de desgaste en el torneado con lubricación y sin lubricación de aleaciones base níquel, prestando especial atención al desgaste de notch, como Zhuang et al. [Zhuang, 2014] y Cantero *et al.* [Cantero, 2013]. A la inversa, Vagnorius and Sørby [Vagnorius, 2011], centraron su estudio en el estudio del desgaste de notch bajo lubricación a alta presión, probando insertos cerámicos con resistencia mejorada a desgaste de notch en el mecanizado de Inconel 718.

Una alternativa diferente para lograr la lubricación del proceso es el enfoque criogénico, utilizando LN₂ o CO₂. Esto tiene un gran potencial para reducir aún más las temperaturas de las herramientas, pero es una solución costosa y no fácil de industrializar. Algunos autores han estado estudiando estos métodos, como Pusavec et al. [Pusavec, 2011-b] que estudiaron las características de integridad superficial con diferentes combinaciones de procesos criogénicos de lubricación. La lubricación criogénica aún no se ha analizado completamente y requiere más investigación.

Hasta la fecha, algunos trabajos que utilizan HPC se centraron en el refrentado [Li, 2009], cuya cinemática y dirección de salida de la viruta es muy diferente al torneado longitudinal o ranurado longitudinal convencional [Olovsjö, 2010-a], [Olovsjö, 2012].

Un fluido inyectado a alta presión en la interfaz entre la viruta y la herramienta reduce significativamente la fuerza de corte, la temperatura de la viruta, la longitud de contacto de la viruta con la herramienta y la transferencia de calor hacia la herramienta. Además, se mejoran la ruptura y la eliminación de virutas

[López de Lacalle, 2000-b]. El uso de un chorro a presión para mejorar la lubricación comenzó en 1952 por Pigott y Colwell en el torneado. En sus experimentos, la vida útil de la herramienta aumentó siete u ocho veces, se mejoró la calidad superficial y se eliminó el filo recrecido.

Jäger et al. [Jäger, 2016] desarrollaron un trabajo centrado en los residuos en la cara del flanco del inserto y la tensión residual en la superficie de la pieza generada por los insertos de corte regulares y modificados durante el mecanizado de Inconel 718 (Figura II-6). Para identificar cualquier elemento residual, se realizaron varios análisis con un espectrómetro de rayos X de dispersión de energías (EDS) en insertos regulares y modificados en combinación con la aplicación de refrigerante forzado en la cara de incidencia y el flanco. Las investigaciones demostraron que el gradiente de temperatura en el inserto ha cambiado entre los insertos de corte regular y modificado y que el desgaste de la herramienta y la rugosidad de la superficie se ven significativamente afectados por la herramienta de corte modificada (Figura II-7).

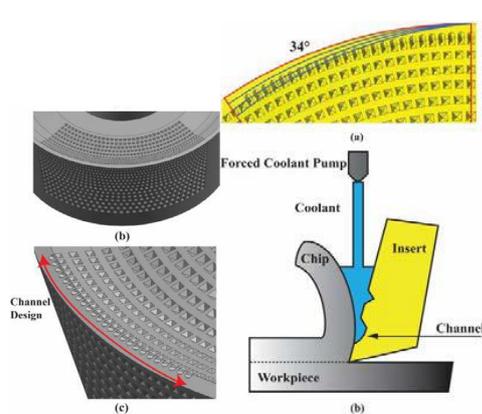


Figura II-6: Izq) Inserto Nusselt. Dcha) Intercara herramienta-viruta-lubricante.

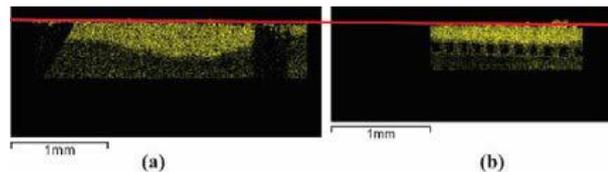


Figura II-7: Nickel backscatter para (a) Regular (b) segunda generación de insertos.

4.2 Mecanizado Criogénico

En el grupo donde se utiliza un fluido frío como refrigerante principal inyectado solo en la zona de corte, se pueden observar tres técnicas, aire frío, mecanizado asistido por CO₂ y mecanizado asistido por nitrógeno líquido

La lubricación criogénica es la sustitución de los refrigerantes de emulsión, generalmente aceites de base mineral en agua, por nitrógeno líquido (LN₂) o dióxido de carbono (CO₂), que en algunos casos funcionan simultáneamente con técnicas de micropulverización de lubricante (MQL). El primero ahora es

famoso debido a la presentación por MAG de su patente para suministrar LN2 a través del núcleo del husillo, en varias operaciones de mecanizado de materiales difíciles de cortar (Figura II-8). El CO2 es más fácil de manejar y almacenar, y en algunas condiciones es capaz de diluir el aceite.

El enfriamiento del área de corte que experimenta la temperatura más alta durante el proceso mejora sustancialmente el comportamiento de mecanizado en ciertos materiales, en relación con los cambios en la microestructura, la resistencia al desgaste de la herramienta, la vida útil a fatiga, la conductividad o la estabilidad dimensional.

Durante el mecanizado, el fluido (LN) se evapora rápidamente de forma natural a la atmósfera. Como consecuencia, la pieza está completamente limpia de impregnaciones de fluido de corte y no hay generación de ningún residuo que contamine la máquina-herramienta, las virutas o el lugar de trabajo. Esto permite evitar los gastos relacionados con la gestión de fluidos residuales y restos colaterales, lo que podría representar una mejora económica significativa. Además, el sistema puede funcionar a velocidades más altas que con las máquinas herramienta convencionales, aumentando la productividad y logrando una mayor calidad de trabajo, lo que también resulta en la reducción de costos.

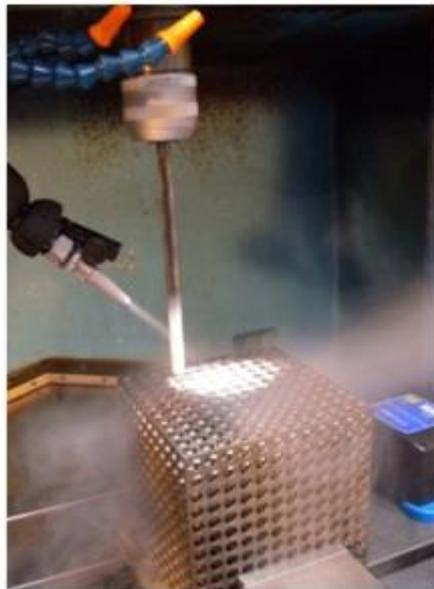


Figura II-8: Taladrado de Titanio6Al4V con refrigeración criogénica (CO2).

Algunas ventajas adicionales del sistema de mecanizado criogénico son [Yildiz, 2008], [Pu, 2012], [Kalyan Kumar, 2008], [Umbrello, 2011], [Pušavec, 2011]:

- Sistema sostenible (limpio y ajustado): es un proceso respetuoso con el medio ambiente, ya que no hay generación de residuos.

- Reduce la necesidad de cambiar las herramientas y el mecanizado, lo que reduce los costos. Mantenimiento y reemplazo de herramientas, lo que resulta en una mayor productividad.
- La vida útil de la herramienta aumenta debido a la menor abrasión y la no necesidad de limpieza química.
- Aumentar la calidad de la superficie de las piezas debido a la falta de degradación mecánica y química.

✓ Mecanizado asistido mediante CO₂

Pereira et al. [Pereira, 2015-a] desarrollaron un nuevo sistema de lubricación y refrigeración que combina tecnologías criogénicas de CO₂ y MQL. El objetivo de este nuevo sistema de lubricación y refrigeración es ofrecer una alternativa ecológica y económica eficiente. Se proponen dos adaptadores de boquilla con diferentes salidas de CO₂ (Figura II-9). Las boquillas desarrolladas son Plug & Play y se aplican directamente a los sistemas MQL comerciales. Los comportamientos de los adaptadores de boquilla se simularon con CFD y el adaptador de boquilla óptimo se probó fresando Inconel 718. En estas pruebas de fresado, se midió la vida útil de la herramienta y se utilizaron diferentes técnicas principales de lubricación y lubricación: seco, húmedo, independiente de CO₂, independiente de MQL. Solo y CO₂ + MQL (alternativa propuesta).

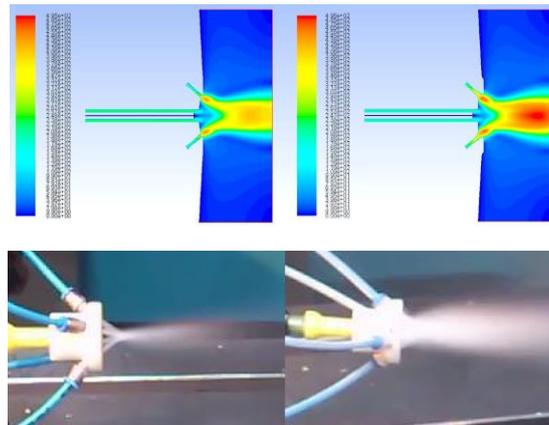


Figura II-9: Simulación y test. (a) Boquilla convergente; (b) Boquilla Convergente-divergente (Laval).

Por otro lado, los resultados de la vida útil de la herramienta se muestran en la Figura II-10:

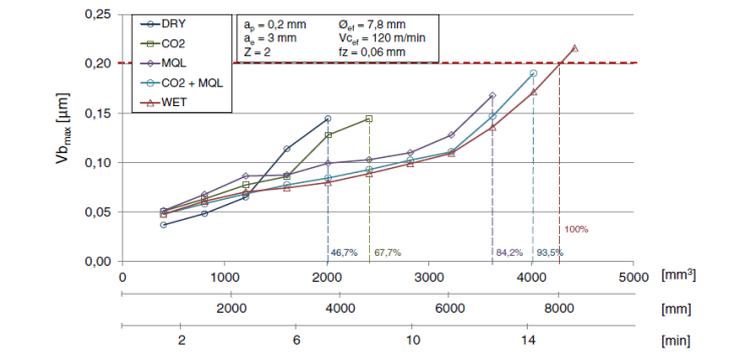


Figura II-10: Vida herramienta durante fresado Inconel 718.

El desgaste se representa contra la tasa de eliminación de material [mm³], la longitud mecanizada [mm] y el tiempo mecanizado [min]. El valor de referencia de desgaste es de 0,2 mm para considerar la vida útil final de la herramienta. Las experiencias anteriores han demostrado que, sobre ese valor, la integridad superficial no está garantizada en los componentes críticos de Inconel 718. El valor del 100% fue asignado al mecanizado en húmedo. Con el mecanizado en seco, la vida útil de la herramienta fue del 46,7% con respecto al mecanizado en húmedo. El mecanizado criogénico de CO2 mejoró los valores obtenidos con el mecanizado en seco, alcanzando un 67,7%. Con un caudal de aceite de 100 ml/h en el mecanizado con MQL, la vida útil de la herramienta aumenta hasta el 84.2%. Finalmente, al conectar el adaptador de boquilla de CO2, el valor aumenta a 93.5% si se compara con el mecanizado en húmedo.

Pereira et al. [Pereira, 2015-b] mostraron los resultados obtenidos utilizando la estrategia criogénica de CO2 con dos tipos de insertos durante el mecanizado de torneado duro. De esta manera, el mecanizado criogénico de CO2 se presenta como una alternativa al torneado duro convencional. Por lo tanto, en las pruebas realizadas en esta investigación ()Figura II-11, se compararon el torneado en seco criogénico y el CO2.



Figura II-11: Experimental set-up.

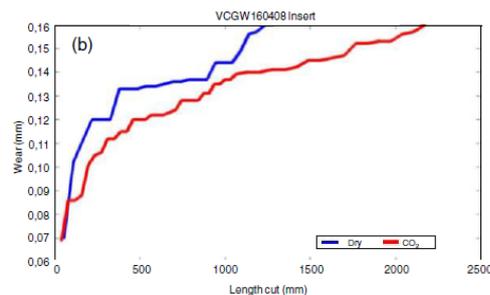


Figura II-12: Vida herramienta Inserto VCGW 160408.

Los resultados (Figura II-12) muestran un aumento de la vida útil de la herramienta en más del 60%, una rugosidad superficial similar y, cuando se usa un inserto positivo, la ausencia de la capa blanca.

4.3 Mecanizado Asistido mediante vibraciones

En este grupo general se incluyen dos técnicas: el mecanizado asistido por modulación (baja frecuencia y gran amplitud) y el mecanizado asistido por ultrasonidos (frecuencia ultrasónica y una amplitud de unos pocos micrones).

✓ Mecanizado asistido a baja frecuencia

El mecanizado asistido por modulación superpone una modulación de baja frecuencia controlada en el proceso de corte de metales. Los rangos de frecuencia hasta 1.000Hz con amplitudes de hasta 500 micrómetros. La modulación controlada se puede aplicar sobre la herramienta de corte o la pieza en la dirección de avance de la herramienta, la velocidad de corte o cualquier combinación que ofrezca efectos beneficiosos importantes en la mecánica del mecanizado. Se descubrió que la rotura de viruta en los procesos de mecanizado (por ejemplo, torneado, taladrado) era una consecuencia de que el grosor de la viruta llegaba a cero durante cada ciclo de modulación en las condiciones de modulación "correctas".

Suárez et al. [Suárez, 2013] desarrollaron un modelo matemático para correlacionar la amplitud y la frecuencia de un dispositivo portaherramientas neumático para generar vibraciones durante la operación de perforación (Figura II-13). El modelo fue desarrollado y validado según tres criterios diferentes para seleccionar parámetros de vibración óptimos: 1) garantizar un grosor mínimo de viruta sin cortar igual a 0, 2) minimizar el grosor máximo de viruta sin cortar y 3) seleccionar la longitud adecuada de la viruta (Figura II-14).

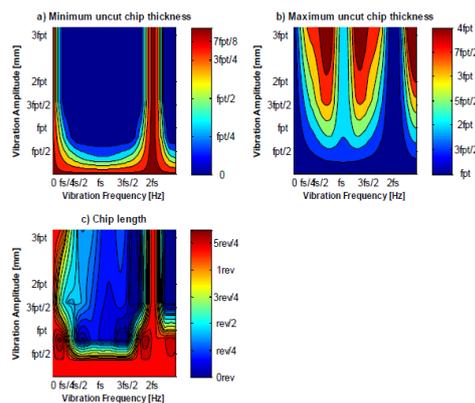
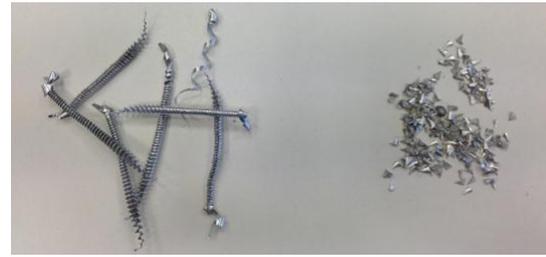


Figura II-13: Mapa parametros para asegurar condiciones optimas de vibraciones.



a)

b)

Figura II-14: a) Formación viruta en taladrado convencional, b) Segmentación Viruta en taladrado asistido por vibraciones.

✓ Mecanizado Asistido por Ultrasonidos

El principio de esta técnica es agregar alta frecuencia (16 - 40 KHz) y baja amplitud de vibración (3-30 μ m) a la herramienta o pieza para mejorar el proceso de fabricación. Esta tecnología demuestra una serie de beneficios en el mecanizado de aleaciones difíciles de cortar y material frágil. Sin embargo, hasta ahora, el mecanizado asistido por ultrasonidos no se ha utilizado ampliamente en la industria. La vibración ultrasónica se realiza mediante un transductor, impulsado por un generador de frecuencia fija. Se utiliza un amplificador conectado al transductor para intensificar la amplitud de la vibración. La asistencia ultrasónica se aplica a diferentes métodos de fabricación esperando varios beneficios en cada uno de ellos, pero la mayoría de las investigaciones se han centrado en los procesos de torneado y perforación.

Celaya et al. [Celaya, 2010-a] reportaron una mejora en la rugosidad en el caso de torneado asistido por vibración de aceros suaves. Se realizaron nuevas pruebas en torneado de acero suave con vibración en la dirección de avance. Se utilizó un transductor piezoeléctrico comercial Mastersonic MSG-2000 (17.5-24 kHz) para generar la vibración ultrasónica y se diseñó un amplificador exponencial para amplificar la vibración como se muestra en la Figura II-15. La frecuencia de resonancia empleada fue de 21,44 kHz y con una amplitud de 6 μ m en la dirección axial de la herramienta. Los resultados experimentales mostraron una mejora en la rugosidad de la superficie hasta un 60% en el caso más favorable en comparación con el torneado convencional.



Figura II-15: Set-up experimental para torneado asistido por ultrasonidos.

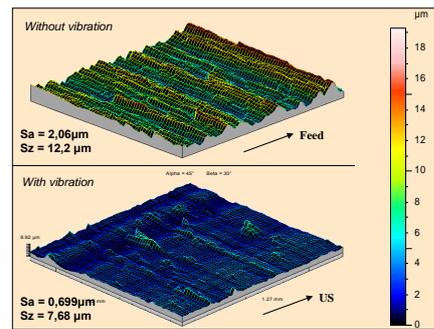


Figura II-16: Topografía superficie acero templado con y sin vibraciones en operaciones de fresado.

La topografía de las superficies torneadas asistidas por vibración y convencionales se muestra en la Figura II-16. Los resultados muestran una reducción de los picos cuando se aplica la vibración, aunque hay algunas áreas con mayor amplitud de pico. Por lo tanto, para obtener una reducción de la rugosidad de la superficie es necesario mantener una vibración de amplitud constante durante el proceso de corte. La vibración ultrasónica en el corte de aceros de baja aleación significa una reducción en las fuerzas de corte de hasta un 50% aproximadamente, y produce virutas comparativamente más pequeñas y un mejor acabado de la superficie en comparación con el torneado convencional.

Pujana et al. [Pujana, 2009], aplicaron vibración ultrasónica en la perforación de Ti6Al4V. Se monitorizaron varios parámetros de perforación asistida por ultrasonidos, incluida la fuerza de alimentación, la formación de viruta por medio de imágenes de alta velocidad y la medición de temperatura en la punta de la broca por medio de termografía de radiación infrarroja.

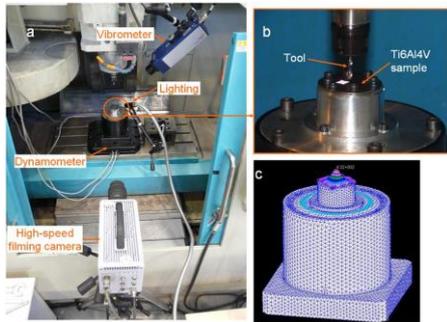


Figura II-17: Set-up experimental, simulación FEM durante taladrado asistido por ultrasonidos.

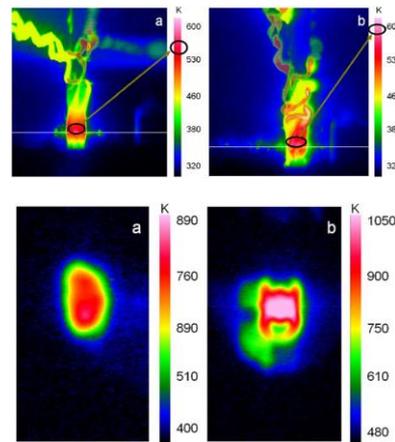


Figura II-18: Termografía durante taladrado (a) sin asistencia US y (b) asistido por US.

La asistencia ultrasónica ofreció una menor fuerza de avance y temperaturas de proceso más altas en comparación con la perforación convencional. También muestra mayores reducciones de fuerza y mayores incrementos de temperatura cuando se incrementó la amplitud de vibración (Figura II-18).

4.4 Mecanizado Asistido térmicamente

La aplicación local de calor a la zona de corte durante el mecanizado de aleaciones aeronáuticas se ha abordado en varias publicaciones en las que se han utilizado diferentes fuentes de calor, como el mecanizado asistido por láser LAM o el mecanizado asistido por plasma PAM [López de Lacalle, 2004], [García Navas, 2013], [Wiedenmann, 2015]. Estas técnicas se conocen como Mecanizado térmico mejorado (TEM), en el que el proceso de corte se realiza a temperaturas de entre 400° y 1000°C y, por lo tanto, la resistencia al corte del material es significativamente menor que la resistencia a la temperatura ambiente, lo que da como resultado fuerzas de corte considerablemente menores

La técnica es económicamente viable sólo cuando la maquinabilidad del material que se procesa es muy baja y, por lo tanto, los parámetros de corte (profundidad de corte, avance por diente y velocidad de corte) deben ser muy bajos. Este es el caso de las aleaciones resistentes al calor, las aleaciones base níquel y cobalto, y cerámicas. Los primeros materiales mantienen sus propiedades mecánicas, así como una excelente resistencia a la corrosión incluso a más de 600°C, como se muestra en la Figura II-19. En el caso de Inconel 718, las propiedades mecánicas caen aproximadamente entre 650°C y 900°C. Debido a estas propiedades, estas aleaciones se han utilizado en la fabricación de componentes de turbinas de motores de aviones comerciales y

militares. Las cerámicas son materiales refractarios que conservan su resistencia a temperaturas muy altas, siendo muy duras y quebradizas.

El mecanizado térmico mejorado puede ser realmente interesante para operaciones de desbaste o semi-desbaste donde se pueden obtener relaciones de MRR más altas, mejorando también el costo de las operaciones.

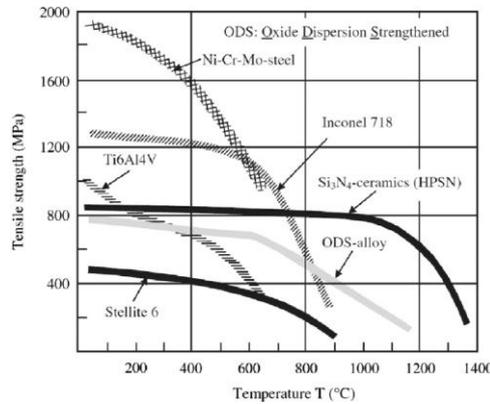


Figura II-19: Efecto de la temperatura en la tensión última de rotura de diferentes materiales.

Lacalle et al. [López de Lacalle, 2004] han desarrollado una investigación completa con el Mecanizado asistido por plasma (PAM) en tres súper aleaciones aeronáuticas de baja maquinabilidad: una aleación en base Ni (Inconel 718), una aleación en base Co (Haynes 25), (ambos pertenecientes al grupo de las aleaciones termorresistentes) y la aleación Ti6Al4V en base Ti. La eficiencia del proceso ha sido un aspecto clave a analizar, especialmente las mejoras en la velocidad de corte, la profundidad de corte y la alimentación por diente, que determinan la tasa de arranque de material lograda en el proceso.

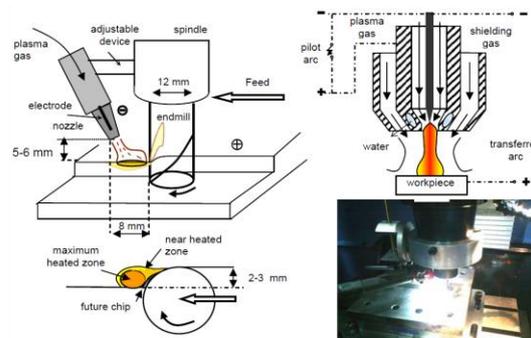


Figura II-20: Esquema mecanizado asistido mediante plasma.

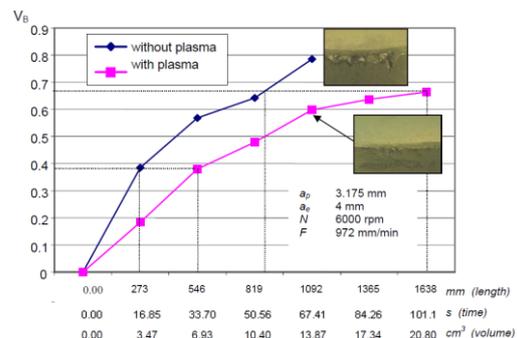


Figura II-21: Desgaste de flanco en función de longitud mecanizada.

En el caso de Inconel 718, se logró un claro beneficio en términos de vida útil de la herramienta y la longitud de las virutas mecanizadas (Figura II-21). En relación con las fuerzas de corte, se midió una reducción del 45% en el proceso

de PAM utilizando el dinamómetro Kistler cuando se comparó con el fresado convencional. El procesamiento PAM de Inconel 718 no afectó la integridad del material, en términos de dureza y microestructura.

En otro trabajo, [Holmberg, 2016] se ocupa de la medición de las tensiones residuales en el material después de que se aplicó un endurecimiento por inducción. El endurecimiento por inducción es un método de tratamiento térmico relativamente rápido para aumentar las propiedades mecánicas de los componentes de acero. El objetivo principal fue validar de forma no destructiva el estado de tensión residual en un componente endurecido por inducción. La investigación mostró que una medición combinada con difracción de sincrotrón/neutrón es adecuada para medir de forma no destructiva las deformaciones a través de la barra de acero de un diámetro de 20 mm y, por lo tanto, hacer posible el cálculo del perfil de tensión residual. El endurecimiento por inducción se realizó con escaneo a lo largo de la muestra con los ajustes de frecuencia de 24 kHz, 48 kW de potencia, 4990 A en la corriente de la bobina, velocidad de escaneo de 200 mm/min y una velocidad de rotación de 1200 rev/min. Los resultados mostraron que el perfil de esfuerzo residual generado por el endurecimiento por inducción con calentamiento y lubricación reveló una superficie en un estado de esfuerzo residual de alta compresión que se equilibra después de la zona de transición de un pico de esfuerzo de tracción relativamente grande (Figura II-22). Los resultados revelan los riesgos de fatiga debido a las altas tensiones de tracción en la zona de transición, que es importante tener en cuenta al diseñar y tratar térmicamente las piezas que pueden dar lugar a zonas de endurecimiento distintas con transiciones bruscas en condiciones de calentamiento y lubricación rápidos.

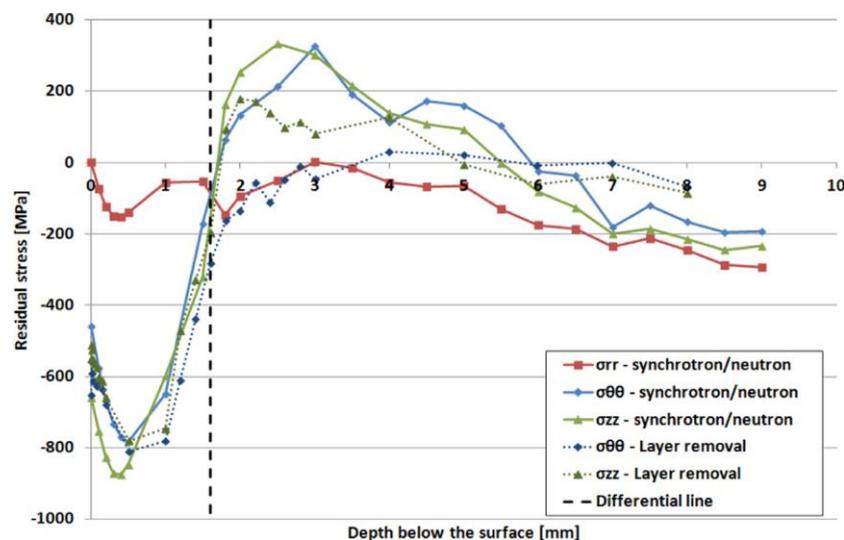


Figura II-22: Perfil tensiones residuales medidos en materia C45 endurecido por inducción.

5 Tecnologías Alternativas o No Convencionales

Se espera que la cantidad de aviones aumente en gran medida durante los próximos 20 años de acuerdo con el Pronóstico del mercado global de Airbus [Airbus, 2015]. Teniendo en cuenta el aumento de aviones (3,7% por año) derivado del aumento de tráfico aéreo por año (4,7% por año), se espera que más de 38,000 aviones estén en servicio para 2034. Algunos de estos, 13.000 aproximadamente, serían para la sustitución de aviones existentes y 19.000 serían nuevos, necesarios como resultado del crecimiento, lo que significa un total de 32.000 aviones nuevos que deberían construirse.

Esto genera una necesidad notablemente creciente de producir piezas de turbo maquinaria de materiales resistentes a altas temperaturas. Las superaleaciones, como las aleaciones de titanio y las basadas en níquel, se usan generalmente en la industria aeroespacial debido a que sus exclusivas propiedades combinadas su resistencia al deterioro químico, alta resistencia a temperaturas elevadas y resistencia al desgaste como se indica en [Ezugwu, 2003].

Estas aleaciones se denominan comúnmente aleaciones difíciles de cortar debido a su capacidad para preservar sus propiedades a altas temperaturas, lo que dificulta su mecanizado. La generación de calor debido a las altas temperaturas identificadas con el proceso de deformación y con la fricción en las interfaces herramienta-viruta y herramienta-pieza, hace que el mecanizado sea más difícil. Las superaleaciones utilizadas por la industria aeroespacial tienen las siguientes características, incluida su matriz austenítica, que las ayuda a endurecerse rápidamente; su alta soldabilidad con las herramientas de corte y facilidad para formar filo recrocado y finalmente su microestructura compuesta por carburos abrasivos como se muestra en [Ezugwu, 2005]. El rápido desgaste de la herramienta y las bajas tasas de arranque de materiales conllevan altos costes de fabricación asociados. Debido a las propiedades físicas y mecánicas de estas aleaciones, su mecanizado se distingue por la baja estabilidad del proceso y la baja productividad [Ezugwu, 2003], [Baoyun, 2010]. Al mecanizar estas aleaciones se producen cargas mecánicas y térmicas muy altas, lo que da como resultado largos tiempos de mecanizado y un desgaste excesivo de las herramientas y, por lo tanto, bajas velocidades de corte y costes de fabricación elevados [Khanna, 2010], [Corduan, 2003], [Klocke, 2011].

Sin embargo, los métodos de mecanizado no convencionales como el Corte por agua y abrasivo (AWJ) y el corte mediante electroerosión (WEDM) ofrecen

grandes posibilidades, ya que estos métodos no son sensibles al material de la pieza [Ho, 2003], [Uthayakumar, 2016].

Los diferentes métodos no convencionales también han demostrado generar una integridad superficial diferente según Li et al. [Li, 2013], Mustafa et al. [Mustafa, 2010]. Además, se espera que estas propiedades de integridad superficial también influyan en las propiedades de fatiga, que será el enfoque principal de esta investigación.

5.1 Fabricación aditiva

Otra tecnología que se está implementando rápidamente en la industria es la deposición de material láser o LMD, con el objetivo industrial de reducir la posibilidad de defectos o áreas dañadas en las piezas mecanizadas. Esto permite aumentar la robustez del proceso de mecanizado.

La mayoría de los principales fabricantes de motores de aviones y proveedores de MRO están utilizando LMD para la reparación y recuperación de piezas locales. Como ejemplo de este interés, recientemente aprobado, el proyecto ADAM (Producción adaptativa para la eficiencia de los recursos en energía y movilidad) comenzó en diciembre de 2012 con un presupuesto total de 10 millones de euros y una duración de 3 años. Este proyecto presenta 21 socios industriales, entre ellos Rolls-Royce, MTU y Lufthansa Technik, entre otros.

La UPV tiene gran experiencia en la deposición de material láser y su aplicación en aleaciones base Ni [Lamikiz, 2010], [Tabertero, 2011], [Tabertero, 2012-a] (Figura II-23).



Figura II-23: Deposición de Inconel 718 mediante láser.

Por otro lado, varias simulaciones relacionadas con la aplicación de revestimiento láser han sido desarrolladas por la UPV.

Tabertero et al. [Tabertero, 2010], [Tabertero, 2012-b], [Tabertero, 2012-c], presentaron varias investigaciones sobre la tecnología de recubrimiento por láser. Se utilizó simulación para optimizar procesos y cabezales de recubrimiento específicos. Se utilizó el software CFD Fluent para resolver las

ecuaciones del modelo. El modelo requería un estudio profundo de la distribución del tamaño de polvo y la velocidad de alimentación debido a su importancia como parámetros de entrada. La simulación para el modelo de fase discreta se llevó a cabo utilizando ambos, el modelo de turbulencia $k - \epsilon$ y la aproximación de Euler-Lagrange. Durante la validación del modelo, se utilizó una técnica basada en la medición de peso selectiva en planos perpendiculares al eje de la boquilla. Los resultados de la validación del modelo de flujo de polvo mostraron coherencia entre los valores de flujo de partículas estimados y medidos, particularmente cuando la corriente de polvo presenta un perfil gaussiano (Figura II-24). Se mostró un modelo geométrico simple como ejemplo de aplicación del modelo de distribución de flujo para estimar la altura del revestimiento.

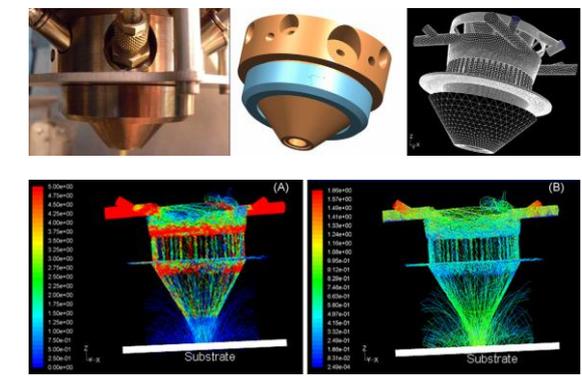


Figura II-24: Simulación proceso laser cladding.

5.2 Mecanizado mediante tecnología corte por agua y abrasivo

La tecnología de corte por agua se basa en el uso de un corte por agua a muy alta velocidad, comúnmente con partículas abrasivas arrastradas en él, para aplicaciones tales como corte, taladrado y fresado de materiales.

Tiene varias ventajas distintas sobre otras tecnologías de corte y mecanizado, como la capacidad de cortar casi todos los materiales, la capacidad de realizar un mecanizado multidireccional, la ausencia de la zona afectada por el calor y la distorsión térmica, fuerzas de corte muy pequeñas. y ser respetuosos con el medio ambiente.

La tecnología de corte por agua y abrasivo (AWJ) se emplea comúnmente en la industria para el corte de material y es una tecnología relativamente madura para el corte continuo, pero su utilización para el fresado en profundidad controlada está menos desarrollada. En el fresado de profundidad controlada AWJ (AWJ-CDM), el chorro choca contra la pieza, pero el movimiento del

chorro se evita mediante el movimiento del chorro a una velocidad superior a la requerida para su penetración total. Dado que el material se elimina por erosión, se ha demostrado que es adecuado para el procesamiento de materiales difíciles de mecanizar; Además, el proceso hace que se ejerzan fuerzas muy bajas sobre la pieza, lo que minimiza la deformación de la pieza durante el procesamiento y permite el mecanizado de estructuras flexibles, como componentes de paredes delgadas. Para una implementación industrial exitosa de AWJ-CDM, existe el deseo de minimizar la ondulación de la superficie para que se puedan lograr tolerancias estrictas sin el requisito de operaciones de acabado adicionales.

✓ Set-up

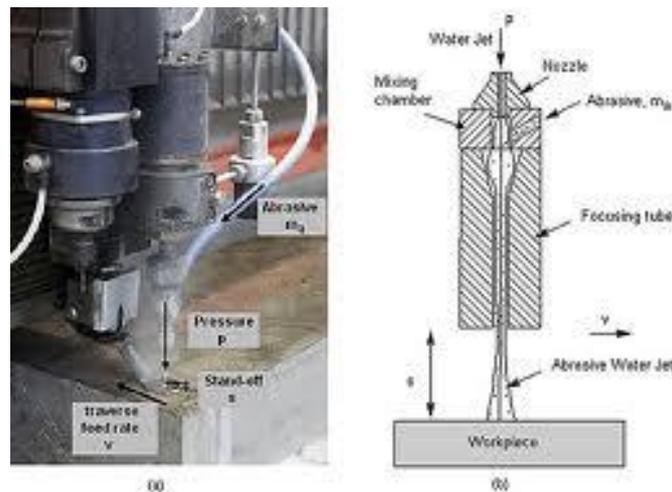


Figura II-25: Tecnología corte por agua y abrasivo (AWJ).

AWJ es una tecnología ideal que proporciona flexibilidad para cualquier tipo de aplicación y también una forma de mecanizado respetuosa con el medio ambiente. La gran ventaja sobre otras tecnologías es que no produce zona afectada por el calor (HAZ) en el material procesado y, por lo tanto, mantiene la estructura inicial del material (Figura II-25).

Una de las tendencias en el desarrollo de máquinas de corte por agua y abrasivo avanzadas es aumentar la presión de la bomba, lo que permite aumentar la velocidad de corte y, por lo tanto, aumentar la productividad. Actualmente, algunos líderes en la fabricación de bombas para máquinas AWJ como Flow, JetEdge KMT y compañías internacionales fabrican bombas de hasta 6000 bar de presión. Además, otra posibilidad que ofrecen la mayoría de los fabricantes para duplicar la productividad es agregar un segundo cabezal.

Las últimas máquinas permiten el movimiento en 5 ejes utilizando un cabezal dinámico que permite la rotación en dos ejes. Este tipo de cabezales para

mecanizar piezas 2.5D y eliminar el taper, que es una característica típica de las piezas cortadas con máquina en 3 ejes (Figura II-26). Además, para operaciones de torneado, tales máquinas tienen un eje giratorio.

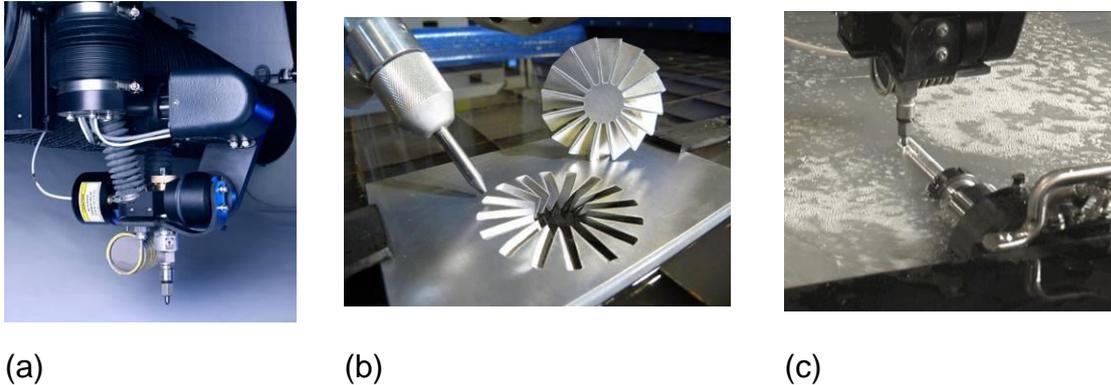


Figura II-26: (a) Cabezal dinámico de corte (Omax Corporation) (b) Piezas cortadas en máquina de 5 ejes (WardJet) (c) Eje rotatorio (Omax Corporation)

La aplicación de la tecnología robótica se ha llevado a cabo principalmente para robots de 5 ejes. Su aplicación a los brazos robóticos de 6 ejes es reciente, aunque se espera que la aplicación de robots AWJ aumente en los próximos años. Compañías como Robotic Production Technology (RPT) con Fanuc Robotics desarrollaron diferentes modelos en la serie Accutrim. KMT Robotic Solutions también tiene un pedido para que Boeing Fabrication robotice su planta en Auburn. Flow con Kuka, RobotWorkx, DMST y Progressive Surface también están desarrollando dichas aplicaciones (Figura II-27).

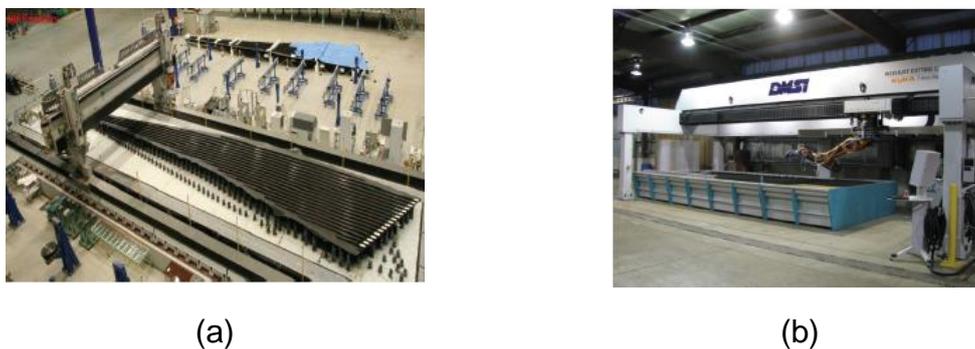


Figura II-27: Aplicaciones avanzadas mediante AWJ (a) Máquina Gantry 5 ejes para recantado alas avión; (b) Brazo robótico 6 ejes sobre máquina Gantry.

La tecnología AWJ se ha utilizado en la industria de la aviación desde principios de los años 80. Las aplicaciones como el corte de secciones de fuselaje y las piezas del motor de aluminio o titanio, los bordes y la perforación de materiales compuestos, los revestimientos de desmontaje también son aplicaciones típicas de este tipo de tecnología.

Sin embargo, gracias a la flexibilidad de esta tecnología, se pueden encontrar otras aplicaciones con un gran potencial que están en desarrollo y que se han aplicado en aplicaciones muy específicas.

La tecnología AWJ también se usa sin agregar partículas abrasivas y se conoce como tecnología de corte por agua a presión ultraalta (WJ). En este caso, el chorro no tiene suficiente potencia para cortar metales gruesos, por lo tanto, se utiliza principalmente en aplicaciones de preparación de superficies tales como limpieza, texturizado y recubrimiento y decapado de pintura. En un estudio reciente, Flow International Corporation ha utilizado esta tecnología para eliminar la fase alfa de las piezas de titanio fabricadas mediante la técnica de formación superplástica (SPF), que se utiliza para la fabricación de piezas de aviones semiacabadas [Rajesh, 2001]. La fase alfa es una fase frágil rica en oxígeno que se forma cuando el titanio se expone a altas temperaturas y debe eliminarse después del SPF para garantizar un buen rendimiento de las piezas de la aeronave sujetas a fatiga. Actualmente, este proceso se realiza mediante procesos de fresado químico.



Figura II-28: Eliminación capa Alfa mediante WJ.

Otra aplicación de la tecnología WJ consiste en marcar superficies metálicas para crear tensiones residuales de compresión (Figura II-28). Así, aumenta la vida de fatiga de las piezas aeronáuticas. Compañías como Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. utilizan este método para fabricar piezas de aviones.

Las compañías de mantenimiento de aeronaves como Vector Aerospace y VLN Advanced Technologies Inc. también publicaron en la tecnología WJ para la limpieza y desbroce de recubrimientos para el mantenimiento de aeronaves. De hecho, han desarrollado un sistema para grabar a través de un corte por agua forzado (FPWJ) y han obtenido resultados muy satisfactorios. La modulación del flujo constante de agua se realiza mediante ondas ultrasónicas. VLN está desarrollando varios proyectos para certificar la eliminación de recubrimientos duros de piezas de aviones utilizando esta tecnología. La compañía también

utiliza la tecnología Progressive Surface WJ para quitar revestimientos para el mantenimiento de motores de aviones (Figura II-29).



Figura II-29: Decapado mediante WJ

Aunque el proceso de corte de AWJ se comprende bien, las bases de datos proporcionadas por los fabricantes de máquinas sólo brindan información para grupos de materiales genéricos y comunes con propiedades desconocidas. Por lo tanto, para tareas como el mecanizado bidimensional de aleaciones específicas, los operadores hacen todo, desde la programación y la selección de los parámetros de corte óptimos hasta el control del proceso de mecanizado con su experiencia personal y con poco apoyo externo [Henning,1997]. Sin embargo, en el mecanizado tridimensional, las condiciones de corte pueden variar a lo largo de toda la trayectoria de corte al cambiar los ángulos de corte y la geometría de la pieza. Por lo tanto, los parámetros del proceso deben adaptarse continuamente a las condiciones de corte reales, para lo que se necesitan sistemas CAM especiales. Aunque los sistemas CAM para la tecnología de corte AWJ pueden derivarse de otros métodos de mecanizado como EDM o láser, esto puede no ser suficiente para un corte de alta calidad debido a los errores geométricos inherentes al proceso de corte AWJ que se producen en la parte cortada (ángulo cónico o perpendicularidad), ancho de corte superior e inferior, estrías y el desfase horario que produce errores geométricos en las curvas) [Olsen, 1999]. Todos estos errores son función de los parámetros del proceso, pero también dependen del material a cortar y su espesor.

Además del corte, la flexibilidad de la tecnología AWJ permite su aplicación para tareas de fresado, que es un proceso emergente rápido, especialmente enfocado para el mecanizado de materiales difíciles de cortar. Un ejemplo de este interés es el proyecto CONFORM_JET (Sistema de control de autoaprendizaje para fresado de forma libre con chorros de fluidos de alta energía, ref. 229155).

El control de profundidad es el objetivo clave para el desarrollo del fresado AWJ. Sin embargo, la concurrencia de varios parámetros de entrada que controlan el AWJ conduce a un control de proceso complejo. Además, la fluctuación de los parámetros que controlan la estructura del chorro (la velocidad de flujo de masa del abrasivo y la presión), la geometría de las partículas abrasivas y la heterogeneidad del material de trabajo dificulta también el desarrollo en este campo. Estas variaciones inherentes al proceso son el origen de la naturaleza estocástica de esta tecnología. Tecnalía ha desarrollado un modelo que predice el material eliminado en función de los parámetros del proceso, el material y la trayectoria de la herramienta [Alberdi, 2010], [Carrascal, 2010], [Alberdi, 2011], [Alberdi, 2012].

La Figura II-30 muestra un modelo de una pieza aeronáutica mecanizada por AWJ en Tecnalía en INCO 718. Para su fabricación, se aplicaron procesos de fresado y corte.

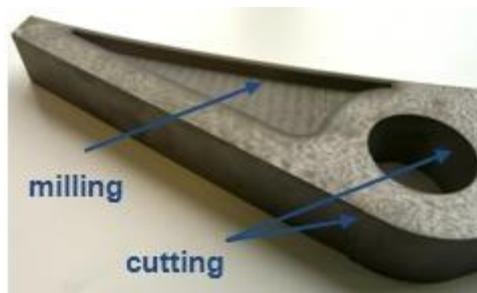


Figura II-30: Ejemplo de pieza fresada en Inconel 718 mediante AWJ.

Una de las principales preocupaciones con el procesamiento de materiales AWJ es la incrustación de grano abrasivo en el componente procesado. Esta contaminación puede causar problemas posteriores para los componentes en servicio, como la delaminación del recubrimiento o la reducción de la vida útil por fatiga, ya que la arena incrustada también puede actuar como un iniciador de grieta por fatiga [Boud, 2010], [Singh, 1995]. La Figura II-31 muestra un abrasivo incrustado en un corte de superficie Inconel 718 mediante AWJ.

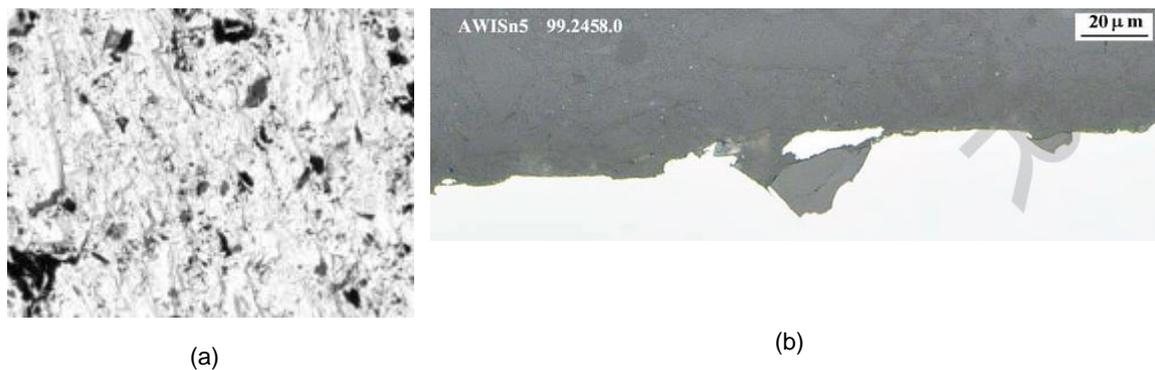


Figura II-31: Abrasivo embebido en Inco718 cortado con AWJ. (a) SEM; (b) microscopio óptico.

Con el objetivo de minimizar el grado de incrustación de grano, se pueden encontrar diferentes enfoques en la literatura. Se han utilizado diferentes tipos de abrasivos [Boud, 2010] y diferentes tamaños de grano [Fowler, 2005] pero se han obtenido niveles de incrustación similares en todos los casos. También se utilizó una técnica de oscilación de la boquilla [Chen, 2002] y los resultados mostraron que la incrustación de partículas en la superficie podría reducirse hasta un 200% utilizando la nueva boquilla

Arola et al. [Arola, 1997] realizaron un estudio experimental para determinar la influencia de las propiedades del material en la integridad superficial y la textura en el mecanizado de metales AWJ. Como resultado, se concluye que la deformación subsuperficial y el endurecimiento por deformación ocurrieron en el mecanizado AWJ de los metales. Se encontró que el grado de deformación dependía del comportamiento de endurecimiento por deformación de los metales y del ángulo de ataque abrasivo (mayor grado de deformación para un ángulo de ataque mayor). Por debajo de la región de daño inicial, solo se observó una deformación subsuperficial mínima a partir de las mediciones de dureza y un análisis microestructural. Se encontró que la profundidad de la deformación plástica es inversamente proporcional al coeficiente de resistencia del metal.

En relación con el corte AWJ o las aplicaciones 2D Alberdi et al. [Alberdi, 2015] mecanizaron stacks de CFRP/Ti6Al4V con Corte por agua y abrasivo utilizando diferentes parámetros de proceso para evaluar la viabilidad de la aplicación industrial AWJ como sustituto de la perforación convencional (Figura II-32). El análisis de ANOVA analizó el efecto de la configuración del stack, la velocidad de alimentación transversal, la herramienta de corte (combinación de orificio y diámetro del tubo de enfoque y caudal de abrasivo), y la presión sobre el perfil kerf, el ángulo de inclinación y la rugosidad de la superficie y relacionado con

los parámetros físicos del proceso AWJ. Como resultado, se observó un ángulo de reducción positivo en Ti6Al4V mientras que se observó un negativo en CFRP en casi todas las condiciones de corte.

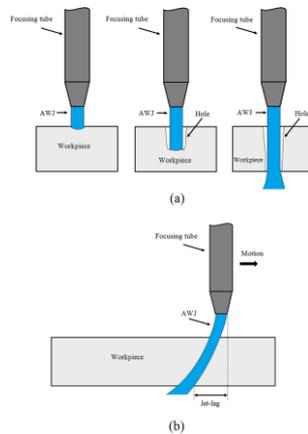


Figura II-32: Taladrado mediante AWJ: a) Pretaladrado inicial; b) corte.

Alberdi et al. [Alberdi, 2013] demostraron que la tecnología Abrasive Water Jet (AWJ) es un proceso de fabricación interesante para los sectores aeroespacial, naval y automotriz debido a sus ventajas específicas al mecanizar materiales compuestos. Sin embargo, el corte AWJ de laminados compuestos implica varios desafíos. Fue necesario desarrollar una metodología basada en el número de maquinabilidad de cada tipo de material de FRP y CFRP que permitiera las operaciones de corte AWJ. La maquinabilidad es un factor que está relacionado con los parámetros hidráulicos (presión / diámetro del orificio) y el tiempo de exposición del chorro sobre el material a cortar. Se demostró la influencia del parámetro hidráulico y se identificó claramente su impacto en términos de productividad. En estrategias similares de operaciones de corte, Tecnalia estudió la influencia del tamaño del grano de abrasivo. Se obtuvo una mejor calidad utilizando Mesh # 120 en comparación con Mesh # 80, pero se obtuvo una baja productividad.

Con respecto a AWJ Milling o aplicaciones 3D, [Alberdi, 2010], [Alberdi, 2011], [Carrascal, 2010], han desarrollado un profundo conocimiento sobre el proceso de fresado con tecnología AWJ. Se han necesitado dos modelos matemáticos: el primero para modelizar la geometría kerf generada por el mecanizado AWJ y el segundo para generar geometrías basadas en ranuras parcialmente superpuestas. Ambos modelos han sido validados en diferentes aleaciones metálicas. Para la geometría kerf generada (geometría generada por el AWJ en el material), el modelo matemático se ha desarrollado teniendo en cuenta las propiedades mecánicas del material, la energía del Abrasivo WaterJet y el

efecto de la máquina dinámica y su efecto en la pieza fresada. Además, se han propuesto diferentes estrategias para el fresado AWJ para mejorar la superficie final generada y la secuencia de fabricación para AWJ Milling se ha desarrollado completamente (Figura II-34).

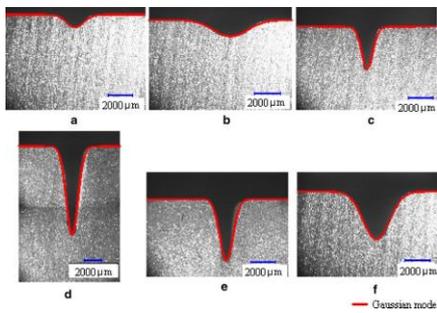


Figura II-33: Aproximación Gaussiana en diferentes test de fresado por AWJ.

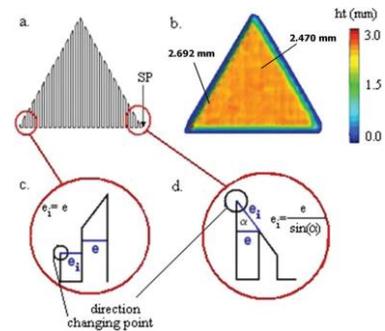


Figura II-34: Efecto trayectoria herramienta durante el fresado mediante AWJ.

Artaza et al. [Artaza, 2015] propusieron utilizar la tecnología Abrasive WaterJet (AWJ) como un método para generar una "restricción mecánica" en la superficie metálica al texturizarla. El objetivo principal del trabajo fue comparar la calidad de unión de un acero estructural y un compuesto de fibra de vidrio utilizando dos patrones de texturizado para la superficie metálica (desbastada y estriada) y tres métodos de fabricación de componentes de metal compuesto (laminado de infusión, Laminado pre-preg y utilizando un adhesivo estructural). El patrón deseado se obtuvo con la combinación de diferentes parámetros de la tecnología AWJ, principalmente la presión (MPa), el caudal másico abrasivo (g/min) y la velocidad de alimentación transversal (mm/min).

Tool path strategies

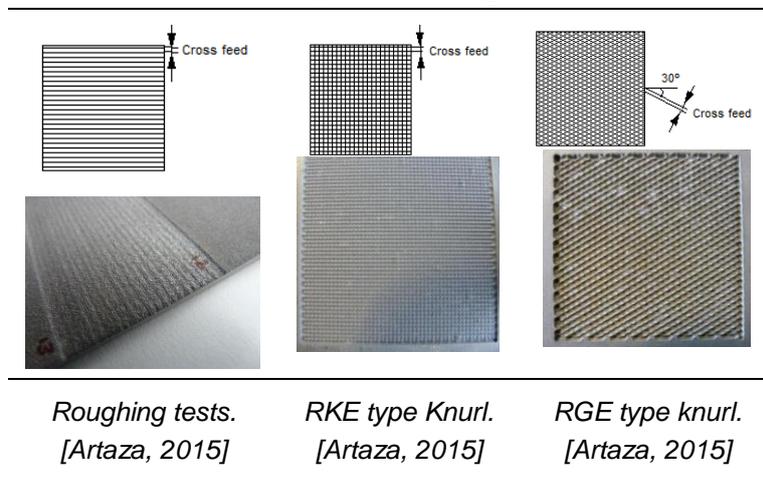


Figura II-35: Generación superficies mediante AWJ.

Los resultados muestran que el texturizado AWJ es una alternativa prometedora para mejorar la unión entre materiales metálicos y compuestos (Figura II-35). El patrón de desbaste combinado con la laminación preimpregnada es la combinación que presentó la mayor resistencia al corte (30.57 MPa) y el mayor número de ciclos durante las pruebas de fatiga (4674152 ciclos con una carga de 3KN).

Otro trabajo desplegado por Tecnia para el mecanizado de piezas Inconel 718. En este trabajo, las superficies impactaron con un Abrasive WaterJet en diferentes condiciones de presión, distancia de separación, caudal de abrasivo y alimentación lateral de la trayectoria de la herramienta. Las superficies se evaluaron en términos de rugosidad de la superficie, endurecimiento debajo de la superficie y el grado de partículas abrasivas incrustadas. El análisis de las superficies fresadas reveló que todas las superficies tienen una rugosidad homogénea en las direcciones transversal y longitudinal (Figura II-36), que varía de 8 a 16 μm . Además, todas las superficies mostraron partículas abrasivas incrustadas (Figura II-37), que pueden variar entre el 5% y el 20% del área de superficie total dependiendo de los parámetros del proceso. Al aumentar la presión, la velocidad de alimentación transversal y la distancia de separación, aumenta el porcentaje de área con partículas abrasivas incrustadas. Por otro lado, el caudal de masa abrasiva no muestra un efecto claro sobre el porcentaje de área con partículas abrasivas incrustadas. Finalmente, el proceso de fresado también produce un endurecimiento de la superficie de aproximadamente el 50% con respecto a Inconel 718 (20-25 HRC) sin tratar, lo que puede indicar un gradiente significativo de tensiones residuales compresivas.

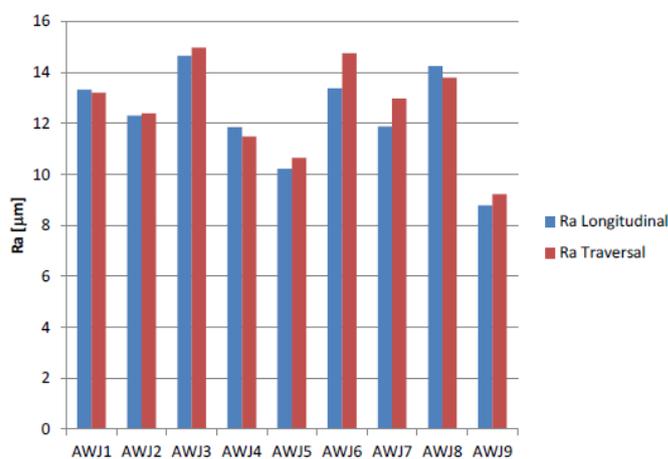


Figura II-36: Rugosidad media en la dirección longitudinal y transversal.

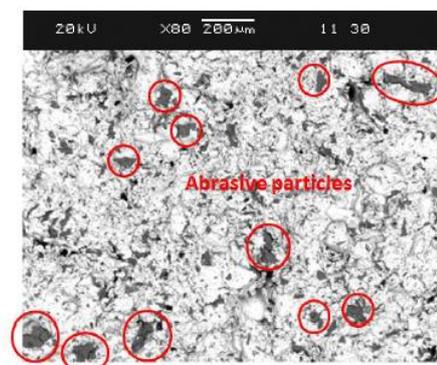


Figura II-37: SEM de INCO 718 mecanizado mediante AWJ.

5.3 Mecanizado asistido por láser

El corte por láser es un proceso en el que el material se calienta a su temperatura de fusión o vaporización. El calentamiento se logra concentrando la energía en un lugar muy pequeño. Esto permite el corte de casi todos los tipos de materiales con un grosor de hasta 20 mm sin la necesidad de niveles muy altos de energía. Existen diferentes generadores de láser según el tipo de material activo que utilizan. Cada tipo de láser crea un rayo láser a una longitud de onda determinada. Una vez que se ha generado el haz, un sistema de lentes enfoca el haz en un punto con diámetros de alrededor de 0,2 mm. El enfoque del haz permite alcanzar altas densidades de energía, un valor típico es aproximadamente 1.4×10^{10} W/m². La alta densidad de potencia concentrada en el punto vaporiza casi todos los tipos de material. Por otro lado, un flujo de gas auxiliar se inyecta coaxialmente al rayo láser durante el corte. El corte del material se logra mediante la traslación del punto a lo largo de la trayectoria de corte deseada.

Relacionado con el corte por láser, Lamikiz et al. [Lamikiz, 2005] desarrollaron las áreas de trabajo y las condiciones de corte óptimas para el corte por láser de una serie de aceros avanzados de alta resistencia (AHSS) utilizados en la industria automotriz. Los parámetros que mostraron la mayor influencia en el rendimiento de corte de la chapa metálica fueron Potencia (W), Velocidad de corte (mm/min) y Posición de enfoque (mm desde la superficie). Los resultados se dividieron considerando dos grupos diferentes, primero uno de más de 1 mm de espesor y el segundo considerando menos de 1 mm de espesor. Se tuvo en cuenta la influencia del material y, lo que es más importante, el efecto del revestimiento. Los resultados demostraron comportamientos muy diferentes entre las chapas más finas y más gruesas, mientras que la variación de los parámetros de corte debido a la influencia del material fue menos relevante.

La industria aeroespacial perfora millones de agujeros durante la fabricación de modernos motores de turbina. Estos orificios son necesarios en las palas de la turbina, paletas, quemadores y postquemadores para proporcionar aire de lubricación sobre los componentes y se perforan en una variedad de ángulos, espesores y diámetros. Estos componentes, fabricados a partir de súper aleaciones, también se recubren muchas veces con un revestimiento cerámico de barrera térmica (TBC). Existe una escasez actual de productos de perforación de orificios capaces de satisfacer las demandas de los fabricantes de motores comerciales y militares. Los láseres Nd:YAG han sido la opción típica y han dominado el mercado de perforación aeroespacial durante décadas, pero la industria aeroespacial está considerando en gran medida el

láser de fibra para su implementación en las líneas de producción. Los diámetros de los orificios se producen enfocando un láser al tamaño del orificio deseado (perforación por percusión) o cortando orificios redondos (trepanación). Estos orificios varían en diámetro desde 0.010 a 0.250 pulg., Con espesores mayores de 0.5" y ángulos de entrada de 30° a 10°. Además, algunos componentes, como los diseños de la cámara de combustión, requieren mayores detalles de corte.

En relación con las operaciones de perforación con tecnología láser, Arrizubieta et al. [Arrizubieta, 2013] mostraron los mecanismos de formación de los orificios en el proceso de perforación con percusión láser de una placa AISI 304, evaluando el volumen de material eliminado en cada pulso láser y obteniendo la evolución de geometría del orificio para la secuencia de pulsos completa. Además, se desarrolló un modelo numérico como herramienta para resolver el problema de manera aproximada con el número mínimo de parámetros y el tiempo de cálculo. El modelo no tomó en cuenta los fenómenos termofluido-dinámicos del material fundido en los orificios, pero consideró el problema térmico y que el material se elimina por vaporización. Este aspecto fue verificado experimentalmente, según se muestra en la Figura II-38.

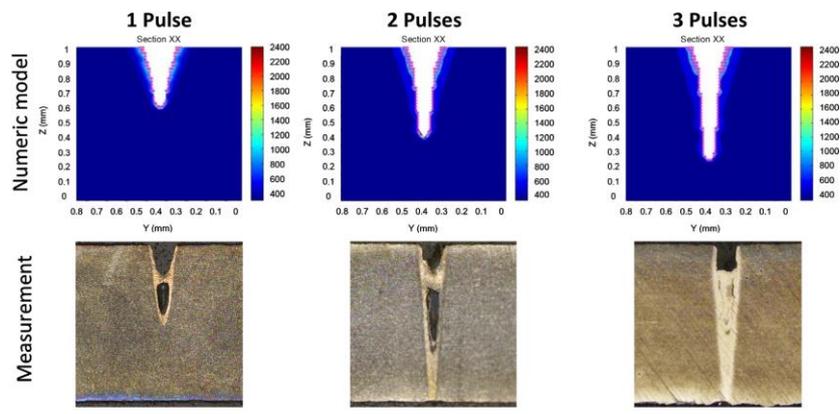


Figura II-38: Experimentación y predicción taladrado mediante laser.

El mecanismo de eliminación de material durante el LBM incluye diferentes etapas, como la fusión, la vaporización y la degradación química (los enlaces químicos se rompen, lo que hace que los materiales se degraden). Cuando un láser de alta densidad energética se enfoca en la superficie de trabajo, la energía térmica se absorbe, lo que calienta y transforma el volumen de trabajo en un estado fundido, vaporizado o químicamente modificado que puede eliminarse fácilmente mediante un flujo de gas auxiliar de alta presión (que acelera el flujo de aire), transforma el material y lo expulsa de la zona de mecanizado).

La eliminación del material mediante el proceso LBM y las energías vaporizadas se muestran en la Figura II-39.

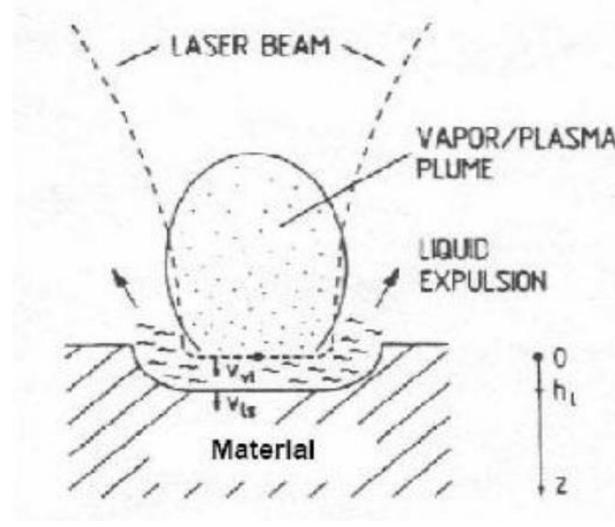


Figura II-39: Arranque material mediante laser.

Cuando el láser golpea la superficie del material, tendrá un poco de fuerza de retroceso. Puede expulsar el líquido de los lados. Los láseres de pulsos cortos generan un mayor retroceso y producen una mayor eliminación del líquido. El láser UV generará alta temperatura en el material y el material eliminado se ioniza. Esto formará plasma en el agujero (Figura II-40). El plasma puede absorber más energía láser entrante. Parte de ella se vuelve a emitir en amplio espectro y gran angular. Ayuda al acoplamiento de la energía del láser al material y también a una "zona afectada por el calor" más grande.

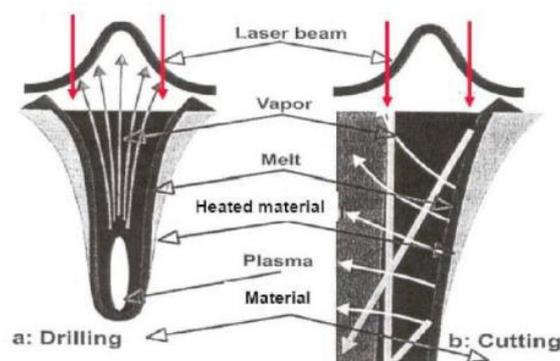


Figura II-40: Efecto laser en el material.

El mecanizado por láser es un proceso térmico con énfasis en los requisitos de calor y la utilización del calor. También es importante determinar las propiedades físicas del material de la pieza y su relación con las características operativas de los láseres ópticos.

✓ Set-up

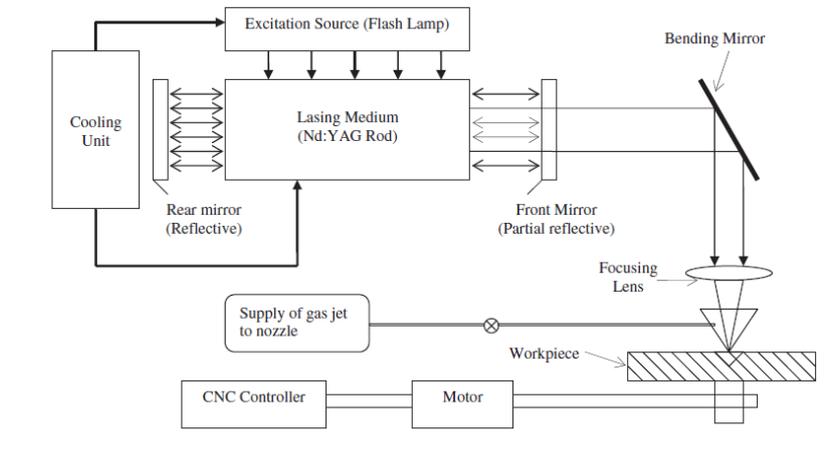


Figura II-41: Esquema de un sistema láser de Nd:YAG.

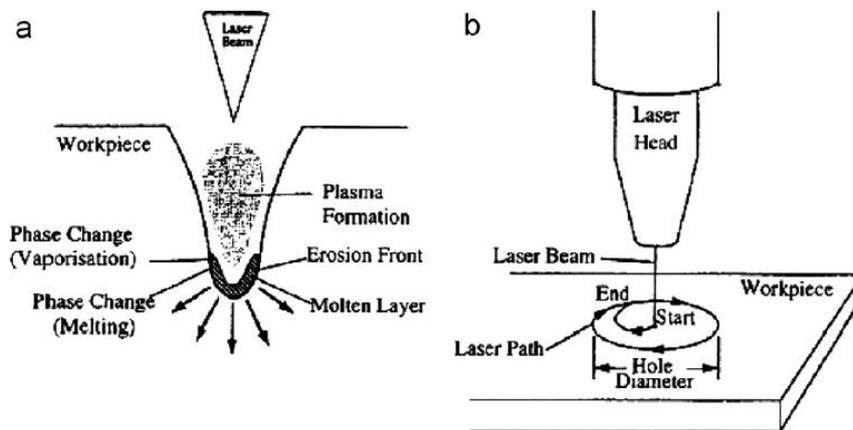


Figura II-42: Esquema de arranque láser (a) taladrado y (b) corte.

El esquema de LBM se muestra en la Figura II-41. LBM es un proceso térmico. La efectividad de este proceso depende de las propiedades térmicas y, en cierta medida, de las propiedades ópticas en lugar de las propiedades mecánicas del material a mecanizar. Por lo tanto, los materiales que muestran un alto grado de fragilidad o dureza y tienen propiedades térmicas favorables, como una baja difusividad térmica y conductividad, son particularmente adecuados para el mecanizado por láser. Dado que la transferencia de energía entre el láser y el material se produce a través de la irradiación, el láser no genera fuerzas de corte, lo que provoca la ausencia de daños materiales, desgaste de las herramientas y vibraciones de la máquina. Además, la tasa de arranque de material (MRR) para el mecanizado por láser no está limitada por restricciones tales como la fuerza máxima de la herramienta, la formación de bordes acumulados o la vibración de la herramienta. LBM es un proceso

flexible. Cuando se combina con un robot o un sistema de posicionamiento de piezas de varios ejes, el láser se puede utilizar para los procesos de taladrado, corte, ranurado, soldadura y tratamiento térmico en una sola máquina.

5.4 Mecanizado mediante electroerosión por hilo

El mecanizado mediante corte por hilo (WEDM) ha crecido enormemente desde que se aplicó por primera vez hace más de veinte años. Sus amplias capacidades le han permitido abarcar las industrias de producción, aeroespacial/aeronáutica y médica, y prácticamente todas las áreas de mecanizado de material conductor. A medida que se desarrollan materiales más nuevos y más exóticos, y se presentan formas más complejas, las operaciones de mecanizado convencionales continuarán alcanzando sus limitaciones y el mayor uso de WEDM en la fabricación continuará creciendo a un ritmo acelerado. El mecanizado de descarga eléctrica es un proceso termoeléctrico no tradicional en el que el material de la pieza se erosiona por una serie de chispas discretas entre la pieza y un electrodo de herramienta sumergido en un medio dieléctrico líquido. Estas descargas eléctricas derriten y vaporizan cantidades diminutas del material de trabajo, que luego son expulsadas por el dieléctrico.

El corte por hilo mediante descarga eléctrica, comúnmente llamado WEDM, es una forma especial de mecanizado de descarga eléctrica que utiliza un cable de diámetro pequeño como electrodo para cortar un corte estrecho en el trabajo. El medio dieléctrico, que generalmente es agua desionizada, no sumerge el cable. La pieza se monta en la mesa de la máquina y el medio dieléctrico se expulsa al área de chispas. El movimiento del alambre se controla numéricamente para lograr las formas bidimensionales y tridimensionales complejas deseadas para la pieza. WEDM tiene la capacidad de cortar formas complejas e intrincadas de componentes en todos los materiales conductores de electricidad con mayor precisión. En esta operación, la eliminación del material se produce cuando el material conductor de la electricidad aplica descargas repetitivas entre los huecos de la pieza y el electrodo de la herramienta conectado en un circuito eléctrico.

Sin embargo, debido a un gran número de variables y la naturaleza estocástica del proceso, incluso un operador altamente cualificado con un WEDM de última generación rara vez puede lograr el rendimiento óptimo. Una forma efectiva de resolver este problema es determinar la relación entre el rendimiento del proceso y sus parámetros de entrada controlables, es decir, modelar el proceso mediante técnicas matemáticas adecuadas.

Las investigaciones sobre las influencias de los parámetros de entrada de mecanizado en el rendimiento de EDM y WEDM se han informado ampliamente y se han realizado varios intentos para modelar el proceso. En estos informes, la productividad del proceso y la rugosidad de la superficie de la pieza mecanizada se tienen en cuenta como una medida del rendimiento del proceso. Para evaluar el perfil de superficie de la pieza mecanizada, una medida de la rugosidad superficial no es suficiente. Una medida completa del perfil de la superficie debe proporcionar información no sola sobre la escala de las irregularidades de la superficie, sino también sobre sus formas y espaciada. El mismo artículo desarrolla técnicas de modelizado para un proceso de electroerosión por hilo a través de la metodología de la superficie de respuesta (RSM) y la tecnología de red neuronal artificial (ANN). Además de la rugosidad de la superficie, se investigan la asimetría, curtosis y la ondulación de la superficie del alambre EDMed.

Inconel 718 es uno de los materiales de mecanizado más utilizados que utilizan WEDM para mecanizar componentes de turbinas de gas en aplicaciones aeroespaciales.

Materiales Cerámicos Avanzados

Los materiales cerámicos avanzados se mecanizan con la ayuda de un método alternativo que no es más que WEDM [Ho, 2004]. Dauw et al. [Dauw, 1990] explicaron que la velocidad de eliminación del material y la rugosidad de la superficie no solo están influenciadas por los parámetros de corte, sino que también depende del material de la pieza. Matsuo et al. [Matsuo, 1992] estudiaron la influencia del contenido de carburo conductor (denominado NbC) y TiC, en la velocidad de corte y la rugosidad de la superficie de las cerámicas de zirconia (ZrO₂) durante WEDM. Takayuki et al. [Takayuki, 2004] propusieron el método de mecanizado de forma arbitraria de cerámicas aislantes (Si₃N₄) por WEDM. Durante el WEDM de una pieza gruesa de cerámicas aislantes de Si₃N₄, se observó una rotura frecuente del alambre. Por lo tanto, se usó un nuevo material de electrodo auxiliar para evitar la rotura frecuente del hilo. También se observó un fenómeno de deformación hacia el final del producto durante el mecanizado de láminas delgadas debido a la tensión residual térmica.

Materiales Compuestos

WEDM es considerado como una herramienta real en comparación con diferentes materiales [Manna, 2006] realizó experimentos con una máquina

EDM de corte por hilo CNC Supercut-734 electrónica de cuatro ejes típica en aluminio de carburo de silicio reforzado con matriz de metal compuesto Al / SiC MMC. El voltaje de espacio abierto y el período de pulso son los parámetros de mecanizado más importantes para controlar la tasa de arranque de metal.

La tensión del hilo y la velocidad de alimentación fueron los parámetros de mecanizado más importantes, para la rugosidad de la superficie, la tensión de hilo y la configuración de la tensión de la chispa fueron los más significativos para la monitorización de la chispa [Garg, 2010]. Yan et al. [Yan, 2000] examinaron los diferentes procesos de mecanizado realizados en material compuesto de matriz metálica y experimentó con el mecanizado de Al₂O₃/6061 Al compuesto mediante el uso de EDM rotativo junto con un electrodo similar a un disco. Se encontró que los parámetros del proceso tienen poco impacto en la RS, pero tienen un efecto contrario en la RC. Patil y Brahmankar investigaron el rendimiento de los compuestos Al/SiCp con el mecanizado mediante WEDM [Patil, 2006]. Se encontró que los parámetros del proceso, como el tiempo de encendido del pulso, el tiempo de apagado, la corriente del pulso de encendido, la velocidad del hilo y la tensión del cable en la velocidad de corte y el acabado de la superficie afectan el rendimiento del WEDM del compuesto Al/SiCp. Un estudio comparativo sobre aleaciones no reforzadas reveló el efecto del refuerzo. La velocidad de corte para la aleación no reforzada se encontró más alta en comparación con los compuestos, mientras que el acabado de la superficie en los composites fue superior a la aleación no reforzada. La rotura del cable es una de las limitaciones de la velocidad de corte del compuesto. Jangra et al. [Jangra, 2011] propusieron un enfoque teórico de gráficos (GTA) para evaluar la maquinabilidad del compuesto de WC. Se encontró que, entre los cinco factores, la máquina herramienta tiene el valor de índice más alto. Por lo tanto, el factor de la máquina-herramienta es el factor más influyente que afecta la maquinabilidad del compuesto WS.

6 Post procesados

La rugosidad de la superficie y la integridad que resulta del mecanizado puede ser perjudicial para la vida de fatiga y la resistencia a la corrosión de los componentes de ingeniería. Una preocupación crítica son las concentraciones de tensión planteadas por la topografía de la superficie, las tensiones residuales causadas por la deformación localizada o las transformaciones térmicas, y las alteraciones en la dureza de la superficie que resultan del procesamiento. Los componentes que requieren una resistencia superior a la fatiga y/o resistencia al agrietamiento por corrosión bajo tensión a menudo se

someten a procesos de fabricación secundarios. Se utilizan procesos secundarios para minimizar la rugosidad de la superficie del componente y/o introducir una tensión residual de compresión cerca de la superficie.

6.1 Agua a Alta Presión

Las aplicaciones de los chorros de agua van desde la limpieza hasta el corte en diferentes campos, como las industrias de construcción, mantenimiento y fabricación

Entre las diferentes aplicaciones de los chorros de agua, el fresado con corte por agua es un nuevo proceso de tratamiento de superficie que está cobrando impulso en el pasado reciente debido a ciertas características únicas. Es un tratamiento controlado por fuerza que genera tensiones residuales de compresión en las capas superficiales sin modificar la topografía de la superficie. Es relativamente fácil de controlar debido a la menor cantidad de variables que afectan el proceso. Este proceso es capaz de tratar toda la superficie de manera uniforme, por lo que requiere procedimientos simplificados de garantía de calidad. Por encima de todo, es capaz de tratar superficies con geometrías complejas y tener ciertas áreas inaccesibles. El fresado excesivo ofrece varios beneficios, como una mayor resistencia a la fatiga y resistencia a la corrosión, proceso altamente flexible que se puede usar simultáneamente junto con otros procesos de eliminación de material posibles con chorros de agua a alta presión. A diferencia del chorro de agua, el corte por agua es un proceso respetuoso con el medio ambiente, ya que no produce polvo durante el tratamiento de la superficie de los materiales.

L. Huang et al. [Huang, 2013] demostraron que es posible utilizar la tecnología de corte por agua pura (PWJ) para eliminar la capa alfa generada durante el mecanizado del Ti-6Al-4V.

Barriuso et al. [Barriuso, 2011] usaron PWJ en dos materiales biomédicos (AISI 316L y Ti6Al4V) para obtener superficies adecuadas para aplicaciones médicas. Con respecto al análisis de la microestructura del AISI 316L, existe una zona submicrométrica/nanométrica, de 10 a 20 μm de ancho, severamente deformada durante el peening. A partir de ahí, los granos aumentan progresivamente de tamaño hasta una distancia de 70-100 μm . La capa deformada presenta la mayor dureza y la dureza total se alcanza aproximadamente a la misma distancia a la que los granos alcanzan el tamaño mayor. Contrariamente a lo que sucede con las muestras de acero, no se pudo encontrar un gradiente de dureza en los Ti6Al4V, lo que siempre indicó valores de dureza de alrededor de 320 HV. El análisis de su microestructura reveló que

no hay signos de deformación mecánica o un cambio en la morfología entre la capa superficial.

Los resultados (Figura II-43) mostraron que PWJ puede ser un método adecuado para erosionar superficies. Las principales ventajas son que hay una probabilidad reducida de dejar pequeñas áreas sin fresar, ya que el corte por agua tiene un impacto de manera bastante continua, pero los parámetros del proceso deben optimizarse porque PWJ mostró una zona plastificada más baja que en otros procesos como el granallado. La zona afectada de plasticidad debe mejorarse para evitar la inducción de daños en la superficie, lo que podría ser perjudicial para la vida de fatiga del material.

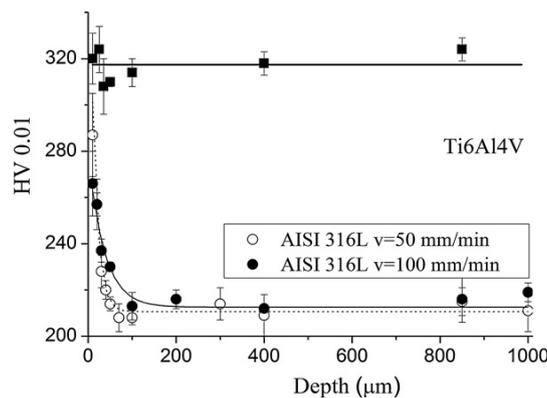


Figura II-43: Dureza medida después de aplicar PWJ en diferentes materiales biomédicos.

Lieblich et al. [Lieblich, 2016] desarrollaron un estudio en el que se procesaron en la superficie muestras de fatiga planas de Ti6Al4V ELI biomédica (Figura II-44) mediante limpieza por corte por agua a alta presión sin partículas abrasivas en condiciones moderadas a severas que producen valores de rugosidad en el rango de los obtenidos por comercial granallado (BL) con partículas de alúmina. El comportamiento de fatiga de las muestras de WJP y BL se caracterizó mediante pruebas cíclicas de tensión uniaxial ($R = 0,1$). El énfasis se puso en un análisis comparativo de los efectos inducidos en la superficie y el subsuelo y en su relevancia en el comportamiento de la fatiga. Un resultado interesante de esta investigación fue que el granallado con partículas de alúmina fue menos dañina para la resistencia a la fatiga que el WJP sin abrasivos. Las muestras de BL dieron como resultado (Figura II-45) un mayor endurecimiento del subsuelo y tensiones residuales de compresión. Las muestras tratadas con parámetros de WJP más severos mostraron una pérdida de masa mucho mayor y menores tensiones residuales de compresión. Del análisis realizado en este trabajo, una conclusión es que, además de la aspereza, la ondulación surge como otro parámetro topográfico importante que se debe tener en cuenta para tratar de predecir el comportamiento de la fatiga.

Se prevé que la optimización de los parámetros de WJP con el objetivo de reducir la ondulación y la pérdida de masa debería conducir a una mejora de la resistencia a la fatiga.



Figura II-44: Probetas de fatiga, Pulidas (P), granalladas, y tratadas por WJ.

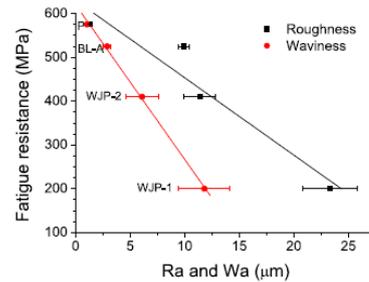


Figura II-45: Resistencia a fatiga en función de rugosidad y ondulación.

En aplicaciones donde se debe evitar la contaminación de la superficie con partículas abrasivas, como en alimentación, biomedicina y aeronaves, se puede usar la versión sin abrasivo de la tecnología AWJ, es decir, Pure Waterjet (PWJ). En consecuencia, se produce una disminución drástica de su capacidad de erosión.

Entre las diferentes aplicaciones del PWJ, la textura es una de las aplicaciones más prometedoras. El impacto frecuente de las gotas de agua en la superficie de los componentes provoca una deformación plástica local. Como resultado, se inducen tensiones residuales de alta compresión en las capas cercanas a la superficie. Debido a las modificaciones beneficiosas en el material cercano a la superficie, la resistencia a la fatiga aumenta significativamente. Estos efectos beneficiosos se han demostrado en varios trabajos de investigación [Arola, 1997], [Tönshoff, 1997]. Además, la alta accesibilidad geométrica del corte por agua permite aplicar este nuevo proceso para el tratamiento de geometrías complejas. Por otro lado, los valores de rugosidad promedio obtenidos con este proceso (8-12 μm) exceden de una rugosidad promedio objetivo típica para aplicaciones aeroespaciales, que está en el rango de 2-3 μm [Chillman, 2010].

Estas ventajas llevan a aumentar los intereses de los usuarios de muchos campos industriales con diferentes objetivos: pulir materiales duros, generar geometrías en superficies de diferentes materiales para crear modelos artísticos con atractivo comercial, e incluso para la eliminación de capas superficiales no deseables, como capas de pintura o revestimiento, o la eliminación de fases de materiales indeseables específicos.

El método PWJ se propone como un método para eliminar las partículas incrustadas en superficies mecanizadas por AWJ, mientras fortalece la superficie. Aunque en el área de la eliminación de partículas abrasivas no

existe literatura relacionada, los resultados obtenidos en trabajos de investigación para la eliminación de capas superficiales no deseables, como las capas de pintura o recubrimiento [Vijay, 2008], [Shipway, 2008] o la capa alfa de los componentes de titanio de forma superplástica (SPF), sugieren que esta tecnología podría eliminar dichas partículas (Figura II-46).

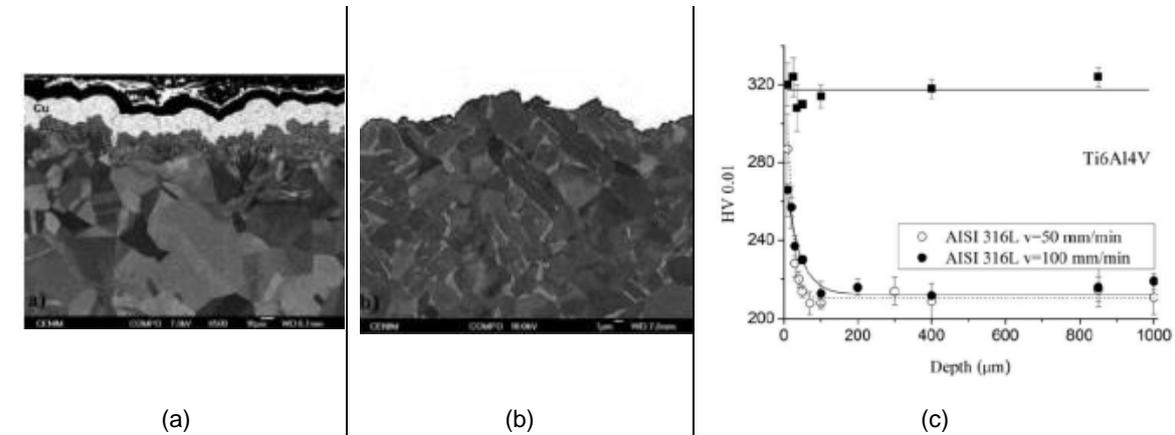


Figura II-46: BEI de sección transversal de (a) WJP 316 LVM y (b) WJP Ti6Al4V

6.2 Pulido Láser

El proceso de pulido con láser se basa en la fusión de una capa microscópica y en una rápida resolidificación del material fundido. La capa afectada debe ser lo suficientemente profunda para derretir los picos de rugosidad, pero no debe ser más profunda que los valles. Por lo tanto, la energía del rayo láser debe controlarse cuidadosamente para fundir solo una capa microscópica. En la Figura II-47, se presenta un esquema del proceso de pulido de la superficie del láser.

El proceso depende principalmente de tres factores: el material de la superficie, su topografía inicial y la densidad de energía del rayo láser. Por lo tanto, una vez que se selecciona la superficie, el proceso tendrá éxito si la densidad de energía se selecciona correctamente. La densidad de energía del láser (energía por unidad de superficie) es mucho mayor que otras fuentes de calor, como el arco de plasma. Por lo tanto, es posible fundir un área microscópica sin afectar las áreas circundantes, que es un factor clave en el proceso de pulido con láser. La densidad de energía depende de la potencia del láser, el diámetro del rayo láser y el tiempo que el rayo se irradia en la superficie. Cuando se irradia un haz de láser pulsado, este tiempo es directamente la duración del pulso. De lo contrario, para un láser de onda continua, la densidad de energía es inversamente proporcional a la velocidad de alimentación.

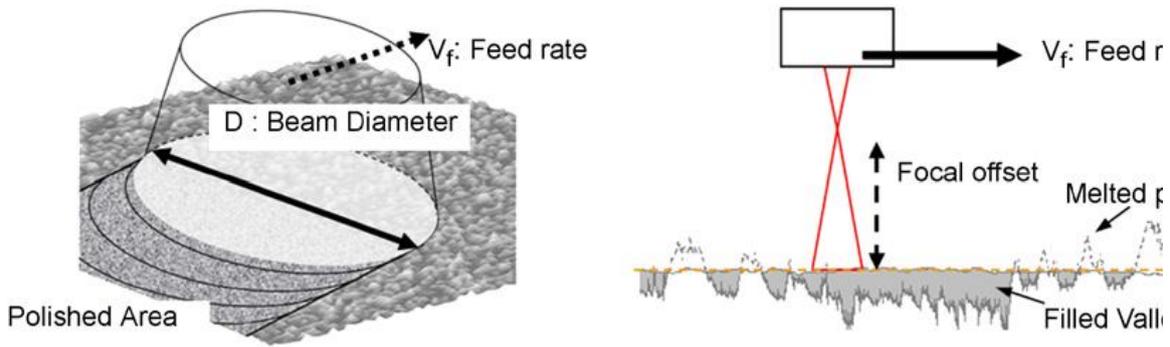


Figura II-47: Esquema proceso pólido laser.

Lamikiz et al. [Lamikiz, 2007], [Ukar, 2010-a], [Ukar, 2010-b], [Avilés, 2011], [Ukar, 2012] mostraron un trabajo detallado sobre el proceso de pulido con láser en diferentes aplicaciones metálicas (Figura II-48). En el caso de la aplicación de pulido con láser sobre piezas sinterizadas metálicas obtenidas por SLS, los resultados mostraron claras reducciones de rugosidad para el material denominado LaserForm ST-100r que consiste en acero inoxidable AISI 420 sinterizado infiltrado con bronce. Las reducciones medidas son hasta 80% de reducción en el parámetro Ra. Eso significa una rugosidad final de 1.2–1.3 mm Ra mientras que la rugosidad inicial de la superficie estaba en el rango de 7.5 mm Ra (Figura II-49).

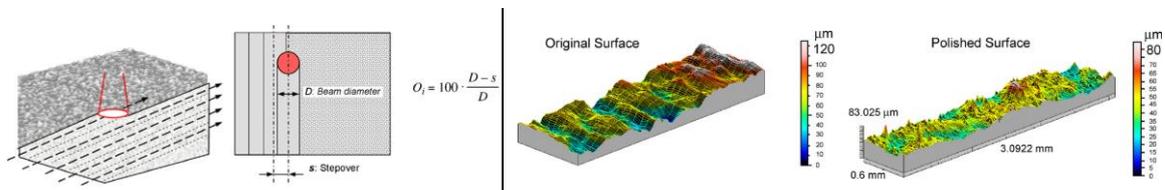


Figura II-48: Estrategia pólido laser.

Figura II-49: Izqda) Superficie inicial. Dcha) Superficie después del pólido laser.

La UPV estudió la aplicación del pulido por láser en acero para herramientas DIN 1.2379 (Figura II-50). Se usaron dos tipos diferentes de láser en las pruebas preliminares: un láser de CO2 de 2,5 KW y un láser de diodo de alta potencia de 3,1 KW. Se lograron altas tasas de reducción de la rugosidad con ambos, más del 75% utilizando el láser de CO2 y más del 80% con el láser de diodo. Aunque las tasas de reducción de rugosidad alcanzadas con ambos tipos de láser son considerablemente altas, el láser de diodo obtiene la reducción máxima con una densidad de energía más baja (1100 J/cm²), con un punto más amplio para un área mayor de superficie procesada por unidad de

tiempo. En las pruebas que aumentan la densidad de energía de forma lineal, los resultados muestran una mejora en la reducción de la rugosidad a medida que la densidad de energía aumenta hasta una tasa máxima. Además de esta tasa de reducción máxima, si la densidad de energía aumenta, la reducción de la rugosidad es menor. En la zona afectada por el calor del láser (HAZ) se identificaron cuatro zonas claramente diferentes: el volumen del material fundido, el material calentado por encima de la temperatura de austenización, el material recocido y el material base. Si bien el efecto del láser es bastante localizado, el estudio metalúrgico muestra microfisuras cuando la densidad de energía aplicada es mayor que 1250 J/cm² para el láser de diodo, y esto puede afectar directamente la integridad de la parte en servicio. Se demostró a partir de este estudio que la aplicación del proceso de pulido con láser en las superficies semiacabadas presenta algunas limitaciones, debido a la gran capa de espesor del material fundido que es necesaria para eliminar las ondulaciones del proceso de fresado para mejorar rugosidad superficial (Figura II-51).

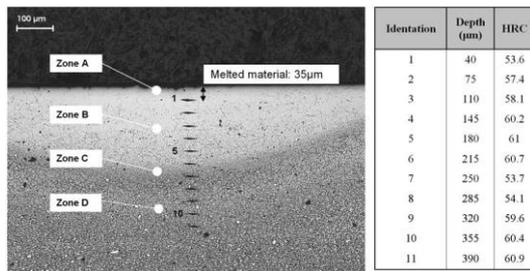


Figura II-50: Estructura metalúrgica, en 4 zonas y durezas medidas.

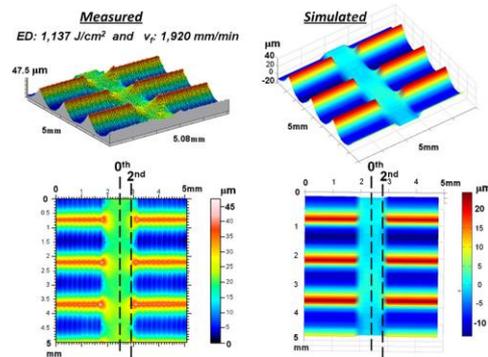


Figura II-51. Comparación entre superficie medida y estimada.

El efecto del pulido con láser en el ciclo de Fatiga de ciclo alto (HCF) se estudió en acero AISI 1045 (Figura II-54).

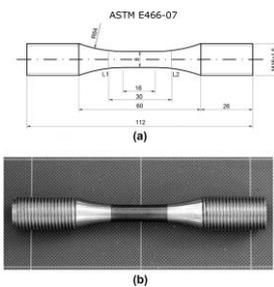


Figura II-52: Probeta fátiga.

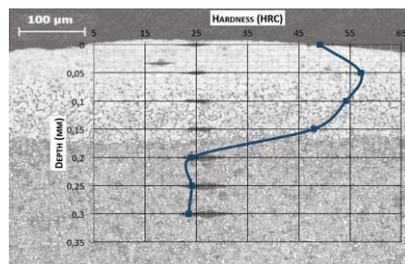


Figura II-53: Dureza en la zona afectada térmicamente.

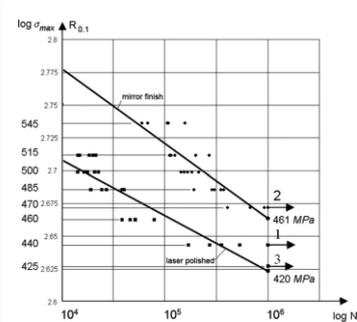


Figura II-54: Resultados de fátiga.

Los resultados mostraron que el pulido con láser crea un HAZ de aproximadamente 100–150 μm de profundidad con los parámetros utilizados en el acero AISI 1045. La fusión, evaporación y rápida solidificación de la microcapa cambia la estructura metalúrgica y genera una capa superficial cuyas características tienen una influencia significativa en la resistencia a la fatiga. La contribución directa de la rugosidad de la superficie es pequeña en comparación con el resto de los efectos del HAZ. Las tensiones residuales en las zonas de superficie y subsuelo son compresivas hasta una profundidad de 0,1 mm. Los resultados mostraron que el comportamiento de fatiga después del tratamiento se mejora o se reduce según la rugosidad de la superficie del componente antes del pulido con láser.

Se demostró que el pulido con láser, con los parámetros utilizados en este trabajo, mejora el comportamiento de fatiga del acero AISI 1045 para una vida útil de más de 10^6 ciclos si la rugosidad promedio inicial R_a es mayor que un valor umbral Rath igual a 5 μm , mientras que para rango de vida de 10^5 a 10^6 ciclos el umbral Rath es de 15 μm .

6.3 Bruñido

El bruñido de baja plasticidad (LPB) es un método de mejora del metal que proporciona tensiones residuales superficiales, estables y profundas, con poco trabajo en frío para mejorar la tolerancia al daño y la prolongación de la vida útil de la fatiga del metal. Se ha documentado un mejor rendimiento de la fatiga por fricción y la corrosión por tensión; incluso a temperaturas elevadas, donde la compresión de otros procesos del metal se relaja. También se ha demostrado que la capa profunda resultante de la tensión residual compresiva mejora la fatiga de ciclo alto y el rendimiento de fatiga de ciclo bajo.

LPB proporciona tensiones residuales compresivas profundas y estables con un menor trabajo en frío que la laminación profunda convencional. La reducción del trabajo en frío y la densidad de dislocación, así como la disposición de dislocación, mejoran la retención de la compresión beneficiosa a temperaturas elevadas. El tratamiento de la superficie de LPB se aplica mediante máquinas herramienta CNC de ejes múltiples convencionales para posicionar la herramienta y un novedoso control hidráulico dual LPB que hace flotar la bola de pulido con un volumen constante de fluido mientras controla por separado la fuerza de pulido variable sincronizada con la posición de la herramienta. Se ha demostrado que LPB mejora el rendimiento de la fatiga de ciclo alto (HCF), la fatiga por corrosión, el agrietamiento por corrosión bajo tensión y el desgaste por fatiga por fricción en componentes de motores de turbina, estructuras de

aeronaves en proceso de envejecimiento, contenedores de residuos nucleares, implantes biomédicos y juntas soldadas.

LPB es un método de pulido controlado por CNC diseñado para producir una capa profunda de esfuerzo residual altamente compresivo con una cantidad mínima de trabajo en frío. La herramienta LPB básica consta de una bola soportada por un flujo constante de fluido en un cojinete hidrostático esférico, y se puede sostener en cualquier máquina CNC o aparato de posicionamiento 268 ICSP9: SHOT PEENING. El soporte de volumen constante patentado evita que la bola entre en contacto con la superficie del rodamiento. La bola rueda por la superficie de un componente en un patrón definido por el código CNC. La trayectoria de la herramienta y la presión normal aplicada están diseñadas para crear una distribución elegida de la tensión residual de compresión. Se han desarrollado metodologías de diseño para determinar la distribución de la tensión residual necesaria para un rendimiento óptimo. A medida que la bola rueda sobre el componente, se deforma plásticamente una capa superficial con una profundidad que depende del tamaño de la bola y la fuerza normal. La restricción del material circundante produce una capa de compresión después de que la bola pasa. Ningún material es eliminado durante el proceso. LPB suaviza la rugosidad de la superficie dejando un acabado de superficie mejorado que puede ser mejor que 5 micra Ra. El diseño patentado del cojinete hidrostático de volumen constante permite que se soporten bolas duales simultáneamente en una herramienta de pinza que se muestra en la Figura II-59, que procesa el borde delantero de una pala de compresor de 17-4PH.

El pulido de bolas es un proceso económico de acabado de superficies para componentes metálicos, inicialmente desarrollado para piezas de turbinas. Se basa en presionar y hacer rodar una bola flotada hidráulicamente a lo largo de la superficie del componente que se está tratando, para deformar plásticamente las asperezas de la superficie. Este proceso reduce la rugosidad de la superficie y genera un campo profundo de tensiones residuales compresivas (hasta 1,0 mm) en las capas externas del componente. Las tensiones residuales de compresión y la alta calidad del acabado de la superficie mejoran la resistencia a la fatiga de la pieza. La deformación de la superficie es producida por una bola flotante y rodante, que casi no produce cizallamiento o trabajo en frío en la superficie, lo que favorece una baja tasa de relajación de la tensión.

Lacalle et al. [López de Lacalle, 2005], [Rodríguez, 2012], [Avilés, 2013] realizaron un estudio completo de las características superficiales y

subsuperficiales de los componentes después del pulido de bolas. Se ha desarrollado un análisis completo de los parámetros del proceso y el efecto en el material. Los resultados (Figura II-55) muestran que el pulido permite un acabado final similar al pulido a mano. En el mejor de los casos, ar 0.4 mm y ab 0.05 mm perpendicular al fresado, Ra es 0.18 micras, con aspecto de espejo. Además, el fresado parcial con ar 1 mm y el pulido a 0,05 mm muestra una rugosidad similar al fresado a 0,4 mm. En el primer caso, todo el proceso (fresado + bruñido) reduce el tiempo en un 20%. Se desarrolló una simulación numérica para predecir las tensiones residuales generadas durante el proceso de pulido de bolas y se validó experimentalmente.

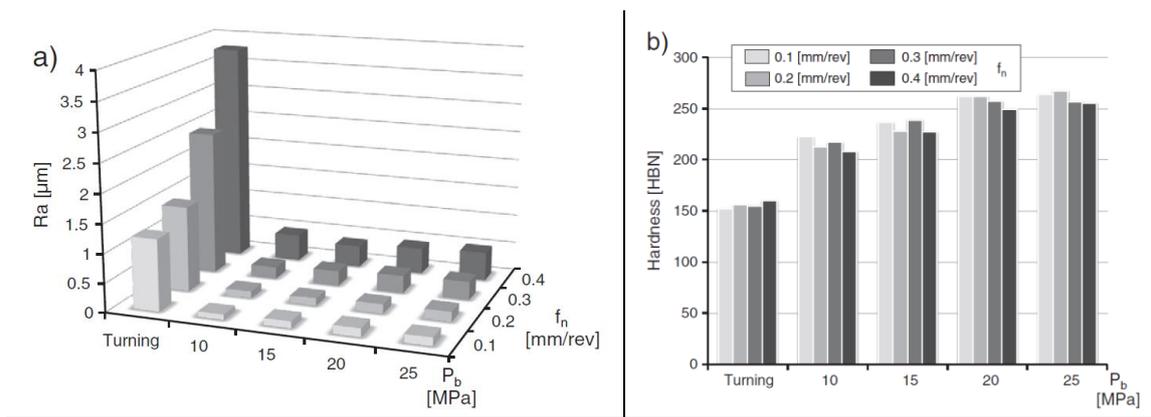


Figura II-55: (a) Resultados rugosidad obtenidos. (b) Dureza medida

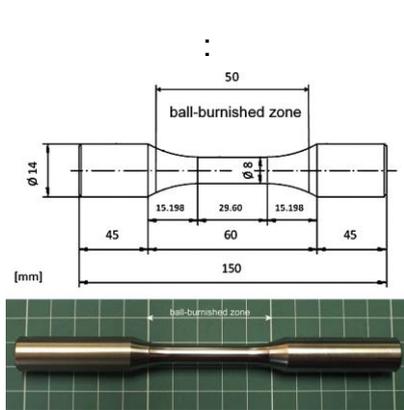


Figura II-56: Probeta fátiga ensayo bruñido.

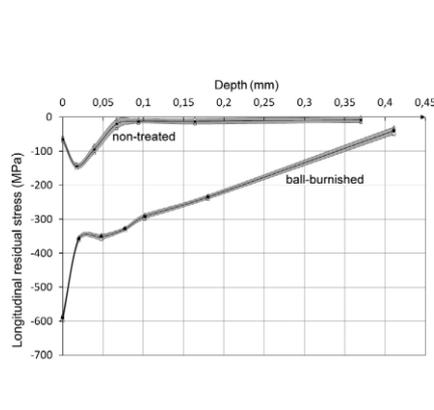


Figura II-57: Perfil tensiones residuales en probeta tratadas y no tratadas mediante bruñido.

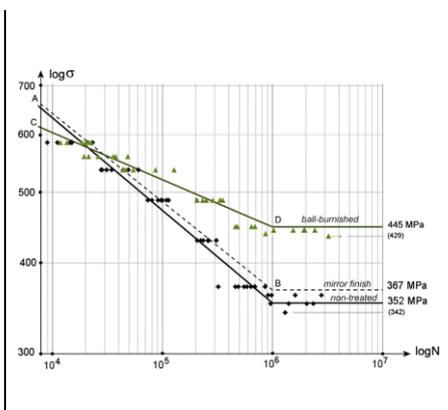


Figura II-58: Resultados fátiga probetas tratadas y no tratadas mediante bruñido.

Por otro lado, se desarrolló un estudio de los beneficios del pulido de bolas en términos del ciclo de fatiga sobre AISI 1045. Los resultados (Figura II-57 y Figura II-58) mostraron que el pulido con baja plasticidad (LPB) en el acero AISI 1045 reduce la rugosidad de la superficie sustancialmente más que los

procesos de acabado de granallado convencional (SP) y láser de choque (LSP). Las tensiones residuales de compresión son más profundas en LPB que en SP pero menos profundas que en LSP; el trabajo en frío en LPB es más bajo que en SP pero más alto que en LSP. Estos dos últimos factores conducen a una relajación de la tensión de LPB entre SP (tasa alta) y LSP (tasa baja). La mejora en el límite de fatiga de las muestras de LPB también se encuentra entre los tratamientos SP convencionales (menos beneficiosos) y los tratamientos con LSP (más beneficiosos).

El bruñido de bolas (bruñido de baja plasticidad) es un proceso económico de acabado de superficies para componentes metálicos, inicialmente desarrollado para piezas de turbinas, con Lambda Research como una de las principales empresas en este campo. Se basa en presionar y hacer rodar una bola flotada hidráulicamente a lo largo de la superficie del componente que se está tratando, de tal manera que las asperezas de la superficie se deformen plásticamente (Figura II-59). Como resultado, se reduce la rugosidad de la superficie y se genera un campo de tensiones residuales de compresión en las capas externas del componente. Las tensiones residuales de compresión y la alta calidad del acabado de la superficie mejoran la resistencia a la fatiga. Debido a que la deformación de la superficie se produce por medio de una bola flotante que rueda, casi no se produce cizallamiento y el trabajo en frío en la superficie es pequeño, lo que favorece una menor tasa de relajación de la tensión.

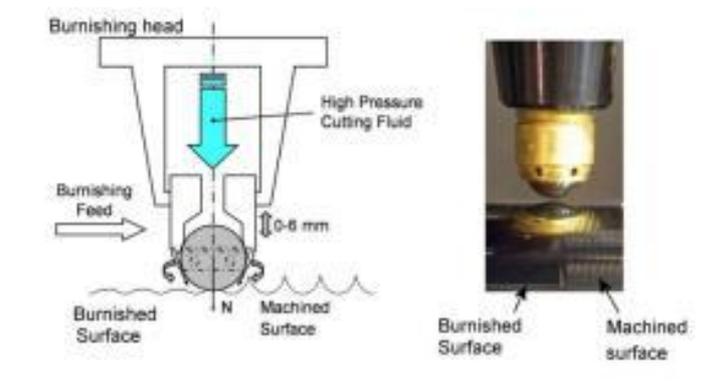


Figura II-59: Esquema Bruñido

Lamikiz et al. [Lamikiz, 2011], [López de Lacalle, 2011] aplicaron esta técnica en Inconel 718. La Tabla II-2 recoge algunos resultados obtenidos del trabajo realizado.

			Superficie fresada paso radial con herramienta Ø12mm (media de 5 pasadas)			
Presión de bruñido (fuerza normal)	Dureza Superficial	Parámetros de rugosidad µm	a _e =0.2mm	a _e =0.3mm	a _e =0.4mm	a _e =0.6mm
Antes del bruñido	41 HRC	R _a	3.24	1.12	3.08	3.33
		R _t	18.89	8.36	19.57	18.41
		R _z	30.91	5.91	29.92	30.22
10 MPa (250 N)	43,8 HRC	R _a	0.28	0.23	1.18	0.51
		R _t	3.29	0.99	5.52	2.29
		R _z	1.83	1.23	9.19	3.09
15 MPa (375 N)	44,6 HRC	R _a	0.28	0.17	0.92	0.39
		R _t	2.01	1.18	3.48	1.75
		R _z	2.93	1.56	5.04	2.10
20 MPa (500 N)	46,5 HRC	R _a	0.48	0.14	1.03	0.36
		R _t	2.82	0.94	4.60	1.58
		R _z	5.08	1.81	8.64	2.57

Tabla II-2. Resultado bruñido en Inconel 718.

En cuanto a las características de la superficie, como la microestructura, las tensiones residuales y la vida útil de la fatiga, se mejoran profundamente. En la Figura II-60 se muestra la mejora producida por el bruñido en diferentes probetas.

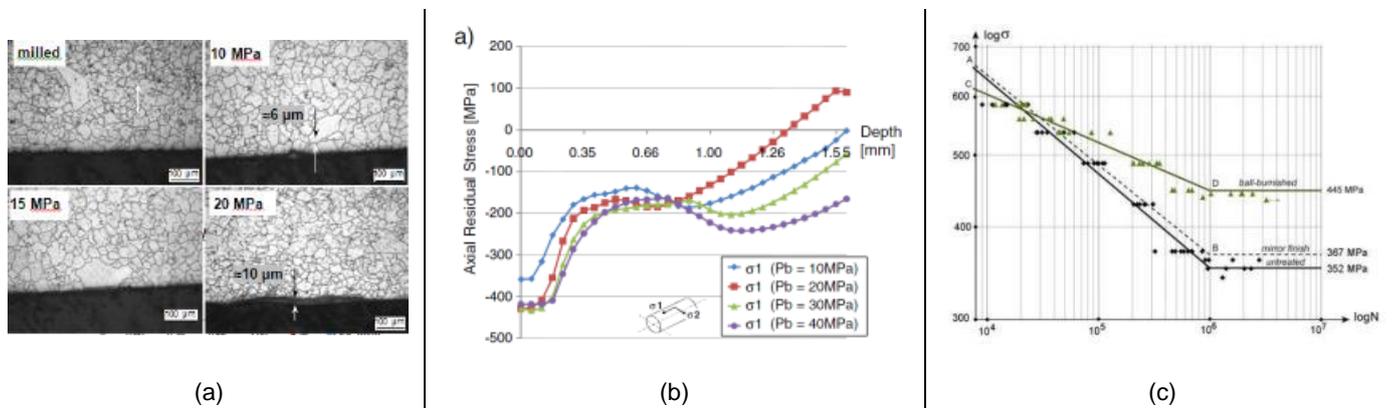


Figura II-60: (a) Microestructura después del bruñido en INCO 718; (b) Tensiones residuales en INCO 718 después de aplicar bruñido (c) Resultados fátiga en diferentes acabados superficiales.

6.4 Rectificado

El rectificado es un proceso de eliminación de material y generación de superficie que se utiliza para dar forma y acabado a los componentes hechos de metales y otros materiales. La precisión y el acabado de la superficie obtenidos a través del rectificado pueden ser hasta diez veces mejores que con el torneado o el fresado. En el proceso de rectificado, tres factores determinan la cantidad de material que se eliminará mutuamente: la nitidez de la superficie abrasiva, la magnitud de la fuerza normal y la durabilidad del abrasivo.

Beranoagirre et al. [Beranoagirre, 2013] mostraron los resultados de las pruebas de rectificado en dos tipos de aleaciones de Gamma TiAl. Las pruebas se realizaron con tres herramientas diferentes, en términos de tamaño de grano y composición. Los resultados (Figura II-61) mostraron que el acabado de la superficie estaba directamente relacionado con la velocidad de alimentación, especialmente los valores del parámetro Ra. Los valores de Rt, en general, no tenían una relación directa. Se lograron mejores resultados en todos los materiales con tasas de alimentación más bajas. El tamaño del grano tiene un efecto en los resultados obtenidos, el acabado con grano fino es mejor. Se puede concluir que los resultados logrados con los diferentes materiales certificaron que el rectificado es un proceso adecuado para obtener buenos resultados en el acabado superficial de las piezas.

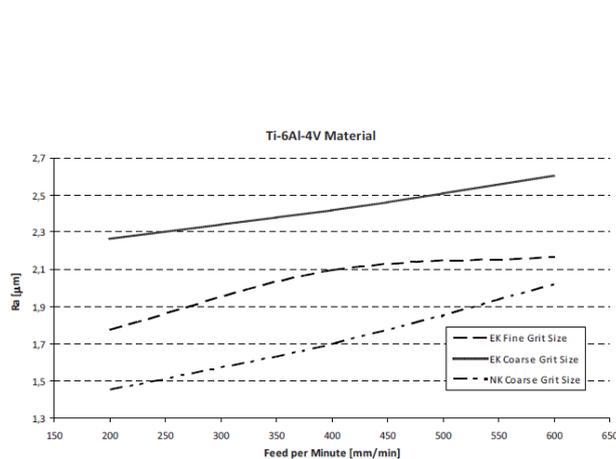


Figura II-61: Rugosidad obtenida en Ti6Al4V material.

Tool: EK COARSE

Abrasive type: Corundum Al_2O_3
 Grain size: 24-60
 Bond type: Ceramic
 Diameter: 25mm
 Hardness: Medium
 Recommended speed: 30-50 m/s
 Utilization: Low steel alloys



Tool: EK FINE

Abrasive type: Corundum Al_2O_3
 Grain size: 46-100
 Bond type: Ceramic
 Diameter: 25mm
 Hardness: Medium
 Recommended speed: 30-50 m/s
 Utilization: Low steel alloys



Figura II-62: Herramientas de rectificado.

CAPÍTULO III

Contenido sometido a confidencialidad

CAPÍTULO IV

Contenido sometido a confidencialidad

CAPÍTULO V

CAPÍTULO V: APORTACIONES Y LÍNEAS FUTURAS DEL TRABAJO

1 Aportaciones

El presente trabajo de Tesis Doctoral ha presentado en primer lugar una revisión de estado del arte en el mecanizado de materiales base níquel, principalmente utilizados en el sector aeronáutico. A continuación, se ha realizado un estudio exhaustivo del mecanizado de diferentes aleaciones, Inconel 718, Waspaloy y Haynes 282 en diferentes estados y tratamientos y su impacto en la vida de herramienta. Este estudio se ha realizado tanto en lubricación normal como en lubricación a alta presión (80bar). En el último capítulo se ha analizado métodos alternativos de fabricación para el mecanizado de Inconel 718. En este apartado, tecnologías de corte por agua y abrasivo (AWJ), corte por hilo (WEDM) y mecanizado asistido por ultrasonidos han sido evaluados y su impacto sobre la integridad superficial analizados. Para medir el impacto en la integridad superficial, diferentes aspectos han sido analizados, rugosidad superficial, tensiones residuales, dureza superficial y finalmente fatiga mediante ensayo en 4 puntos.

De este modo las principales aportaciones del presente trabajo de investigación pueden ser resumidas en los siguientes puntos:

1. Se ha realizado un estudio completo en operaciones de refrentado radial en diferentes aleaciones base níquel (Inconel 718, Waspaloy y Haynes 282), teniendo en cuenta la influencia de los tratamientos térmicos en el tamaño de grano y dureza del material.
2. Se ha desarrollado una metodología experimental para caracterización de desgaste de herramienta en operaciones de refrentado, mediante la adquisición continua de temperaturas y fuerzas en el proceso, y medidas discretas de desgaste de herramienta mediante adquisición de imágenes
3. Se ha demostrado que los estados envejecidos son los más críticos en término de desgaste de flanco y que el desgaste de notch es más acentuado en las aleaciones con materiales de tamaño de grano grande
4. Se ha demostrado que en términos de fuerzas de corte, los estados de aleaciones envejecidas, son las condiciones de aleación más exigentes, especialmente en la fuerza de avance, siendo las curvas de fuerza de corte para todos los materiales más similares.
5. Se ha observado que la metalografía de la viruta muestra que los materiales de grano grande (LGA, LGS) presentan un dentado más

- heterogéneo, mientras que los materiales de grano pequeño (SGA, SGS) presenta un dentado más homogéneo.
6. Se ha estudiado en profundidad la influencia en el desgaste de la herramienta del tipo de lubricación utilizada, comparando ensayos a presión 6 bar frente a presión a 80 bar
 7. Se ha demostrado que la temperatura en operaciones de refrentado con alta presión (80bar) alcanzan temperaturas más bajas que operaciones con lubricación a 6 bar, reduciendo la adhesión de material mecanizado en la herramienta y mejorando la vida útil de la misma,
 8. Se ha demostrado que el desgaste de flanco utilizando estrategias de lubricación con alta presión es muy estable, con una evolución del desgaste muy homogénea.
 9. Se ha demostrado que la estrategia de alta presión reduce las fuerzas de corte, especialmente en Waspaloy, y también provoca la rotura de viruta. Esta reducción de la fuerza se debe a la reducción de la zona de contacto entre el material y la herramienta.
 10. Se han estudiado diferentes tecnologías alternativas de corte (AWJ, WEDM, UVAM) para el mecanizado de Inconel 718 y se ha evaluado su impacto en términos de integridad superficial.
 11. Se ha demostrado que una de las variables influyente en los resultados de fatiga es el valor de rugosidad superficial. La vida media esperada de fatiga de las probetas está completamente de acuerdo con los valores de rugosidad de las muestras de las diferentes tecnologías de corte empleadas. Los valores de rugosidad más bajos son presentados por las probetas fresadas y al mismo tiempo presentan las vidas de fatiga más altas.
 12. Se ha demostrado que las tensiones residuales están relacionadas con el método de fabricación. Las muestras mecanizadas, las mecanizadas asistidas por ultrasonidos y las obtenidas mediante AWJ tienen un estado residual de compresión en la región superficial, mientras que las muestras WEDM tienen un estado de tensión de tracción.
 13. Se ha observado que las probetas mecanizadas asistidas por ultrasonidos mejoran la vida de fatiga de las muestras en un 12% con las mismas condiciones de corte que las muestras convencionales fresadas. Esto se relaciona con la deformación de la microcapa sub-superficial, derivada de los esfuerzos de compresión.

Con el resultado de este trabajo de investigación, se han realizado siete publicaciones en diferentes revistas científicas.

- ✓ **Suárez A.**, Veiga F., Lopez de Lacalle L.N., Polvorosa R., Lutze S., Wretland A. ***Effects of Ultrasonic- Assisted Face Milling on Surface Integrity and Fatigue Life of Ni-Inconel 718***. Journal of Material Engineering and Performance 2016, Vol 25, Issue 11, pp 5076-5086. <https://doi.org/10.1007/s11665-016-2343-6>
- ✓ **A. Suárez**, L. N. López de Lacalle, R. Polvorosa, F. Veiga, A. Wretland (2017) ***Effects of high-pressure cooling on the wear patterns on turning inserts used on alloy IN718***. Materials and Manufacturing Processes, 32:6, 678-686, <https://doi.org/10.1080/10426914.2016.1244838>
- ✓ Polvorosa R, **Suárez A**, Lopez de Lacalle L.N., Cerillo I, Wretland A, Veiga F. ***Tool wear on nickel alloys with different coolant pressures: Comparison of Inconel 718 and Waspalloy***. Journal of Manufacturing Processes 2017, 26, 44-56. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.01.012>
- ✓ M. Murua, **A. Suárez**, L.N. López de Lacalle, R. Santana, A. Wretland. ***Feature extraction-based prediction of tool wear of Inconel 718 in face turning***. Insight, Vol 60, No 8, August 2018. DOI: 10.1784/insi.2017.59.1.XXX
- ✓ **A. Suárez**, F. Veiga, L.N. López de Lacalle, R. Polvorosa, A. Wretland. ***An investigation of cutting forces and tool wear in turning of Haynes 282***. Journal of Manufacturing Processes 37 (2019) 529–540. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.12.025>
- ✓ **A. Suárez**, F. Veiga, R. Polvorosa, T. Artaza, J. Holmberg, L.N. López de Lacalle, A. Wretland. ***Surface integrity and fatigue of non-conventional machined Inconel 718***. Under Revision in Journal of Manufacturing Processes.
- ✓ J. Holmberg, **A. Suárez**, A. Wretland, J. Berglund, T. Beno. ***Surface integrity investigations for assessment of fatigue properties after machining of alloy 718***. Under Revision in The International Journal of Advanced Manufacturing Technology

2 Líneas futuras

La presente línea de investigación abre nuevas líneas en el mecanizado de materiales base níquel, entre las que merece la pena destacar:

1. Estudio en profundidad de nuevas aleaciones base níquel y la influencia del tratamiento térmico en el desgaste de la herramienta,
2. Extrapolar el estudio de refrentado radial a otras operaciones de mecanizado y extraer modelo que permitan relacionar las fuerzas del proceso con el desgaste de la herramienta,
3. Continuar la línea de mecanizado asistido a alta presión, pero a regímenes de presiones superiores (alrededor de 200bar),
4. Explorar el mecanizado asistido térmicamente, como alternativa para reducir fuerzas del proceso que permitan incrementar el volumen de material arrancado.
5. Continuar la línea de tecnologías alternativas de corte, explorando en profundidad la tecnología de corte por agua y abrasivo, tanto en macro corte como en micro corte. Expandir este estudio a tecnologías de corte laser guiado por agua, conocida como Laser Microjet [SYNOVA] y su impacto en la integridad superficial del componente.
6. Estudiar etapas de postprocesados para mejora de la integridad superficial del componente.

Por último, y ante las necesidades de fabricación necesarias para los próximos años dentro del sector aeronáutico, es necesario prestar atención a la fabricación aditiva y su efecto en la producción de piezas de motor aeronáutico. Dentro de las tecnologías aditivas, LMD y WAAM merecen un estudio en profundidad por tamaño y tipología de pieza que pueden fabricar. En el País Vasco, dos empresas del mundo de la máquina herramienta han sacado al mercado soluciones en este tipo de tecnologías. Centro de mecanizado híbrido, LMD+Mecanizado desarrollado por [IBARMIA] y una máquina exclusiva para la fabricación de preforma metálica mediante tecnología WAAM [ADDILAN]

REFERENCIAS

REFERENCIAS

- [ADDILAN] ADDILAN S.L. www.addilan.com
- [Ahmed, 2006] N. Ahmed, A.V. Mitrofanov, V.I. Babitsky, V.V. Silberschmidt. *Analysis of material response to ultrasonic vibration loading in turning Inconel 718*. Materials Science and Engineering: A 2006, 424 (1–2), 318–325.
- [Airbus, 2015] Airbus Global Market Forecast (2015-2034)
- [Alberdi, 2010] A. Alberdi, A. Rivero, L. N. López de Lacalle, I. Etxeberria, y A. Suárez, *Effect of process parameter on the kerf geometry in abrasive water jet milling*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 51 (5–8), 467–480..
- [Alberdi, 2011] A. Alberdi, A. Rivero, L.N. López de Lacalle, *Experimental study of the slot overlapping and tool path variation in abrasive waterjet milling*. ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering 133 (2011), no 3, 034502.1-034502.4
- [Alberdi, 2012] A. Alberdi, A. Rivero, A. Carrascal, y A. Lamikiz, *Kerf Profile Modelling in Abrasive Waterjet Milling*. Materials Science Forum: Advances in Non Conventional Materials Processing Technologies, vol. 713, pp. 91-96, 2012.
- [Alberdi, 2013] A. Alberdi et al. *Composite Cutting with Abrasive Water Jet*. Procedia Engineering 63 (2013) 421 – 429.
- [Alberdi, 2015] A. Alberdi et al. An experimental study on abrasive waterjet cutting of CFRP/Ti6Al4V stacks for drilling operations. International Journal Advance Manufacturing Technologies (2015).
- [Arizmendi, 2008] M. Arizmendi et al. Model development for the prediction of surface topography generated by ball-end mills taking into account the tool parallel axis offset. Experimental validation. CIRP Annals - Manufacturing Technology 57 (2008) 101–104
- [Arizmendi, 2009] M. Arizmendi et al. Model for surface topography prediction in peripheral milling considering tool vibration. CIRP Annals - Manufacturing Technology 58 (2009) 93–96

- [Arola, 1997] D. Arola y M. Ramulu, *Material removal in abrasive waterjet machining of metals Surface integrity and texture*. Wear, vol. 210, n.o 1-2, pp. 50-58, sep. 1997
- [Arrizubieta, 2013] I. Arrizubieta et al. Internal characterization and hole formation mechanism in the laser percussion drilling process. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 75 (2013) 55–62
- [Artaza, 2015] T. Artaza et al. Abrasive Waterjet texturing as a method to enhance the embedment of metallic inserts in composite materials. *Procedia Engineering* 132 (2015) 724 – 731
- [ASM International, 1991] ASM International Handbook Committee, *ASM Handbook: Volume 4. Heat Treating, tenth ed.* ASM International, 1991.
- [Astashov, 2007] V.K. Astashev, V.I. Babitsky. *Ultrasonic Processes and Machines*. Springer 2007.
- [Avilés, 2011] R. Avilés et al. Influence of laser polishing on the high cycle fatigue strength of medium carbon AISI 1045 steel. *International Journal of Fatigue* 33 (2011) 1477–1489
- [Avilés, 2013] R. Avilés et al. Influence of low-plasticity ball burnishing on the high-cycle fatigue strength of medium carbon AISI 1045 steel. *International Journal of Fatigue* 55 (2013) 230–244.
- [Ayesta, 2016] I. Ayesta, B. Izquierdo, O. Flaño, J. A. Sánchez, J. Albizuri, and R. Avilés, *Influence of the WEDM process on the fatigue behavior of Inconel® 718*. *International Journal of Fatigue*, vol. 92, pp. 220–233, Nov. 2016.
- [Babitsky, 2004] V.I. Babitsky, A.V. Mitrofanov, V.V. Silberschmidt. Ultrasonically assisted turning of aviation materials: simulations and experimental study. *Ultrasonics* 2004, 42 (1–9), 81–86.
- [Baoyun, 2010] Baoyun QI, Liang LI, Ning HE. *Effects of cooling/lubrication conditions on High-Speed Turning Ti6Al4V*. Proceedings of 4th CIRP International Conference on High Performance Cutting 2010.
- [Barriuso, 2011] S. Barriuso, M. Lieblich, M. Multigner, I. Etxeberria, A. Alberdi, y J. L. González-Carrasco, *Roughening of metallic biomaterials by abrasiveless waterjet peening: characterization and viability*. Wear, 2011 Volume 270, pp. 634-639.

- [Beranoagirre, 2011] A. Beranoagirre et al. Topography prediction of Milling of emerging aeronautical Ti alloys. *Physics Procedia* 22 (2011) 136 – 143.
- [Beranoagirre, 2013] A. Beranoagirre et al. *Grinding of Gamma TiAl Intermetallic Alloys*. *Procedia Engineering* 63 (2013) 489 – 498
- [Berglund, 2011] J. Berglund, D. Wiklund, and B. G. Rosén, A method for visualization of surface texture anisotropy in different scales of observation. *Scanning*, vol. 33, no. 5, pp. 325–331, 2011.
- [Boehlert, 2011] C.J. Boehlert, S.C. Longanbach. *A comparison of the microstructure and creep behavior of cold rolled HAYNES® 230 Alloy™ and HAYNES® 282 alloy™*. *Materials Science and Engineering*, Volume 528, Issue 15, 15 June 2011, Pages 4888–4898
- [Bonilla, 2015-a] A.E. Bonilla Hernández et al, Analysis of tool utilization from material removal rate perspective. *Procedia CIRP* 29 (2015) 109-113.
- [Bonilla, 2015-b] Ana E. Bonilla Hernández, *Doctoral Dissertation “Analysis and direct optimization of cutting tool utilization in CAM”*. Licentiate Thesis Production Technology 2015 N°7 University West.
- [Bonilla, 2016] A.E. Bonilla Hernández et al., Integrated optimization model for cutting data selection based on maximal MRR and tool utilization in continuous machining operations. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 13 (2016) 46-50.
- [Boud, 2010] F. Boud, C. Carpenter, J. Folkes, y P. H. Shipway, *Abrasive waterjet cutting of a titanium alloy: The influence of abrasive morphology and mechanical properties on workpiece grit embedment and cut quality*. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 210, n.o 15, pp. 2197-2205, nov. 2010.
- [Buckson, 2012] R.A. Buckson, O.A. Ojo. Cyclic deformation characteristics and fatigue crack growth behaviour of a newly developed aerospace superalloy Haynes 282.
- [Calleja, 2013] A. Calleja et al. Reliable Manufacturing Process in Turbine Blisks and Compressors. *Procedia Engineering* 63 (2013) 60 – 66.

- [Campa, 2007] F.J. Campa et al. Selection of cutting conditions for a stable milling of flexible parts with bull-nose end mills. *Journal of Materials Processing Technology* 191 (2007) 279–282.
- [Cantero, 2013] J.L. Cantero, J. Díaz-Álvarez, M.H. Miguélez, N.C. Marín, *Analysis of tool wear patterns in finishing turning of Inconel 718*. *Wear* 297 (1-2) (2013) 885–894.
- [Carrascal, 2010] A. Carrascal y A. Alberdi, *Evolutionary Industrial Physical Model Generation”, in Hybrid Artificial Intelligence Systems*. 2010, vol. 6076, pp. 327-334.
- [Cedergren, 2013] S. Cedergren et al., On the influence of work material microstructure on viruta formation, cutting forces and acoustic emission when machining Ti-6Al-4V. *Procedia CIRP* 12 (2013) 55 – 60
- [Celaya, 2010-a] A. Celaya, L.N. López de Lacalle, F.J. Campa, A. Lamikiz. *Ultrasonic Assisted Turning of mild steels*. *International Journal of Materials and Product Technology* 2010, 37 (1-2), 60-70.
- [Celaya, 2010-b] Celaya et al. *Assisted machining processes Metal cutting: research advances*. Nova Science Publishers, New York, 2010.
- [Chen, 2002] F. L. Chen, E. Siores, K. Patel, y A. W. Momber, *Minimising particle contamination at abrasive waterjet machined surfaces by a nozzle oscillation technique*. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 42, n.o 13, pp. 1385-1390, oct. 2002.
- [Chillman, 2010] A. Chillman, M. Hashish, y M. Ramulu, *Alpha case removal for SPF titanium alloys*. Graz, Austria, 2010.
- [Choudhury, 1998] I.A. Choudhury, M.A. El-Baradie. *Machinability of nickel-base super alloys: a general review*. *Journal of Materials Processing Technology* 1998, 77 (1-3), 278–284.
- [Churi, 2006] Churi N.J., Pei Z.J., Treadwell C. *Rotary Ultrasonic Machining of Titanium Alloy: Effects of Machining Variables*. *Machining Science and Technology* 2006, 10 (3), 301–321.

- [Corduan, 2003] N. Corduan, T. Himbert, G. Poulachon, M. Dessoly, M. Lambertin, J. Vigneau, B. Payoux. *Wear mechanisms of new tool materials for Ti-6Al-4V high performance machining*. CIRP Annals - Manufacturing Technology 2003, 52 (1), 73–76.
- [Courbon, 2009] C. Courbon, D. Kramar, P. Krajnik, F. Pusavec, J. Rech, J. Kopac. *Investigation of machining performance in high-pressure jet assisted turning of Inconel 718: An experimental study*. International Journal of Machine Tools and Manufacture 2009. 49 (14), 1114-1125.
- [Dahlmann, 2002] P. Dahlmann. A comparison of temperature reduction in high-pressure jet-assisted turning using high pressure versus high flowrate. Proc. IMechE B: Journal of Engineering Manufacture 2002, 216 (4), 467–473.
- [Date, 2009] N. Date, P. Krishnaswami, V.V. Satish K. *Motipalli Automated process planning method to machine A B-Spline free-form feature on a mill–turn center*. Computers & Industrial Engineering, Volume 56, Issue 1, February 2009, Pages 198-207.
- [Dauw, 1990] Dauw D.F., Brown C.A., J.P.Van Griethuysen, J.F.L.M.Albert, Surface topography investigations by fractal analysis of spark-eroded, electrically conductive ceramics. Ann.CIRP 39(1):161-165(1990)
- [Devillez, 2007] A. Devillez, F. Schneider, S. Dominiak, D. Dudzinski, D. Larrouquere, *Cutting forces and wear in dry machining of Inconel 718 with coated carbide tools*. Wear (2007), 262 (7-8) 931–942.
- [Devillez, 2011] A. Devillez, G. Le Coz, S. Dominiak, D. Dudzinski, *Dry machining of Inconel 718, workpiece surface integrity*. Journal of Materials Processing Technology (2011), 211 (10) 1590–1598.
- [Donachie, 2002] M. J. Donachie, S.J. Donachie. Superalloys. A Technical Guide. Second Edition.
- [Dubey, 2008] A. K. Dubey; V. Yadava. *Laser beam machining—A review*. International Journal of Machine Tools & Manufacture 48 (2008) 609–628.

- [Dudzinski, 2004] D. Dudzinski, A. Devillez, A. Moufki, D. Larrouuère, V. Zerrouki, J. Vigneau. *A review of developments towards dry and high speed machining of Inconel 718 alloy*. International Journal of Machine Tools and Manufacture 2004, 44 (4), 439–456.
- [Ezugwu, 1999] E.O. Ezugwu, Z.M. Wang, A.R. Machado. *The machinability of nickel-based alloys: a review*. Journal of Materials Processing Technology 1999, 86 (1–3), 1–16.
- [Ezugwu, 2003] E.O. Ezugwu, J. Bonney, Y. Yamane, *An overview of the machinability of aeroengine alloys*. Journal of Materials Processing Technology (2003), 134 (2) 233–253.
- [Ezugwu, 2004] E.O. Ezugwu, J. Bonney, Effect of high-pressure coolant supply when machining nickel-base, Inconel 718, alloy with coated carbide tools. Journal of Materials Processing Technology (2004), 153–154:1045–1050.
- [Ezugwu, 2005] E.O. Ezugwu, *Key improvements in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys*. International Journal of Machine Tools & Manufacture 45 (2005) 1353–1367.
- [Fowler, 2005] G. Fowler, P. H. Shipway, y I. R. Pashby, *A technical note on grit embedment following abrasive water-jet milling of a titanium alloy*. Journal of Materials Processing Technology, vol. 159, n.o 3, pp. 356-368, feb. 2005.
- [García Navas, 2013] V. García Navas et al. Mechanisms involved in the improvement of Inconel 718 machinability by laser assisted machining (LAM). International Journal of Machine Tools & Manufacture 74 (2013) 19–28
- [Garg, 2010] Garg R., PhD Thesis, Mechanical Engineering, NIT Kurukshetra, Haryana (2010)
- [Grazeviciute, 2008] Grazeviciute, J., Skiedraite, I., Jurenas, V., Bubulis, A., Ostasevicius, V. *Applications of high frequency vibrations for surface milling*. Mechanika 2008, 1, 46- 49.
- [Grzesik, 2008-a] W. Grzesik, *High Performance and High Efficiency Machining, Advanced Machining Processes of Metallic Materials*. 2008, Pages 259-278, XI.

- [Grzesik, 2008-b] W. Grzesik , *Multitasking and On-pass Machining*. Advanced Machining Processes of Metallic Materials, 2008, Pages 278-289, XII,
- [Haynes International] Haynes International.Haynes®282® Alloy.
- [Henning,1997] A. Henning, *Computer Aided Manufacturing for Three-Dimensional Abrasive Water Jet Machining*. presented at the 9th American Waterjet Conference, Dearborn, Michigan, 1997.
- [Ho, 2003] Ho KH, Newman ST. *State of the art electrical discharge machining (EDM)*. International Journal of Machine Tools and Manufacture 2003, Volume 43, Issue 13, Pages 1287-1300.
- [Ho, 2004] Ho, K.H and Newman, S.T., *State of the art in wire electrical discharge machining (WEDM)*. Int.J.Mach.Tools Manuf.44:1247-1259(2004)
- [Holmberg, 2016] J. Holmberg et al. Residual stress state in an induction hardened steel bar determined by synchrotron-and neutron diffraction compared to results from lab-XRD. Materials Science & Engineering A 667 (2016) 199–207
- [Hood, 2011] R. Hood, S.L. Soo, D.K. Aspinwall, P. Andrews, C. Sage. *Twist drilling of Haynes 282 Superalloy*. Procedia Engineering, Volume 19, 2011, (150-155.)
- [Hosseini, 2011] Hosseini, S.B. Determination of stresses and retained austenite in carbon steels by x-rays – A round robin study. Experimental mechanics, Vol. 51, pp. 59-69, 2011.
- [Hosseini, 2015] Hosseini, S. B. (2015). White layer formation during hard turning of through-hardened martensitic and bainitic AISI 52100 steel. ISBN: 978-7597-166-7.
- [Hsu, 2009] Hsu I., Tsao C. *Study on the Effect of Frequency Tracing in Ultrasonic-Assisted Drilling of Titanium Alloy*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 2009, 43 (1), 127–135.
- [Huang, 2013] L. Huang et al. Parametric Effects on Grit Embedment and Surface Morphology in an Innovative Hybrid Waterjet Cleaning Process for Alpha Case Removal from Titanium Alloys. Procedia CIRP, vol. 6, pp. 594–599, 2013
- [IBARMIA] IBARMIA ZVH 45/L1600 Add&Process. www.ibarmia.com

- [Jäger, 2016] Henrik Jäger et al. EDS Analysis of Flank Wear and Surface Integrity in Machining of Inconel 718 with Forced Coolant Application. *Procedia CIRP* 45 (2016) 271 – 274
- [Jangra, 2011] Jangra K., Grover S., Felix T.S. Chan, Aggarwal A., *Digraph and method to evaluate the machinability of tungsten carbide composite with wire EDM*. *Int J Manuf Technol*, 56: 959-974(2011)
- [Kalyan Kumar, 2008] K.V.B.S. Kalyan Kumar, S.K. Choudhury, *Investigation of tool wear and cutting force in cryogenic machining using design of experiments*. *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 203, Issues 1–3, 18 July 2008, Pages 95-101,
- [Kennedy, 2005] Kennedy R, Cao W, Bayha T, Jeneski R, 2005. *Cobalt News*. April 5–7.
- [Khanna, 2010] Khanna N, Sangwan KS. *Comparison of Cutting Tool Performance in Machining of Titanium Alloys and Inconel 718 Super Alloy*. *Proceedings of 4th CIRP International Conference on High Performance Cutting 2010*.
- [Klocke, 2011] F. Klocke, H. Sangermann, A. Krämer, D. Lung. Influence of a high-pressure lubricoolant supply on thermo-mechanical tool load and tool wear behaviour in the turning of aerospace materials. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture 2011*, 225 (2), 52–61.
- [Krämer, 2014] A. Krämer, F. Klocke, H. Sangermann, D. Lung. *Influence of the lubricoolant strategy on thermo-mechanical tool load*. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 2014*, 7 (1), 40-47.
- [Lamikiz, 2004] A. Lamikiz et al. *Cutting force estimation in sculptured surface milling*. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 44 (2004) 1511–1526
- [Lamikiz, 2005] A. Lamikiz et al. *CO2 laser cutting of advanced high strength steels (AHSS)*. *Applied Surface Science* 242 (2005) 362–368
- [Lamikiz, 2007] A. Lamikiz et al. *Laser polishing of parts built up by selective laser sintering*. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 47 (2007) 2040–2050

- [Lamikiz, 2010] A. Lamikiz, I. Tabernero, E. Ukar, L. N. López de Lacalle, and J. Delgado, *Influence of the Laser Cladding Strategies on the Mechanical Properties of Inconel 718*. American Institute of Physics, Conf. Proc., 2010 Volume 1345, pp. 1576-1581, ISBN: 978-0-7354-0871
- [Lamikiz, 2011] A. Lamikiz, L. N. López de Lacalle, et al., European patent PCT/ES2011/070540, *Method for supplying metallic materials*.
- [Li, 2009] W. Li, P.J. Withers, D. Axinte, M. Preuss, P. Andrews. *Residual stresses in face finish turning of high strength nickel-based superalloy*. Journal of Materials Processing Technology 2009, 209 (10), 4896–4902.
- [Li, 2013] Li L, Guo YB, Wei XT, Li W. Surface integrity characteristics in wire-EDM of inconel 718 at different discharge energy. Procedia CIRP 2013, 6, 220 – 225.
- [Lieblich, 2016] M. Lieblich et al. On the fatigue behaviour of medical Ti6Al4V roughened by grit blasting and abrasiveless waterjet peening. Journal of the mechanical behaviour of biomedical materials 63 (2016) 390-398.
- [López de Lacalle, 2000-a] L.N. López de Lacalle, et al. *Advanced cutting conditions for the milling of aeronautical alloys*. Journal of Materials Processing Technology 100 (2000) 1-11.
- [López de Lacalle, 2000-b] L.N. Lopez de Lacalle, J. Pérez-Bilbatua, J.A. Sanchez, J.I. Llorente, A. Gutiérrez, J. Alboniga. *Using high-pressure coolant in the drilling and turning of low machinability alloys*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 2000, 16 (2), 85–91.
- [López de Lacalle, 2004] López de Lacalle, L.N. et al A. *Plasma Assisted Milling of Heat-Resistant Superalloys*. 2004 Journal of manufacturing science and engineering, 126(2), pp. 274-285
- [López de Lacalle, 2005] L.N. López de Lacalle et al. *Quality improvement of ball-end milled sculptured surfaces by ball burnishing*. International Journal of Machine Tools & Manufacture 45 (2005) 1659–1668
- [López de Lacalle, 2006] L.N. López de Lacalle et al. Recording of real cutting forces along the milling of complex parts. Mechatronics 16 (2006) 21–32

- [López de Lacalle, 2011] L. N. López de Lacalle, A. Rodríguez, A. Lamikiz, A. Celaya, *Combining multiaxis machining and burnishing in complex parts.*, Advanced Materials Research, ISSN 1022-6680 Vol.188 (2011) pp 43-48
- [Machado, 1994] A.R. Machado, J. Wallbank, The Effects of a High-Pressure Coolant Jet on Machining, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part B: Journal of Engineering Manufacture (1994), 208 (1) 29–38.
- [Manna, 2006] Manna, A., Bhattacharyya, B., Taguchi and Gauss elimination method: A dual response approach for parametric optimization of CNC wire cut EDM of PRAISiCMMC. Int.J.Manuf Technol, 28:67-75(2006)
- [Matsuo, 1992] Matsuo T., and Oshima E., Investigation on the optimum carbide content and machining condition for wire EDM of zirconia ceramics. Ann. CIRP 41(1): 231-234(1992)
- [Maurotto, 2013] Agostino Maurotto, Riaz Muhammad, Anish Roy, Vadim V. Silberschmidt. *Enhanced ultrasonically assisted turning of a β -titanium alloy*. Ultrasonics 2013, 53 (7), 1242–1250.
- [Maurotto, 2016] A. Maurotto, C.T. Wickramarachchi. Experimental investigations on effects of frequency in ultrasonically-assisted end-milling of AISI 316L: A feasibility study. Ultrasonics 2016, 65, 113-120.
- [Miller, 2000] Miller, M. (2000). *Atom Probe Tomography: Analysis at the Atomic Level*. Kluwer Academic/Plenum Publishers. ISBN 0-306-46415-2.
- [Moriwaki, 2008] T. Moriwaki, *Multi -functional machine tool*. CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 57, Issue 2, 2008, Pages 736-749.
- [Müller, 1970] Müller, E. W. (1970). *The Atom-Probe Field Ion Microscope*. Naturwissenschaften. 5: 222–230.
- [Murua, 2018] M. Murua, A. Suárez, L.N. López de Lacalle, R. Santana, A. Wretland. *Feature extraction-based prediction of tool wear of Inconel 718 in face turning*. Insight, Vol 60, No 8, August 2018.

- [Mustafa, 2010] Mustafa Ay, Çaydaş U, Hasçalik A. Effect of Traverse Speed on Abrasive Waterjet Machining of Age Hardened Inconel 718 Nickel-Based Superalloy. *Materials and Manufacturing Processes*, 2010, 25:10, 1160-1165.
- [Olovsjö, 2010-a] S. Olovsjö, A. Wretland, G. Sjöberg. The effect of grain size and hardness of wrought Inconel 718 on the wear of cemented carbide tools. *Wear* 2010, 268 (9–10), 1045-1052.
- [Olovsjö, 2010-b] Olovsjö, S., Wretland, A. & Sjöberg, G. The effect of grain size and hardness of Waspaloy on the wear of cemented carbide tools. *Int J Adv Manuf Technol* (2010) 50: 907.
- [Olovsjö, 2012] S. Olovsjö, L. Nyborg, Influence of microstructure on wear behavior of uncoated WC tools in turning of Inconel 718 and Waspaloy. *Wear* 282– 283 (2012) 12– 21
- [Olsen, 1999] J. H. Olsen, *Motion control for quality in jet cutting*. U.S. Patent 589234506-abr-1999.
- [Ostasevicius, 2013] V. Ostasevicius, R. Gaidys, R. Dauksevicius, S. Mikuckyte. *Study of Vibration Milling for Improving Surface Finish of Difficult-to-Cut Materials*. *Journal of Mechanical Engineering* 2013, 59 (6), 351–357.
- [Patil, 2006] Patil N.G., Brahmanekar P.K. some investigations into wire electro-discharge machining performance of Al/SiCp composites. *Int J Machin Mater* 1 (4): 412-431(2006).
- [Pereira, 2015-a] O. Pereira et al. *The use of hybrid CO₂ + MQL in machining operations*. *Procedia Engineering* 132 (2015) 492 – 499.
- [Pereira, 2015-b] O. Pereira et al. Cryogenic Hard Turning of ASP23 steell using Carbon Dioxide. *Procedia Engineering* 132 (2015) 486 – 491.
- [Pigott, 1952] R.J.S. Pigott, A.T. Colwell. *Hi-jet system for increasing tool life*. *SAE Technical Papers* 1952, 6 (3), 547–566.
- [Polvorosa, 2017] Polvorosa R, Suarez A, Lopez de Lacalle LN, Cerillo I, Wretland A, Veiga F. *Tool wear on nickel alloys with different coolant pressures: Comparison of Inconel 718 and Waspalloy*. *Journal of Manufacturing Processes* 2017, 26, 44-56.

- [Pu, 2012] Z. Pu, J.C. Outeiro, A.C. Batista, O.W. Dillon Jr, D.A. Puleo, I.S. Jawahir, Enhanced surface integrity of AZ31B Mg alloy by cryogenic machining towards improved functional performance of machined components. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 56, May 2012, Pages 17-27.
- [Pujana, 2009] Pujana J, Rivero A, Celaya A, López de Lacalle LN. *Analysis of Ultrasonic- Assisted Drilling of Ti6Al4V*. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 2009, 49 (6), 500–508.
- [Pušavec, 2011-a] F. Pušavec, E. Govekar, J. Kopač, I.S. Jawahir, *The influence of cryogenic cooling on process stability in turning operations*. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Volume 60, Issue 1, 2011, Pages 101-104.
- [Pusavec, 2011-b] F. Pusavec, H. Hamdi, J. Kopac, I.S. Jawahir. *Surface integrity in cryogenic machining of nickel based alloy Inconel 718*. *Journal of Materials Processing Technology* 2011, 211 (4), 773-783.
- [Rajesh, 2001] N. Rajesh, N. Ramesh Badu, *Water jet peening - A new surface treatment process*. *International Conference on Shot Peening and Blast Cleaning*.
- [Rhoney, 2002] Rhoney B.K., Shih, A.J., Scattergood, R.O., R. Ott, S.B. McSpadden, *Wear mechanism of metal bond diamond wheels trued by wire electrical discharge machining*. *Wear* 252(7-8)644-653(2002)
- [Rivero, 2008] A. Rivero et al. Tool wear detection in dry high-speed milling based upon the analysis of machine internal signals. *Mechatronics* 18 (2008) 627–633
- [Rodríguez, 2012] A. Rodríguez et al. *Surface improvement of shafts by the deep ball-burnishing technique*. *Surface & Coatings Technology* 206 (2012) 2817–2824
- [Savas, 2007] V. Savas, C. Ozay, *Analysis of the surface roughness of tangential turn-milling for machining with end milling cutter*. *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 186, Issues 1–3, 7 May 2007, Pages 279-283.
- [Seguy, 2008] Seguy, S., Desein, G., Arnaud, L. (2008). *Surface roughness variation of thin wall milling, related to modal interactions*. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 2008, 48, (3-4), 261-274.

- [Shaw, 2005] M.C. Shaw. *Metal Cutting Principles*. Second ed., Oxford University Press, New York (2005). ISBN 978-0-19-514206-8.
- [Shipway, 2008] P. H. Shipway y J. Folkes, *Mechanism of coating removal with waterjets*. presented at the 19th International Conference on Water Jetting, 2008, pp. 193-202.
- [Silberschmidt, 2014] Silberschmidt V.V., Mahdy S.M.A., Gouda M.A., Naseer A., Maurotto A., Roy A. *Surface-Roughness Improvement in Ultrasonically Assisted Turning*. Procedia CIRP 2014, 13, 49–54.
- [Singh, 1995] J. Singh. y S. C. Jain, *Mechanical issues in laser and abrasive water jet cutting*. JOM, vol. 47, n.o 1, pp. 28-30, ene. 1995.
- [Suárez, 2013] A. Suárez et al. *Evaluation on Advantages of Vibration Assisted Drilling (VAD) in Aerospace Materials*. Proceedings of the 3rd EASN Association International Workshop on Aerostructures, Milano 2013
- [Suárez, 2016] Suarez A, Veiga F, Lopez de Lacalle LN, Polvorosa R, Lutze S, Wretland A. *Effects of Ultrasonic-Assisted Face Milling on Surface Integrity and Fatigue Life of Ni-Inconel 718*. Journal of Material Engineering and Performance 2016, Vol 25, Issue 11, pp 5076-5086.
- [Suárez, 2017] A. Suárez, L. N. López de Lacalle, R. Polvorosa, F. Veiga & A. Wretland (2017), *Effects of high-pressure cooling on the wear patterns on turning inserts used on alloy IN718*. Materials and Manufacturing Processes, 32:6, 678-686.
- [Suárez, 2019-a] A. Suárez, F. Veiga, L.N. López de Lacalle, R. Polvorosa, A. Wretland. *An investigation of cutting forces and tool wear in turning of Haynes 282*. Journal of Manufacturing Processes 37 (2019) 529–540.
- [Suárez, 2019-b] A.Suárez, F. Veiga, R.Polvorosa, T. Artaza, J. Holmberg, L.N. López de Lacalle, A. Wretland. *Surface integrity and fatigue of non-conventional machined Inconel 718*. Under Revision in Journal of Manufacturing Processes.
- [SYNOVA] SYNOVA. www.synova.ch/

- [Tabernero, 2010] I. Tabernero et al. Numerical simulation and experimental validation of powder flux distribution in coaxial laser cladding. *Journal of Materials Processing Technology* 210 (2010) 2125–2134
- [Tabernero, 2011] I. Tabernero, A. Lamikiz, S. Martínez, E. Ukar, J. Figuras, *Evaluation of the mechanical properties of Inconel 718 components built by laser cladding*. *International Journal of Machine Tool & Manufacture*, Volume 51, Issue 6, June 2011, pages 465-470 (2011) ISSN: 0890-6955.
- [Tabernero, 2012-a] I. Tabernero, A. Lamikiz, S. Martínez, E. Ukar, L. N. López de Lacalle, *Modelling of energy attenuation due to powder flow-laser beam interaction during laser cladding process*. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 212, pp. 516-522 (2012) ISSN: 0924-0136.
- [Tabernero, 2012-b] I. Tabernero et al. Modelling of energy attenuation due to powder flow-laser beam interaction during laser cladding process. *Journal of Materials Processing Technology* 212 (2012) 516– 522
- [Tabernero, 2012-c] I. Tabernero et al. Geometric Modelling of Added Layers by Coaxial Laser Cladding. *Physics Procedia* 39 (2012) 913 – 920
- [Takayuki, 2004] Takayuki Tani, Yakushi Fukuzawa, Naotake Mohri, Nagao Saito, Masaaki Okada, *Machining Phenomena in WEDM of insulating ceramics*. *J.of Material Processing Technology* 149,pp.124-128(2004)
- [Thakur, 2015] A. Thakur, S. Gangopadhyay, *State-of-art in surface integrity in machining of nickel-based super alloys*. *International journal of machine tools and manufare*, Available online 13 October 2015 In Press, Accepted Manuscript.
- [Tönshoff, 1997] H. K. Tönshoff, F. Kroos, y C. Marzenell, *High-Pressure Water Peening-a New Mechanical Surface-Strengthening Process*. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 46, n.º 1, pp. 113-116, 1997.
- [Ukar, 2010-a] E. Ukar et al. Thermal model with phase change for process parameter determination in laser surface processing. *Physics Procedia* 5 (2010) 395–403

- [Ukar, 2010-b] Ukar E. et al. *Laser polishing of tool steel with CO2 laser and high-power diode laser*. International Journal of Machine Tools & Manufacture 50 (2010) 115–125
- [Ukar, 2012] E. Ukar et al. *Roughness prediction on laser polished surfaces*. Journal of Materials Processing Technology 212 (2012) 1305– 1313
- [Umbrello, 2007] D. Umbrello, L. Filice, S. Rizzuti, F. Micari, L. Settineri, *On the effectiveness of Finite Element simulation of orthogonal cutting with particular reference to temperature prediction*. Journal of Materials Processing Technology, Volume 189, Issues 1–3, 6 July 2007, Pages 284-291, ISSN 0924-0136.
- [Umbrello, 2011] D. Umbrello, Z. Pu, S. Caruso, J.C. Outeiro, A.D. Jayal, O.W. Dillon, I.S. Jawahir, *The effects of Cryogenic Cooling on Surface Integrity in Hard Machining*. Procedia Engineering, Volume 19, 2011, Pages 371-376
- [Urbicain, 2013] G. Urbicain et al. Stability prediction maps in turning of difficult-to-cut materials. Procedia Engineering 63 (2013) 514 – 522.
- [Uthayakumar, 2016] Uthayakumar M, Adam Khan M, Thirumalai Kumaran S, Slota A, Zajac J. *Machinability of Nickel-Based Superalloy by Abrasive Water Jet Machining*. Materials and Manufacturing Processes, 2016, Volume 31, Issue 13.
- [Vagnorius, 2011] Z. Vagnorius, K. Sørby, *Effect of high-pressure cooling on life of SiAlON tools in machining of Inconel 718*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2011), 54 (1) 83-92.
- [Vijay, 2008] M. Vijay, A. Tieu, W. Yan, B. Daniels, J. Randolph, F. Lagunes, D. Crawford, C. Pessetto, J. Merrill, R. Eybel, K. Bucknor, y M. Game, *Demonstration, validation and certification of forced pulsed waterjet technique for removal of coatings from aircraft/aerospace industry*. 2008, pp. 209-218.
- [Vulliez, 2014] M. Vulliez, M. A. Gleason, A. Souto-Label, Y. Quinsat, C. Lartigue, S. P. Kordell, A. C. Lemoine, and C. A. Brown, *Multi-scale Curvature Analysis and Correlations with the Fatigue Limit on Steel Surfaces after Milling*. Procedia CIRP, vol. 13, no. 0, pp. 308–313, 2014.

- [Werke, 2009] M. Werke, Simulation of manufacturing sequences for verification of product properties. PhD manuscript, KTH university, Sweden, 2009.
- [Wiedenmann, 2015] R. Wiedenmann, M.F. Zaeh, *Laser-assisted milling-Process modeling and experimental validation*. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 8 (2015) 70–77.
- [Yan, 2000] Yan, B.H., and Wang, C.C., W.D. Liu, and Huang F.Y., *Machining characteristics of Al2O3/6061Al composite using rotary EDM with a dislike electrode*. Inter.J.Adv.Manuf.Technol. 16(5):322-333(2000).
- [Yildiz, 2008] Y. Yildiz, M. Nalbant, *A review of cryogenic cooling in machining processes*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 48, Issue 9, July 2008, Pages 947-964.
- [Zhuang, 2014] K. Zhuang, D. Zhu, X. Zhang, H. Ding, Notch wear prediction model in turning of Inconel 718 with ceramic tools considering the influence of work hardened layer. Wear 313 (1-2) (2014) 63-74.