



**Estudio del efecto de la lubricación criogénica en una aleación de aluminio de titanio Ti-48Al-
2Nb-0.7Cr-0.3Si.**

Salazar Quevedo, Fabricio Alejandro

Departamento de Ciencias de la Energía Y Mecánica

Carrera de Mecánica

Trabajo de integración curricular, previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico

Ing. Santiago David Castellanos Villa Phd.

24 de febrero del 2023



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Mecánica

Certificación

Certifico que el trabajo de integración curricular: **“Estudio del efecto de la lubricación criogénica en una aleación de aluminio de titanio Ti-48Al-2Nb-0.7Cr-0.3Si.”** fue realizado por el señor, **Salazar Quevedo Fabricio Alejandro**; el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Sangolquí, 24 de febrero del 2023

Firma:

.....

Ing. Santiago David Castellanos Villa Phd.



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Mecánica

Responsabilidad de Autoría

Yo, **Salazar Quevedo Fabricio Alejandro**, con cédula de ciudadanía N.º 050379769-8, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Estudio del efecto de la lubricación criogénica en una aleación de aluminuros de titanio Ti-48Al-2Nb-0.7Cr-0.3Si**. es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 24 de febrero del 2023

Firma

Salazar Quevedo Fabricio Alejandro

C.C.: 050379769-8



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Mecánica

Autorización de Publicación

Yo, **Salazar Quevedo Fabricio Alejandro**, con cédula de ciudadanía CC: 050379769-8, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de *integración curricular*: **Estudio del efecto de la lubricación criogénica en una aleación de aluminuros de titanio Ti-48Al-2Nb-0.7Cr-0.3Si** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 24 de febrero del 2023

Firma

Salazar Quevedo Fabricio Alejandro

C.C.: 050379769-8

Dedicatoria

Dedico este estudio a mis padres, Margoth y Rene por impulsarme cada día a seguir hacia adelante, por todo su amor y confianza que han depositado en mí durante todo este tiempo.

A mi hermana Gissela, por todo su apoyo y confianza que ha depositado en mí quien ha estado siempre a mi lado en los momentos más difíciles. Siempre apoyándome e impulsándome para seguir adelante. Orgulloso de ser su hermano y que siempre esté a mi lado en cada momento.

A mi sobrino, que con sus ocurrencias por descubrir el mundo que lo rodea alegraron cada momento de realización de este trabajo, espero ser un ejemplo para él, y que recuerde que todo lo que uno se propone en la vida se puede lograr y no se rinda jamás.

También se la dedico a mi abuelita, que desde el cielo me daba fuerzas necesarias para continuar y no rendirme nunca.

A mis amigos, que me brindaron su apoyo incondicional y estuvieron ahí en todos los momentos que más los necesite.

Agradecimiento

Agradezco a la Universidad de las Fuerzas Armadas –ESPE, al Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica, a mis profesores quienes con esfuerzo y dedicación hicieron que pueda crecer profesionalmente día a día.

También quiero agradecer a mis padres quienes han sido siempre un pilar importante para construir mis sueños y alcanzar mis metas. Siempre han sido una guía de vida. Hoy que concluyo mis estudios, quiero dedicarles a ustedes este logro, como una meta más realizada.

Agradezco al laboratorio de Reología y Metrología, quienes me facilitaron los equipos necesarios para la ejecución de los ensayos para este proyecto. De igual manera a sus docentes encargados quienes supieron brindar los conocimientos necesarios sobre el uso de los mismos.

También quiero agradecer al Ing. Santiago Castellanos, quien con su paciencia y constancia aportó para la realización de este trabajo y sin él no lo hubiese logrado. Sus consejos fueron útiles al momento de despejar varias dudas generadas en la realización de este trabajo, gracias por sus múltiples palabras de aliento, cuando más las necesite; por estar allí cuando mis horas de trabajo se hacían confusas.

Tabla de contenido

Resumen	14
Abstract.....	15
Capítulo I: Generalidades	16
Antecedentes	16
Definición del Problema	18
Objetivos.....	21
<i>Objetivo General</i>	<i>21</i>
<i>Objetivos Específicos</i>	<i>21</i>
Justificación e Importancia.....	21
Alcance.....	22
Capítulo II: Estado Del Arte.....	23
Materiales intermetálicos	23
Aluminuros de titanio	24
Aplicaciones	27
<i>Industria Automotriz</i>	<i>27</i>
<i>Industria Aeronáutica.....</i>	<i>29</i>
Maquinabilidad de los aluminuros de titanio.....	30
<i>Integridad superficial</i>	<i>30</i>
<i>Efecto de la conductividad térmica en la maquinabilidad</i>	<i>31</i>
<i>Efecto de la dureza y la resistencia en la maquinabilidad</i>	<i>32</i>
<i>Efecto de la ductilidad en la maquinabilidad.....</i>	<i>33</i>
Torneado de aleaciones de TiAl	34

<i>Parámetros de corte</i>	35
<i>Fuerzas de corte</i>	35
Influencia del refrigerante	37
<i>Lubricación criogénica</i>	39
<i>Tecnología criogénica</i>	40
<i>Formación de viruta</i>	40
Capítulo III: Diseño Experimental	42
Enfoque experimental.....	42
Criterio de evaluación	42
Factores y niveles de evaluación	43
Factores del material de trabajo	44
Factores de la herramienta de Corte	44
Selección de la herramienta.....	45
Parámetros de corte	46
Sistema de lubricación	47
Diseño estadístico	49
Capítulo IV: Proceso Experimental	51
Montaje Experimental	53
Sistema de Refrigeración	57
Adquisición de Datos.....	57
<i>Adquisición de Imágenes</i>	57
Integridad Superficial	58
Desgaste de la Herramienta	59

Capítulo V: Validación Del Proceso Experimental	60
Integridad superficial	60
Efectos de los parámetros de Corte en la Rugosidad del material	60
Defectos superficiales	63
Formación de Viruta.....	66
Resultados de la grabación de alta velocidad	68
Resultados microscópicos	72
Desgaste de la herramienta	73
Capítulo VI: Conclusiones Y Recomendaciones	76
Conclusiones	76
Recomendaciones	78
Trabajos Futuros	79
Bibliografía	80
Apéndices.....	87

Índice de Tablas

Tabla 1 <i>Comparación de propiedades mecánicas de diferentes materiales.</i>	25
Tabla 2 <i>Tabla descriptiva de los resultados del método Taguchi L9.</i>	50
Tabla 3 <i>Distribución de parámetros de corte para la realización de ensayos.</i>	55
Tabla 4 <i>Análisis de varianza para ensayos mecanizados con emulsión.</i>	62
Tabla 5 <i>Análisis de varianza para ensayos mecanizados con CO2</i>	63
Tabla 6 <i>Parámetros utilizados para el análisis de la formación de viruta</i>	68

Índice de Figuras

Figura 1 Defectos más comunes en el mecanizado de aluminuros de titanio	19
Figura 2 Torneado de aluminuros de titanio con enfriamiento criogénico.	20
Figura 3 Diagrama de fases de equilibrio binario de las aleaciones Ti-Al.....	26
Figura 4 Elementos automotrices de aleaciones de titanio	28
Figura 5 Cojinetes de aleaciones de titanio	29
Figura 6 Geometría de virutas.....	32
Figura 7 Desgaste de la herramienta de corte	33
Figura 8 Geometría de insertos	35
Figura 9 Diagrama de fuerzas de corte	36
Figura 10 Diagrama de zonas de corte.....	37
Figura 11 Diagrama de distribución de carga térmica	38
Figura 12 Factores de Estudio	43
Figura 13 Eje de Ti-48Al-2Nb-0.7 Cr-0.3Si	44
Figura 14 Porta insertos QS-PCLNR 2525- 12C	45
Figura 15 Geometría de insertos	46
Figura 16 Torneado eje de aluminuro de titanio Ti-48Al-2Nb-0.7Cr-0.3Si.....	47
Figura 17 Manguera para sistema de refrigeración.	48
Figura 18 Acople para tanque de CO2.....	48
Figura 19 Sistema de lubricación criogénica	49
Figura 20 Torno paralelo CNC VTC 1640-T400	51
Figura 21 Torneado eje de aluminuro de titanio Ti-48Al-2Nb-0.7 Cr-0.3Si	52
Figura 22 Rectificado eje de aluminuro de titanio Ti-48Al-2Nb-0.7 Cr-0.3Si.....	52
Figura 23 Diseño de eje para la realización de ensayos	53

Figura 24 <i>Distribución de ensayos en eje de aluminuro de titanio</i>	54
Figura 25 <i>Ubicación de cámara de alta velocidad Phantom v2512</i>	58
Figura 26 <i>Calibración del Rugosímetro</i>	58
Figura 27 <i>Proyector de Perfiles</i>	59
Figura 28 <i>Patrón de comparación para desgaste de herramientas</i>	59
Figura 29 <i>Efectos principales de la rugosidad media aritmética Ra (μm)</i>	61
Figura 30 <i>Defectos de la superficie mecanizada con emulsión</i>	64
Figura 31 <i>Defectos de la superficie mecanizada con CO2</i>	66
Figura 32 <i>Fotogramas obtenidos en el mecanizado de TiAl</i>	69
Figura 33 <i>Virutas tipo aguja</i>	73
Figura 34 <i>Efecto de los parámetros de corte en el desgaste de la herramienta</i>	74

Resumen

El presente proyecto desarrolla el estudio del efecto de la lubricación criogénica en una aleación de aluminio de titanio Ti-48Al-2Nb-0.7Cr-0.3Si., debido a que este tipo de aleación es considerada difícil de maquinar, por lo que, el uso de lubricación criogénica es esencial para la obtención de superficies de alta calidad y sin defectos, adecuado para piezas aeroespaciales y automotrices.

El principal objetivo del presente trabajo es estudiar el efecto de la lubricación criogénica en la integridad superficial, la formación de viruta y el desgaste de la herramienta de corte, en una aleación de titanio (Ti-48Al-2Nb-0.7Cr-0.3Si), en comparación con un sistema de lubricación convencional a base de una emulsión al 6% de aceite soluble (Chevron Soluble OIL B) en diferentes condiciones de corte.

Del mismo modo este estudio plantea un procedimiento experimental enfocado en el estudio del efecto de la lubricación criogénica en un proceso de corte continuo (torno CNC VIWA VTC1640 con controlador CENTROID), adaptado a las instalaciones y equipos del Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica de la ESPE.

Los resultados obtenidos son analizados en términos de rugosidad, topografía superficial, formación de viruta y desgaste de la herramienta de corte. Las pruebas experimentales mostraron que existe una mejora significativa (disminución aproximada entre 5-10 μm) en la rugosidad del material) maquinado mediante refrigeración criogénica en comparación al sistema de refrigeración a base de emulsión, además de una mejor formación de viruta. Sin embargo, se pudo observar que el mecanizado criogénico contribuye con el desgaste de la herramienta afectando significativamente su vida útil de la herramienta.

Palabras Clave: mecanizado criogénico, aluminio de titanio, integridad superficial, rugosidad.

Abstract

This project develops the study of the effect of cryogenic lubrication on a Ti-48Al-2Nb-0.7Cr-0.3Si titanium aluminide alloy, because this type of alloy is considered difficult to machine, so the use of cryogenic lubrication is essential to obtain high quality surfaces without defects, suitable for aerospace and automotive parts.

The main objective of the present work is to study the effect of cryogenic lubrication on surface integrity, chip formation and cutting tool wear in a titanium alloy (Ti-48Al-2Nb-0.7Cr-0.3Si) compared to a conventional lubrication system based on a 6% soluble oil emulsion (Chevron Soluble OIL B) under different cutting conditions.

Similarly, this study proposes an experimental procedure focused on the study of the effect of cryogenic lubrication in a continuous cutting process (VIWA VTC1640 CNC lathe with CENTROID controller), adapted to the facilities and equipment of the Department of Energy and Mechanical Sciences of the ESPE.

The results obtained are analyzed in terms of roughness, surface topography, chip formation and cutting tool wear. Experimental tests showed that there is a significant improvement (decrease of approximately 5-10 μm) in the roughness of the material machined by cryogenic cooling compared to the emulsion-based cooling system, as well as better chip formation. However, it could be observed that cryogenic machining contributes to tool wear significantly affecting tool life.

Keywords: cryogenic machining, titanium aluminide, surface integrity, roughness.

Capítulo I: Generalidades

Antecedentes

El desarrollo de nuevos materiales y el estudio de sus propiedades tecnológicas (maquinabilidad, soldabilidad, maleabilidad, resistencia mecánica, resistencia a la corrosión, entre otras.) permite que las industrias se fortalezcan y creen nuevos productos o a su vez optimicen componentes o sistemas existentes.

Desde la invención de los aluminuros de titanio se comprendió que dicho material posee una serie de ventajas en comparación a las superaleaciones a base de níquel, gracias a su composición química y estructura molecular, en los últimos años se han realizado varios estudios para analizar su maquinabilidad y así poder trabajar este material a una mayor escala.

Biermann et al (2015) en su trabajo experimental acerca del desgaste de la herramienta de corte y la formación de virutas en el mecanizado criogénico de aleaciones de titanio realizado en la Universidad de Shanghai, determino la evolución del desgaste de la herramienta de corte, además de la influencia del principio de refrigeración en la formación de virutas.

Los investigadores utilizaron diferentes aleaciones de titanio (Ti-6Al-4V, Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo), además de diferentes tipos de herramientas de corte (DNMG 150612, CNMG 120408) sometidos a sistemas de refrigeración convencionales (a base de emulsión) y sistemas criogénicos (CO₂) combinados con MQL (mínimum quantity lubrication), dichos sistemas fueron aplicados sobre el flanco de la herramienta con diferentes diámetros de boquilla (0,6, 0,1 mm) y se obtuvo la disminución de la vida útil de la herramienta de corte con la boquilla de menor diámetro en comparación a la de mayor diámetro, tanto como para el sistema de refrigeración convencional y el sistema criogénico.

Tras el estudio realizado se concluyó que el sistema de refrigeración criogénico ofrece la posibilidad de aumentar la productividad del mecanizado de aleaciones de titanio en comparación con los principales sistemas de refrigeración convencionales basados en emulsión.

Mantle et al (1997), en su investigación acerca de la integridad superficial y la fatiga en el torneado de aluminuros de titanio y realizada en la Escuela de Fabricación e Ingeniería Mecánica de la Universidad de Birmingham (UK), determino que en el proceso de corte ortogonal (Torneado) se pueden encontrar una gran variedad de defectos superficiales, como desgarre de material, cavidades, macro y microfisuras.

Este estudio utilizó una aleación de titanio Ti-45Al-2Nb-2Mn-0.8%TiB₂ y un fluido de corte semi-sintético bioestable de extrema presión aplicado a un caudal de 3 l/min y una herramienta de corte grado ISO K20/M15, con geometría SNMA 120408. Observando grietas en toda la topografía superficial con un aumento de la microdureza del material.

La investigación realizada dio como resultado, que en el proceso de torneado de aluminuros de titanio se producen grietas y es casi imposible obtener superficies con buen acabado superficial (sin grietas) cuando se utilizan los parámetros de corte típicos en el mecanizado de materiales (Acero, Aluminio, Bronce, entre otros.).

Por otra parte, Klocke et al (2012), en su estudio sobre el torneado a alta velocidad de un aluminuro de titanio gamma de tercera generación realizado en el Departamento de Gestión e Ingeniería de la Producción Politécnico de Turín, describiendo la correlación entre la geometría de la herramienta, las condiciones de corte y la estrategia de lubricación bajo temperaturas exageradas (<900°C) causadas por las altas velocidades de corte y su efecto en la calidad superficial.

Para ello se utilizó una aleación de titanio Ti-45Al-8Nb-0.2C-0.2B, con un sistema de lubricación MQL, inserto con geometría redonda designados RCMX y bajo condiciones de corte de $V_c=60$ m/min, avance 0,05-0,2 mm/rev y una profundidad de 0,1-0,4 mm.

Este estudio concluyo que, con la utilización de estrategias de refrigeración alternas (MQL) y plaquitas redondas, biseladas y sin recubrimiento, es posible obtener superficies lisas (Rugosidad media < 0,4 μ m) y libre de grietas. Además, que el mecanizado a alta velocidad aumenta la maquinabilidad,

pero eleva la carga térmica en el filo de corte de la herramienta, comprometiendo la vida útil de la misma.

Docentes e investigadores en el Ecuador han desarrollado varios trabajos en el estudio de diversos materiales usados en la industria ecuatoriana entre los cuales se destacan la Escuela Politécnica del Litoral "ESPOL", la Universidad Pontificia Salesiana (UPS), la Escuela Politécnica Nacional (EPN), entre otras. Donde se puede apreciar varias investigaciones realizadas referentes a la maquinabilidad de diferentes tipos de materiales (Benites, 1995; González, 2018), Sin embargo, no se encontró ningún artículo relacionado con la maquinabilidad de aluminuros de titanio.

El Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica "DCEM" de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE en su labor de contribuir con el desarrollo de la industria, se ha planteado el iniciar una línea de trabajo acerca del estudio de la maquinabilidad y su entorno en diversos tipos de materiales. Considerando en este caso iniciar este trabajo con el estudio de aleaciones a base de titanio juntamente con un sistema de refrigeración criogénico.

Definición del Problema

El desarrollo de nuevos materiales estructurales y ligeros es un punto clave para aplicaciones automotrices y aeroespaciales. Por lo tanto, se han desarrollado nuevos materiales como son los aluminuros de titanio.

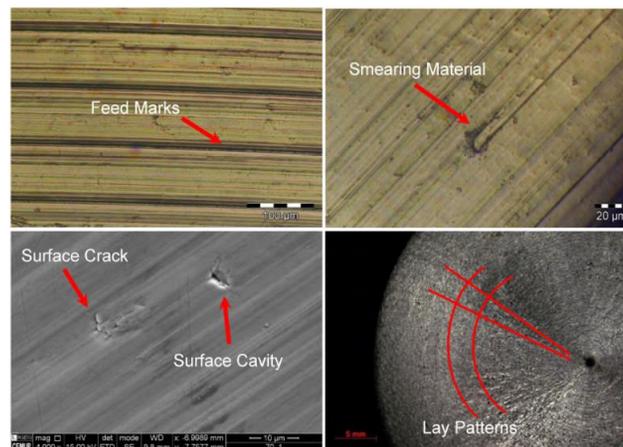
Estas aleaciones pertenecen a la familia de materiales intermetálicos ordenados, los cuales están compuestos de titanio con un alto porcentaje de aluminio (22-56%) y otros elementos (niobio, cromo, silicio, boro entre otros). Esta combinación crea aleaciones las cuales presentan propiedades mecánicas especiales y se destacan principalmente por su baja conductividad térmica ($22 \frac{W}{m \cdot K}$), baja densidad ($3,7 - 4,7 g/cm^3$) y elevadas propiedades de resistencia específica y resistencia a la corrosión en altas temperaturas. Destacándose principalmente su resistencia mecánica a elevadas temperaturas. (punto de fusión $1460^\circ C$).

Debido a las propiedades antes descritas la manufactura de estos materiales es considerado un problema desafiante en la industria. Siendo la maquinabilidad uno de los principales campos de estudio debido a su alta resistencia, alta fragilidad y baja conductividad térmica, lo que generalmente provoca un aumento rápido del desgaste de las herramientas ocasionando dificultad en el proceso de mecanizado (Kothari & Radhakrishnan, 2012; Loria, 2001).

Las propiedades mecánicas de estos materiales durante el proceso de fabricación provocan un conjunto de defectos a la integridad de las superficies mecanizadas, tales como, grietas y superficies micro endurecidas, provocados por el proceso de corte, tal y como se puede observar en la Figura 1(S. Castellanos, 2019).

Figura 1

Defectos más comunes en el mecanizado de aluminuros de titanio



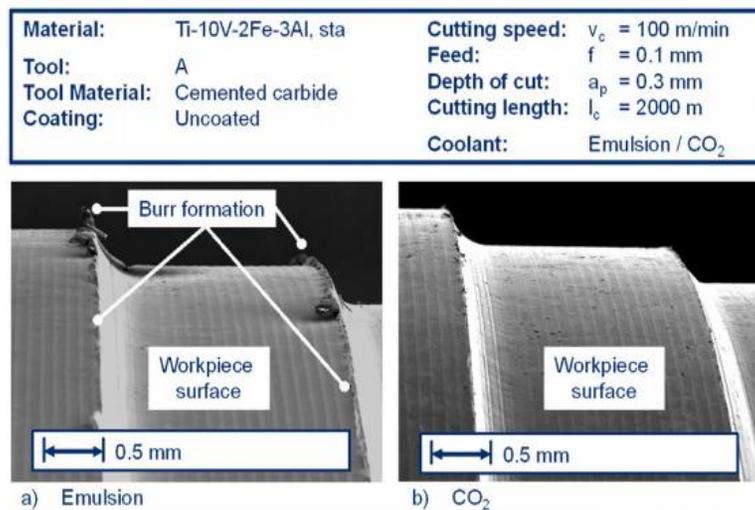
Nota. Tomado de *Machinability Evaluation of in Finishing Operations by Milling*, por S. Castellanos, 2019.

Por lo tanto, para evitar la presencia de estos inconvenientes en el mecanizado de estas aleaciones varios autores (Aspinwall et al., 2005; Hood, 2010) han realizado estudios acerca de la maquinabilidad de estos materiales. Mismos que en algunos casos recomiendan la utilización de sistemas de lubricación especiales con el fin de conservar la vida útil de la herramienta y la mejora de la integridad superficial de los componentes.

Varios autores (S. Castellanos, 2019; Liang et al., 2018; Shokrani et al., 2013), concluyen que un sistema de enfriamiento criogénico es capaz de optimizar la integridad superficial en el mecanizado de los componentes con aleaciones de titanio en comparación a los métodos convencionales que utilizan fluidos de corte a base de aceites solubles. En la Figura 2, se puede observar una comparación entre superficies mecanizadas con la aplicación de refrigeración a base de emulsión a base de agua sin cloro, con una concentración del 6% y criogénica (CO₂).

Figura 2

Torneado de aluminuros de titanio con enfriamiento criogénico.



Nota. Tomado de Machining of β -titanium-alloy Ti-10V-2Fe-3Al under cryogenic conditions: Cooling with carbon dioxide snow, por Biermann, 2011.

Adicionalmente cabe resaltar que el mecanizado criogénico ha demostrado tener un gran potencial en la reducción de defectos superficiales en materiales como las aleaciones en base de titanio, además de ser más amigable con el medio ambiente en comparación a otros fluidos de refrigeración.

Objetivos

Objetivo General

- Desarrollar un estudio de la maquinabilidad de un aluminuro de titanio Ti-48Al-2Nb-0.7Cr-0.3Si en un proceso continuo de arranque de viruta mediante la aplicación de un sistema de refrigeración criogénico.

Objetivos Específicos

- Estudiar las propiedades físicas, químicas, mecánicas y tecnológicas de los aluminuros de titanio e identificar su efecto en la maquinabilidad de estos materiales.
- Establecer un conjunto de parámetros de corte adecuados para el estudio de la maquinabilidad del material a estudiar.
- Establecer una metodología experimental que permita estudiar la maquinabilidad de un material y se encuentre adaptada a los equipos existentes en el DCEM.
- Validar la metodología experimental planteada mediante el análisis de los resultados obtenidos de la ejecución de la metodología experimental.

Justificación e Importancia

Constantemente a nivel industria se desarrollan nuevas aplicaciones a base de materiales termorresistentes (HRSA - Heat Resistance Super Alloys) tales como los aluminuros de titanio, principalmente en el área petroquímica aeronáutica y automotriz. Siendo que este tipo de aleaciones son materiales relativamente nuevos (1940), por lo que aún es necesario profundizar el conocimiento y comprensión de sus propiedades tecnológicas, para poder explorar sus ventajas y desventajas. Sin embargo, la falta de estudios del mecanizado de estas aleaciones en la industria es un factor limitante. (Avilés & Bayas, 2019).

En este contexto la presente investigación realiza un análisis de la maquinabilidad de un aluminuro de titanio (Ti-48Al-2Nb-0.7Cr-0.3Si), basándose fundamentalmente en estudiar el efecto de la

lubricación criogénica en las condiciones de corte e integridad superficial. Debido a la baja conductividad térmica y las propiedades mecánicas que este material posee es común observar un acelerado desgaste de la herramienta de corte. Por tal motivo, en el proceso de mecanizado de estas aleaciones, varios autores (Biermann Dirk, 2011; Clemens & Kestler, 2000) plantean el uso de sistemas de enfriamiento criogénico para reducir el desgaste de las herramientas.

En consecuencia, es importante plantear una metodología que permita evaluar el efecto de la lubricación criogénica versus métodos convencionales y estudiar sus efectos en diferentes procesos de mecanizado, donde se busca la obtención de componentes de calidad y que además se evite el desgaste acelerado de la herramienta de corte.

Este trabajo busca proporcionar a las futuras generaciones conocimiento acerca de los procedimientos de estudio para el análisis de las propiedades tecnológicas de superaleaciones termorresistentes (HRSA) en operaciones de mecanizado aplicando lubricación criogénica.

Alcance

Este estudio tiene como alcance analizar el efecto que ocasiona el uso de un sistema criogénico en la integridad superficial, formación de viruta y desgaste de la herramienta, en el mecanizado de una aleación Ti-48Al-2Nb-0.7Cr-0.3Si. mediante un proceso de corte de viruta continua (torneado).

Para ello se realizará un estudio del estado del arte de la maquinabilidad de los aluminuros de titanio, enfocándose principalmente en el uso de enfriamiento criogénico, el cual ha sido estudiado por varios autores (Biermann Dirk, 2011; Clemens & Kestler, 2000; Yildiz Yakup, 2008).

En esta investigación se empleará una cámara de alta velocidad la cual permitirá apreciar la formación de la viruta en el corte bajo diferentes parámetros en un proceso de corte continuo de viruta. Para finalmente presentar los resultados obtenidos en un informe detallado de forma clara y precisa.

Capítulo II: Estado Del Arte

El presente capítulo tiene como objetivo detallar el estado actual de la literatura publicada acerca de la maquinabilidad de los aluminuros de titanio y los sistemas de lubricación criogénica enfocada al proceso de mecanizado por arranque de viruta (torneado). También se expone los problemas que pueden surgir al momento de tornear una aleación de titanio Ti-48Al-2Nb-0.7 Cr-0.3Si y las ventajas o desventajas que existen al utilizar un sistema de refrigeración criogénico en comparación al método de refrigeración convencional.

Materiales intermetálicos

Un material intermetálico es el resultado al realizar una combinación de mezclas homogéneas de dos o más metales con estructuras cristalinas ordenadas. Existe una fase intermedia entre sus aleantes, lo que les proporciona menor movilidad intersticial a sus átomos, ocasionando que este tipo de materiales tengan el comportamiento similar a un material cerámico (quebradizo) y propiedades mecánicas que soporten altas temperaturas.

La investigación de este tipo de materiales intermetálicos ha tenido un gran crecimiento a partir de los años 80 principalmente por parte del sector aeronáutico el cual ha tenido una gran aceptación y demanda de estos materiales, ya que puedan sustituir a las superaleaciones de níquel en: resistencia, tenacidad y ductilidad a elevadas temperaturas (Adeva, 1999; H. Clemens & Mayer, 2016).

Los primeros estudios sobre materiales intermetálicos se realizaron en 1916 por Kumakov, en donde realizaron un análisis minucioso de los compuestos intermetálicos del sistema oro cobre (Au-Cu). Actualmente la investigación se centra en el desarrollo de nuevos materiales intermetálicos como el compuesto Ti3Al, porque dicho material ha presentado buenos resultados desde su aparición (Adeva, 1999).

Aluminuros de titanio

Las superaleaciones a base titanio son aquellas que poseen mayor proporción de titanio con respecto al resto de componentes. Generalmente este tipo de aleaciones contienen elementos comunes como son: aluminio, vanadio, cromo, zirconio, molibdeno, estaño y niobio. lo que produce que dichas aleaciones tengan propiedades adecuadas para resistir las condiciones más críticas, cargas elevadas, altas temperaturas y un ambiente agresivo (Diaz del Castillo & Cárdenas, 2015).

Las aleaciones intermetálico de titanio y aluminio (Aluminuros de Titanio) son una gama de nuevos materiales, dentro de esta familia, el Ti3Al ha sido el más estudiado en sus primeras composiciones experimentales. Estas aleaciones poseen una densidad inferior y muestran una mejora en la temperatura de servicio pudiendo ser usados hasta unos 2.000°C aproximadamente (Adeva, 1999).

Debido a sus características mecánicas estas aleaciones son usadas en la fabricación de componentes críticos de las nuevas generaciones de turbinas aeronáuticas de la empresa General Electric, por ser materiales ligeros y por conservar sus propiedades mecánicas a altas temperaturas (Y. Y. Chen et al., 2008). Dentro de la industria aeroespacial y automotriz los aluminuros de titanio se utilizan para la construcción de los álabes de turbinas de alta o baja presión, rueda de turbina, tobera y válvulas de motores (Warlimont, 2018).

Los TiAl son aleaciones que siguen generando atención en la comunidad científica gracias a su combinación única de propiedades que proporcionan una baja densidad con una alta resistencia, y que además son capaces de mantener estas propiedades a altas temperaturas.

Las aleaciones de TiAl tienen características típicas de los intermetálicos entre las que destacan:

- Baja densidad.
- Alto punto de fusión (1460 °C).
- Buena resistencia estructural.
- Buena resistencia a la oxidación y a la corrosión.

- Buena resistencia a la llama.

En la Tabla 1 se puede observar una comparativa de algunos valores de las propiedades del TiAl con respecto a otros materiales que actualmente se utilizan para la fabricación de componentes mecánicos.

Tabla 1

Comparación de propiedades mecánicas de diferentes materiales.

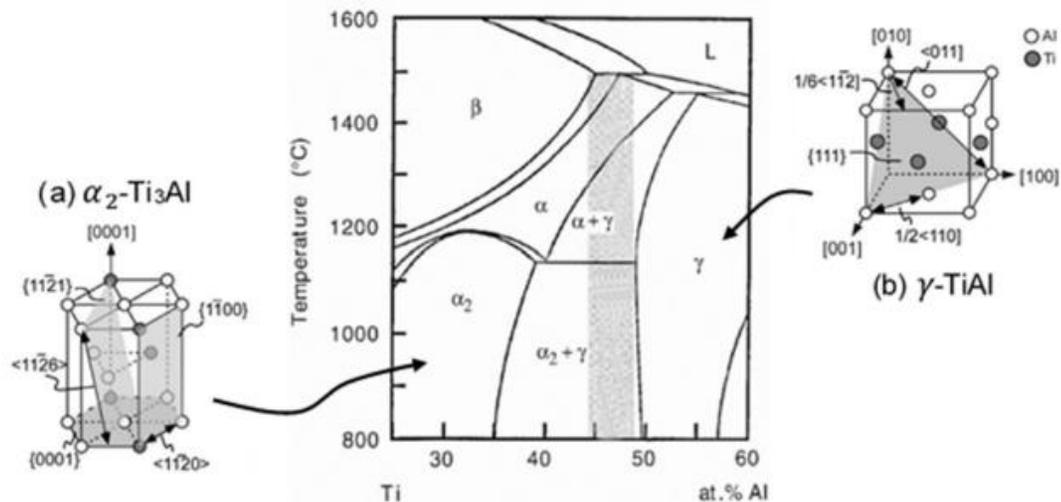
Propiedad	γ – TiAl	Aluminio Sin Alear	Acero ASTM A36	Aleaciones de Bronce (89% de Cu y 11% de Sn)
Densidad ()	3,80	2,70	7,85	8,90
Punto de Fusión (°C)	1460	650	1538	830-1020
Módulo de Young (Gpa)	150-175	69	200	80-110
Esfuerzo a la tensión (MPa)	400-650	80	400-550	300-900
Resistencia a la Fractura (MPa)	700-990	30-35	250-280	230-490
Ductilidad a TA (%)	1-4	35-40	20	29,3
Dureza (HB)	285-350	20	119-162	200
Conductividad térmica $\left(\frac{W}{m \cdot K}\right)$	22	215	45	400

Nota. Tomado de Machinability Evaluation of in Finishing Operations by Milling ,por S. Castellanos, 2019.

En términos de la microestructura, los aluminuros de titanio puede clasificarse en tres categorías las cuales son γ (TiAl), la α_2 (Ti₃Al) y una mixtura de las dos Ver Figura 3 Las propiedades termo-físicas que poseen estos materiales se deben principalmente a su red cristalina compacta con una estructura atómica bien definida, lo que ocasiona que estos materiales posean una alta resistencia mecánica, que les permita mantenerse a temperaturas de hasta 1000°C (S. Castellanos, 2019).

Figura 3

Diagrama de fases de equilibrio binario de las aleaciones Ti-Al



Nota. Diagrama de fases de equilibrio binario de las aleaciones Ti-Al y microestructuras de las fases TiAl; (a) hexagonal α_2 (Ti₃Al) y (b) tetragonal γ (TiAl), Tomado de *Machinability Evaluation of in Finishing Operations by Milling*, por S. Castellanos, 2019..

La baja ductilidad depende de la aleación y del control microestructural convirtiéndose esto en la principal desventaja de las aleaciones de TiAl. Por ello se han implementado varios métodos como la aleación, el tratamiento térmico y el tratamiento termo-mecánico (TMT) para mejorar las propiedades mecánicas de las aleaciones de TiAl. En la aplicación de estos métodos se utilizan elementos como el cromo, vanadio y manganeso para la ductilidad, mientras que para la resistencia mecánica se usa el niobio y molibdeno (Y. Y. Chen et al., 2008).

Como se puede observar las aleaciones de TiAl poseen varias características fundamentales propias de los materiales intermetálicos, y entre las que más destacan está el punto de fusión, la baja densidad, baja ductilidad, excelente resistencia a la oxidación (Warlimont, 2018), lo que hace que este material sea ideal para aplicaciones especiales mencionadas anteriormente.

No obstante, estas características también se presentan como un gran desafío para la fabricación de componentes con este tipo de aleaciones, ya que su baja ductilidad y conductividad térmica son propiedades que dificultan su procesamiento en operaciones de corte de viruta tales como el torneado, fresado, taladrado, entre otros.

Aplicaciones

Industria Automotriz

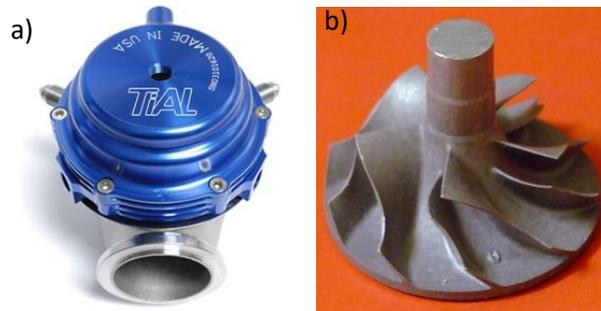
La industria automotriz busca a nivel mundial la reducción del consumo de combustibles, las emisiones y el ruido en los motores de los vehículos; un ejemplo claro de esto sucede en Europa en donde entrará en vigencia una normativa que limitará las emisiones de los motores a diésel de tamaño medio y grande. La industria automovilística europea se enfrenta a este reto implementando la reducción del tamaño de los motores convencionales.

Además, la eficiencia y el rendimiento del motor se verán mejorados al aumentar las temperaturas de los gases de combustión hasta 850 °C (motor diésel) y 1050 °C (motor de gasolina) cuando las presiones de los gases y las revoluciones del motor por minuto aumentan simultáneamente (Clemens & Mayer, 2013). Por tal motivo, los requisitos de los componentes tanto oscilantes como giratorios que opera en el motor están aumentando constantemente, por lo tanto, es necesario la utilización de materiales ligeros y que soporten altas temperaturas. Los elementos más comunes fabricados a partir de aleación de titanio en los automóviles son: rotores de turbocompresores de TiAl, bielas, válvulas, etc. (Ver Figura 4).

Las aleaciones basadas en TiAl presentan una combinación de baja densidad y alta resistencia a temperaturas elevadas. Con el uso de aleaciones ligeras de TiAl para las ruedas de los turbocompresores (Ver Figura 4), se obtienen beneficios tanto en reducción de las emisiones, como resultado de la carga más rápida de aire fresco para el proceso de combustión (Clemens & Mayer, 2013).

Figura 4

Elementos automotrices de aleaciones de titanio



Nota. Turbocompresor de aluminuro de titanio TiAl; Tomado de Tomado de *Colada de un Turbocompresor hecho con TiAl - Topcast Srl*, por Direct Industry, 2019, (<https://trends.directindustry.es/topcast-srl/project-50296-132084.html>) .

En 1956, General Motors (GM) y sus proveedores ensamblaron un automóvil ideal para exposiciones, cuya carrocería era totalmente de titanio. Desde entonces, GM siempre ha querido utilizar titanio en el motor, incluidas las válvulas de escape y las bielas. Algunos fabricantes de automóviles han utilizado una pequeña cantidad de piezas de titanio en sus modelos de automóviles (Precision, 2021).

Los cojinetes de resorte de válvulas de aleaciones de titanio se utilizaron en motores de cuatro cilindros de alta capacidad fabricados por Mitsubishi Motors (Ver Figura 5). Las bielas de titanio también se utilizan en los automóviles Porsche. Con el creciente uso de las aleaciones de titanio, sus aplicaciones especiales en automóviles se han utilizado ampliamente como piezas de automóviles de alta gama.

Figura 5

Cojinetes de aleaciones de titanio



Nota. Cojinetes de resorte de válvulas de aleaciones de titanio fabricados por Mitsubishi Motors.

Tomado de *Colada de un Turbocompresor hecho con TiAl - Topcast Srl*, por Direct Industry,

2019, (<https://trends.directindustry.es/topcast-srl/project-50296-132084.html>) .

Industria Aeronáutica

En la industria aeronáutica también se busca producir nuevos materiales que replacen a las superaleaciones de Ni (Níquel) por aleaciones de TiAl (aluminuro de titanio) ya que estas son relativamente más livianas. Sin embargo, estos procedimientos son nuevos y costosos debido a que requieren una combinación de elementos que los hacen más resistentes y ligeros. En este contexto la utilización de los TiAl se convierte cada vez en un aspecto importante en la industria especialmente cuando el peso es un factor crítico en el diseño de elementos estructurales de los aviones. (Díaz del Castillo & Cárdenas, 2015).

Las aleaciones de titanio representan del 6 al 9% de masa en los aviones comerciales, lo cual es bastante beneficioso por su reducción de peso que ha logrado a diferencia de las anteriores épocas (Grimaldo, 2016). Otra aplicación clara de estos componentes es en el sistema de turbinas que contiene esta aleación en los anillos del Boeing 777 realizados bajo forja en caliente. Otros componentes con este material dentro de las naves espaciales son los alabes de turbina, discos, cárter, tanques de combustible

y finalmente en la parte electrónica que sirve para aislar los circuitos de los tableros por su alta resistencia a la corrosión y sus propiedades de resistencia a bajas temperaturas (Clemens & Mayer, 2013).

A continuación, se describe los beneficios que existe en las tres áreas principales para las aleaciones basadas en TiAl en motores avanzados de turbina a reacción:

- El TiAl tiene una rigidez específica 50% mayor que los materiales estructurales utilizados habitualmente en los motores de aviación. En general, la rigidez es valiosa cuando se trata de espacios libres, como los bastidores, los soportes de las juntas, las carcasas y los revestimientos.
- La buena resistencia a la fluencia de las aleaciones basadas en TiAl en el régimen de temperaturas de 600 a 700 °C, permite sustituir las aleaciones a base de Ni que tienen el doble de densidad que las aleaciones de TiAl para determinadas aplicaciones.
- La alta resistencia al fuego de las aleaciones a base de TiAl (casi tanta resistencia que las aleaciones a base de Ni) pueden permitir la sustitución de componentes de aleaciones basadas en Ni, pesadas, costosas y diseñadas para ser resistentes al fuego (Clemens & Mayer, 2013).

Maquinabilidad de los aluminuros de titanio

El estudio de la maquinabilidad de los aluminuros de titanio generalmente está basado en un enfoque teórico de trabajos de investigaciones previas, realizados en laboratorios especializados. Esta sección se encuentra orientado a determinar los principales factores que afectan a la maquinabilidad de este material.

Integridad superficial

Dadas las exigencias de la industria en la actualidad la integridad superficial es una de las principales características que se deben considerar al momento de mecanizar un material, ya que esta

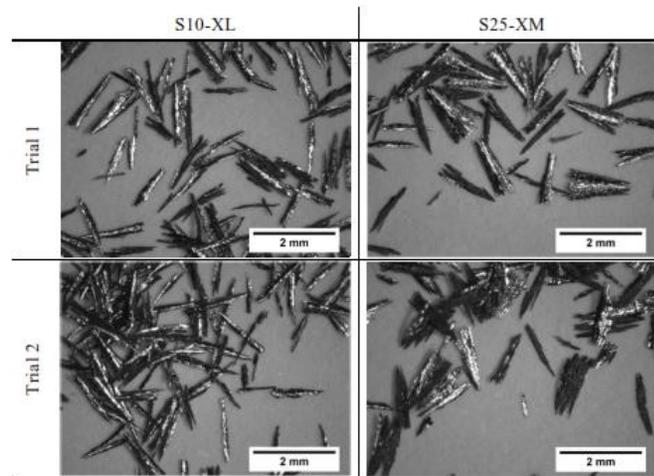
dependerá de varios factores tales como: los procesos de mecanizado, parámetros de corte, entorno de mecanizado, entre otros. Por ello es necesario tener en cuenta que los aluminuros de titanio se caracterizan por su alta susceptibilidad a los daños metalúrgicos causados por las operaciones de mecanizado.

Varios autores (Hood, 2010; Jabbaripour et al., 2012) reportan que los principales inconvenientes que se pueden generar al mecanizar un aluminuro de titanio mediante torneado son la deformación plástica como efecto del proceso de corte y el efecto de la temperatura en la interface de corte, el microendurecimiento de la superficie debido a la deformación plástica (deformación lamellar), microfisuras, macrofisuración y la mala calidad topográfica de la superficie.

Efecto de la conductividad térmica en la maquinabilidad

En el maquinado hay que considerar la conductividad térmica del material, debido a que parte de la energía mecánica producidas por las fuerzas de corte que actúan en el mecanizado son transformadas en calor, mismo que será disipado a través del componente a ser fabricado o por la herramienta de corte, siendo este último caso el más perjudicial debido a que acelera el desgaste del filo de corte de la herramienta. Por lo tanto, se puede concluir que un material que posea una excelente capacidad de disipar el calor (conductividad térmica) posee una ventaja en comparación a materiales con baja conductividad térmica al momento de mecanizarlos, (S. Castellanos, 2019; Morán, 2000).

En consecuencia, la baja conductividad térmica que poseen los aluminuros de titanio ($\text{TiAl} \sim 22 \text{ W/mK}$), ocasionan que su mecanizado sea más complicado en comparación a otro tipo de materiales. Algunos trabajos investigativos (S. Castellanos, 2019; Cheng et al., 2019; Venugopal et al., 2007) presentan que en el mecanizado de TiAl se producen virutas pequeñas y finas (Ver Figura 6). La combinación de este tipo de virutas con una baja conductividad térmica genera una elevada temperatura de corte, concentrada cerca del filo de la herramienta, afectando así directamente a la vida útil de la herramienta de corte y a la integridad superficial de la pieza.

Figura 6*Geometría de virutas*

Nota. Geometría de la viruta de aleaciones de titanio obtenidos en trabajos de investigación. Tomado de *Machinability Evaluation of in Finishing Operations by Milling*, por S. Castellanos, 2019.

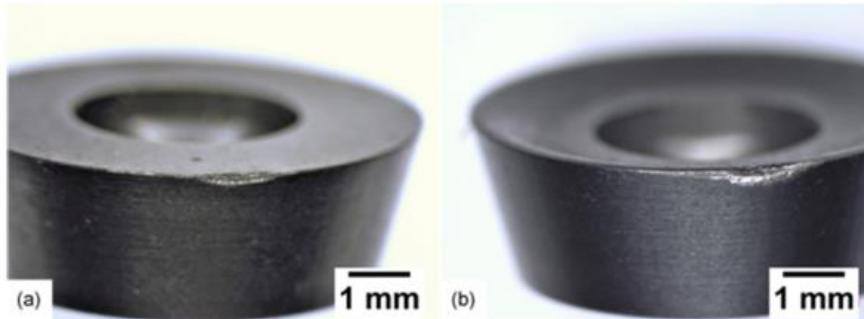
Efecto de la dureza y la resistencia en la maquinabilidad

Las aleaciones de titanio se conocen por su elevada resistencia mecánica (resistencia a la fractura 700-990 MPa) y dureza (285-350 HB), por tal motivo, la incidencia de estas propiedades hace que se consideren materiales de difícil mecanizado en la precisión, la integridad superficial, la rugosidad entre otras.

Para la apreciación del efecto que causan dichas propiedades al momento de mecanizar es necesario medir la incidencia de las fuerzas de corte tanto en el material como en la herramienta, además de medir su temperatura al momento del mecanizado. Como se menciona en el literal anterior la combinación de levadas fuerzas de corte y altas temperaturas afectan considerablemente a la vida útil de la herramienta (Ver Figura 7).

Figura 7

Desgaste de la herramienta de corte



Nota. Desgaste de la herramienta de corte obtenidas en experiencias previas. Tomado de *Machinability Evaluation of in Finishing Operations by Milling*, por S. Castellanos, 2019..

Para contrarrestar los efectos que ocasionan estas propiedades, varios autores (Biermann Dirk, 2011; Gharibi, 2016; Priarone et al., 2016) recomiendan determinar los parámetros de corte adecuados y la aplicación de estrategias de lubricación. En el estudio de Finkeldei et al. (2016) destaca que, en el mecanizado de aleaciones de titanio difíciles de cortar, como α -, $(\alpha+\beta)$ y β , el método de enfriamiento con un gas criogénico da buenos resultados con respecto al desgaste de la herramienta.

Efecto de la ductilidad en la maquinabilidad

La baja ductilidad que poseen los aluminuros de titanio (~4% a temperatura ambiente), para fines de mecanizado favorecen su maquinabilidad, ya que esta ocasiona mayor rotura de la viruta, reduciendo así el desgaste de la herramienta de corte y prolongando su vida útil. Sin embargo, una baja ductilidad en este tipo de materiales hace que tengan un comportamiento de fragilidad, el cual afecta directamente a su integridad superficial. Estudios realizados (Barry et al., 2001; Hood, 2010; Sun et al., 2009) exponen, que la formación de viruta en materiales frágiles durante el proceso de mecanizado puede generar fracturas y extraer material en la herramienta de corte, por lo que advierten graves defectos de fabricación en las superficies.

Efecto del endurecimiento en la maquinabilidad

Al momento de realizar el mecanizado por arranque de viruta se produce una deformación plástica del material, la que da como resultado el aumento de la dureza en la capa superficial. Este aumento de la dureza superficial ocasiona que los materiales adquieran tensiones residuales afectando la integridad superficial del material maquinado y por ende comprometiendo a su rendimiento.

En el mecanizado del TiAl, analizado por Mantle et al., (1997), determinan que el aumento de la dureza en la capa superficial se presenta debido a la deformación plástica producida por el proceso de corte de la viruta, reduciendo la ductilidad del material. Adicionalmente, concluyen que los valores de dureza superficial pueden llegar a duplicarse con respecto al valor nominal.

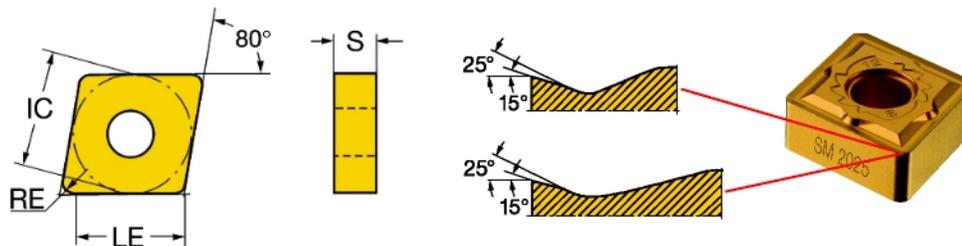
La temperatura generada en la zona de corte del material afecta significativamente al endurecimiento de la superficie. En el estudio experimental de Sharman et al., (2001), han demostrado que el uso de sistemas de lubricación de alta presión ocasiona un aumento de hasta el 10% de dureza máxima. Producida por el efecto de enfriamiento que reduce la temperatura, y, por consiguiente, la ductilidad del material en la zona de corte.

Torneado de aleaciones de TiAl

El torneado es el proceso más común para el corte de un metal. Este proceso genera formas cilíndricas y redondeadas mediante el uso de una herramienta de corte de un solo filo. El torneado puede dividirse en varias aplicaciones básicas (torneado longitudinal, refrentado o perfilado) que requieren un tipo de herramientas, parámetros de corte y procedimientos específicos para que la operación se desarrolle de la forma más eficiente posible.

Aust & Niemann (1999), en su trabajo acerca de la maquinabilidad de γ -TiAl concluyen que en el proceso de torneado de aleaciones de TiAl, se obtienen excelentes resultados cuando se utiliza plaquitas de forma romboidal con una geometría de corte positiva y aristas de corte afiladas representados en la Figura 8

Figura 8

Geometría de insertos

Nota. Geometría de un inserto CNMG-12 04 04-SM 1125. Tomado de *QS-PCLNR 2525-12C*, por Sandvik Coromant, 2020 (<https://www.sandvik.coromant.com/es-es/products/pages/productdetails.aspx?c=QS-PCLNR 2525-12C>).

Parámetros de corte

El proceso de torneado está definido por tres parámetros de corte:

- **Velocidad de corte (V_c):** es la velocidad instantánea del punto de referencia del filo de corte, según la dirección de corte. Se calcula utilizando la velocidad de la pieza (n) y el diámetro de la pieza (D_m) y se representa en [m/min].
- **Avance (f):** la velocidad de desplazamiento (f) es el movimiento entre la pieza y la herramienta que proporciona un arranque de viruta repetido o continuo y se representa en [mm/rev].
- **Profundidad de corte o penetración (A_p):** es el movimiento entre la pieza y la herramienta que determina el grosor de la capa del material a eliminar y se representa en [mm].

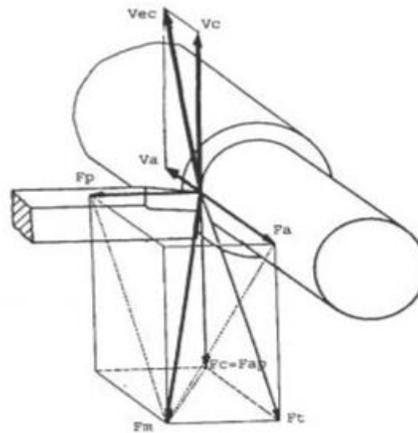
Fuerzas de corte

La interacción entre la pieza y la herramienta durante el proceso de corte, da origen a la aparición de una fuerza de contacto, siendo esta la fuerza responsable del arranque de viruta al material. La medición de las fuerzas de corte es fundamental para la evaluación de la maquinabilidad de

un material, es decir, cuanto mayor sea su valor, menor es la maquinabilidad del material (S. D. Castellanos et al., 2017; Radkowski & Sep, 2014). En la Figura 9 se observa el proceso de mecanizado (torneado), en donde las fuerzas ejercidas durante el mecanizado se simplifican y se considera únicamente la fuerza de contacto que se encuentra aplicada en un punto.

Figura 9

Diagrama de fuerzas de corte



Nota. Diagrama de fuerzas de contacto en el proceso de torneado. Tomado de Surface Quality of Amilled Gamma Titaniumaluminide for Aeronautical Applications Radkowski & Sep, 2014.

La fuerza total que actúa sobre la herramienta de corte se denomina fuerza de mecanizado (F_m) y puede descomponerse en tres direcciones de los movimientos relativos entre la pieza mecanizada y la herramienta. Este desglose da lugar a la fuerza de avance (F_a), la fuerza de penetración (F_p) y la fuerza de corte principal (F_c).

La determinación de las fuerzas de corte es importante para el estudio de la maquinabilidad de un material, debido a que con ellas podemos analizar el comportamiento de la geometría y el material de la herramienta de corte, lo que permite realizar la elección de la herramienta de corte correcta (S. D. Castellanos et al., 2017; Radkowski & Sep, 2014).

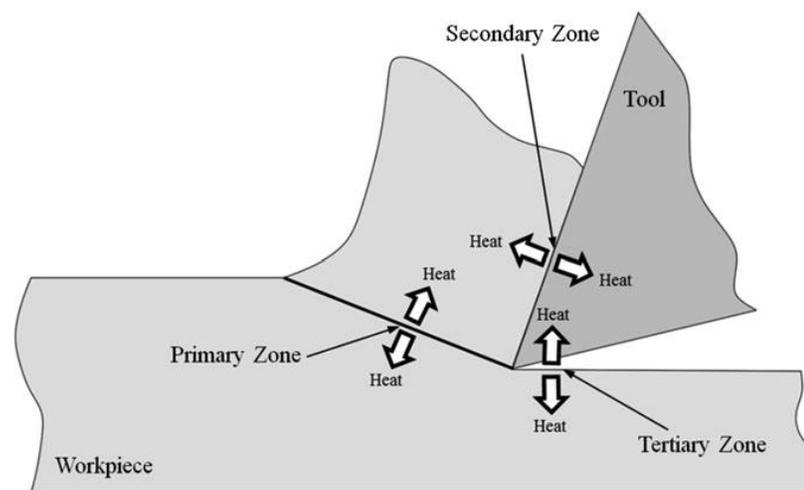
Influencia del refrigerante

Durante el proceso de corte hay energía que se consume para formar la viruta mediante la deformación plástica. Casi toda esta energía se convierte en calor y, en consecuencia, aumenta la temperatura en la zona de corte. Las principales fuentes de calor durante las operaciones de corte son las siguientes (Ver Figura 10).

- **Zona de cizalladura primaria:** en la que el calor se genera principalmente por la deformación plástica de la pieza debido al cizallamiento.
- **Zona de cizalladura secundaria:** en la que el calor se genera por una combinación de cizallamiento y la fricción en la cara del rastrillo de la herramienta.
- **Zona de cizallamiento terciario:** en la que el calor se produce debido a la fricción entre la pieza recién mecanizado y la cara flanca de la herramienta de corte (Hosseini & Kishawy, 2014).

Figura 10

Diagrama de zonas de corte



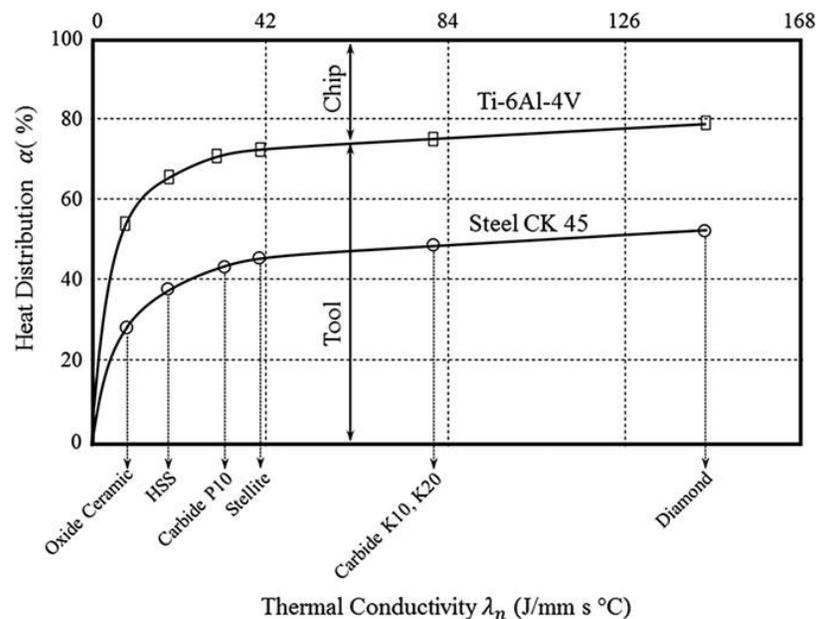
Nota. Diagrama de identificación de las zonas de Corte y calor generado en el proceso de mecanizado por arranque de viruta. Tomado de *Cutting Tool Materials and Tool Wear*, por Hosseini & Kishawy, 2014.

Debido a la baja conductividad térmica de las aleaciones de titanio (22 W/m K) el calor que se produce durante el mecanizado no se disipa fácilmente de la zona de corte, por lo tanto, una gran cantidad de calor queda atrapada en la zona de corte o cerca de ella lo que aumenta la temperatura de la herramienta de corte.

El roce en la zona de cortar aumenta la fricción y, en consecuencia, aumenta aún más la temperatura. Se ha observado en estudios experimentales (Hosseini & Kishawy, 2014; Luis de Sousa, 2017), que, dependiendo del material de la herramienta, puede ser transferido hasta el 50% del calor generado durante el mecanizado a la herramienta de corte. Sin embargo, esta magnitud también puede alcanzar hasta el 80 % durante el proceso de mecanizado. En la Figura 11 se puede observar la distribución de calor en relación al material de la herramienta.

Figura 11

Diagrama de distribución de carga térmica



Nota. Diagrama de distribución de carga térmica en el mecanizado de aleaciones de titanio y acero.

Tomado de *Cutting Tool Materials and Tool Wear*, por Hosseini & Kishawy, 2014.

La aplicación de los fluidos de corte de tipo refrigerante en el proceso de torneado de metales es primordialmente para reducir la temperatura de corte ocasionada por la fricción que existe entre la herramienta, la viruta y la pieza de trabajo.

Lubricación criogénica

La criogenia suele definirse como un evento que ocurren a una temperatura aproximada de -153°C o inferior. Los sistemas de refrigeración generalmente utilizan líquidos criogénicos como el nitrógeno líquido, el oxígeno, el helio, el metano, el dióxido de carbono, el etano y el argón entre otros (Elshwain & Redzuan, 2014; Kaynak & Gharibi, 2019; Khanna et al., 2020).

Los fluidos que se administran en la zona de corte son uno de los principales elementos al momento del mecanizado de piezas metálicas. El propósito de estos fluidos es disminuir la temperatura en la zona entre la pieza de trabajo, la herramienta de corte y la viruta generada al momento de mecanizar (Kaynak et al., 2014).

Los fluidos de cortes convencionales son soluciones a base de agua y emulsiones. Varios de estos fluidos poseen una gran cantidad de productos químicos que pueden ser peligrosos para el medio ambiente (Fernández et al., 2019; Kaynak et al., 2014; Stefansson, 2013).

En la actualidad la industria se ve comprometida a buscar sistemas de refrigeración de forma innovadora y sostenible que sea amigable para el medio ambiente y así mantener su nivel de competitividad (Kaynak et al., 2014). El uso de sistemas de refrigeración de tipo criogénico es un método innovador y respetuoso con el medio ambiente.

Bajo ciertos criterios de mecanizado, la refrigeración criogénica ha demostrado una gran ventaja en comparación de los refrigerantes convencionales que son a base de aceite o con aditivos de presión (Fernández et al., 2019). Entre los materiales más comunes en los cuales el enfriamiento criogénico ha demostrado resultados prometedores son los materiales de difícil mecanización, como las aleaciones a base de níquel, las aleaciones de titanio y los aceros endurecidos (Kaynak et al., 2014).

Tecnología criogénica

Existen varios líquidos criogénicos en la industria, sin embargo, en las operaciones de mecanizado generalmente se utilizan líquidos refrigerantes como el CO₂ y el LN₂.

El nitrógeno líquido (LN₂) es uno de los gases más utilizados en criogenia debido a su disponibilidad en el mundo. El primer uso de gases líquidos como refrigerante en las operaciones de mecanizado fue realizado por Reitz, (1919), donde el dióxido de carbono (CO₂) se utilizó como refrigerante. Durante la Segunda Guerra Mundial, los científicos descubrieron que los metales congelados a bajas temperaturas mostraban más resistencia al desgaste (Jawahir et al., 2016). Y varios autores (Hong et al., 1999; Hong & Ding, 2001) también han demostrado que la vida útil de las herramientas de corte aumenta entre un 200 y un 400% de su vida útil con la utilización de sistemas criogénicos.

Entre los aportes del mecanizado criogénico, es importante destacar que facilita la disipación del calor que se genera en la zona de corte, además que ayuda a conservar la vida útil de la herramienta de corte. Por tal motivo, el mecanizado criogénico ha demostrado poseer la capacidad de generar un excelente acabado superficial, y reduce significativamente los daños ocasionados por el calor al momento de mecanizar un material (Jawahir et al., 2016).

Formación de viruta

Las características metalúrgicas y geométricas de la viruta generada en el proceso de torneado representan el comportamiento y rendimiento del proceso de corte. Por lo tanto, el estudio de la formación de viruta durante las operaciones de mecanizado ha demostrado ser una técnica útil como método para evaluar la maquinabilidad de los materiales.

En el mecanizado de aleaciones de titanio, la viruta se forma por la propagación de grietas desde la superficie exterior o por el desarrollo de una banda de cizalla adiabática que se origina principalmente por la deformación de cizalla localizada (Barry et al., 2001; Sun et al., 2009). La localización del

cizallamiento conduce a una variación periódica significativa de las fuerzas de mecanizado y, posteriormente, a la vibración (Hosseini & Kishawy, 2014).

La variación cíclica de las fuerzas de corte no es un fenómeno deseable ya que impone fatiga y puede causar astillamiento o ruptura del filo de la herramienta (Barry et al., 2001).

Dicho esto, la limitada capacidad de los aluminuros de titanio para deformarse plásticamente, produce pequeñas virutas similares a agujas (S. Castellanos, 2019). Por lo tanto, para conseguir una tasa de eliminación de metal (MRR) aceptable, se debe seleccionar las herramientas de corte adecuadas (material, geometría), las condiciones de mecanizado (parámetros de corte y sistema de refrigeración).

Capítulo III: Diseño Experimental

En el presente capítulo se expone el diseño experimental utilizado para el análisis del efecto del enfriamiento criogénico en el mecanizado de una aleación de titanio Ti-48Al-2Nb-0.7 Cr-0.3Si; mediante el proceso de torneado con la utilización de insertos con forma de diamante (80º). Conjuntamente se detalla el plan de investigación propuesto para llevar a cabo el estudio, en el cual se describen los principales criterios de selección tanto de herramientas como de métodos.

Enfoque experimental

En cuanto al desarrollo de la metodología de este estudio se considera experimental porque analizan parámetros de corte, la integridad superficial y el sistema de enfriamiento de este material, los cuales fueron citados en el capítulo anterior; además se realiza un análisis de las experiencias previas de anteriores investigaciones en los parámetros de corte y resultados obtenidos en las operaciones de torneado que son de mayor relevancia.

Previamente a la implementación de esta metodología, es importante considerar que la maquinabilidad del TiAl no es una tarea fácil debido a su propiedad mecánica, por lo tanto, no existe un procedimiento específico para la evaluación de la maquinabilidad durante un proceso de torneado al utilizar un sistema de enfriamiento criogénico. Por tal motivo es necesario plantear un procedimiento para la evaluación de la maquinabilidad.

Cabe destacar que la metodología propuesta se desarrolló con la finalidad de aportar información a futuros ensayos de mecanizado con este tipo de material, así como también la utilización de herramientas de corte y los tipos de fluidos en lubricación criogénica.

Criterio de evaluación

Existen diferentes maneras de evaluar la maquinabilidad de este elemento. No obstante, las realizaciones de todos estos análisis requieren una gran cantidad de tiempo y recursos. Debido que los

aluminuros de titanio son materiales difíciles de maquinar se consideraron los siguientes criterios de evaluación:

- Integridad superficial de la pieza maquinada.
- Formación de viruta.
- Desgaste de la herramienta de corte.

Factores y niveles de evaluación

Esta sección tiene como objetivo identificar el efecto de los parámetros de corte en el proceso de torneado de los aluminuros de titanio (TiAl), con la utilización de insertos en formas de diamantes (CNMG-12 04 04-SM 1125) y bajo un ambiente de lubricación criogénica.

Los conceptos analizados en el capítulo anterior permitieron la selección de varios factores, los cuales son aquellos que poseen mayor influencia en el torneado de los aluminuros de titanios (los más críticos), para ello se los clasificó en cuatro.

Figura 12

Factores de Estudio



Nota. Factores que intervienen en la metodología de estudio propuesta.

Factores del material de trabajo

El material utilizado es un lingote de aluminuro de titanio comercial Ti-48Al-2Nb-0.7 Cr-0.3Si, el cual fue obtenido mediante un proceso de fundición triple que combina una descarburación de oxígeno y argón, una fundición por inducción al vacío y una refundición por arco al vacío (AOD + VIM + VAR por sus siglas en inglés), geoméricamente el lingote tiene una longitud de 310 mm y un diámetro de 56 mm, con densidad de 3.95 g/cm³, una dureza media de 286 HV0.025 y un esfuerzo de tensión de 516 MPa. (Ver Figura 13).

Figura 13

Eje de Ti-48Al-2Nb-0.7 Cr-0.3Si



Nota. Dimensiones del material de estudio (eje de aleación de titanio Ti-48Al-2Nb-0.7 Cr-0.3Si.).

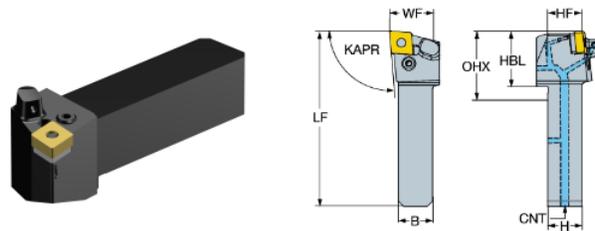
En la figura anterior (Figura 13) se puede observar los ejes de aluminuro de titanio que fueron producidos mediante fusión por triple arco de vacío (VAR) por la empresa Gfe Metalle and Materialien GmbH en Alemania.

Factores de la herramienta de Corte

Como se mencionó anteriormente las fuerzas de corte presentes en el proceso de torneado afectan significativamente a la herramienta de corte y por ende a su vida útil. Por tal motivo en este estudio se utilizó un portaherramientas con fijación por palanca para plaquitas negativas rómbicas de 80° (QS-PCLNR 2525- 12C) (Ver Figura 14), el cual posee un sistema de refrigeración interno que facilita la distribución del fluido refrigerante.

Figura 14

Porta insertos QS-PCLNR 2525- 12C



Nota. Porta insertos QS-PCLNR 2525- 12C con sistema de refrigeración interna Sandvik. Tomado de QS-PCLNR 2525-12C, por Sandvik Coromant, 2020 ([https://www.sandvik.coromant.com/es-es/products/pages/productdetails.aspx?c=QS-PCLNR 2525-12C](https://www.sandvik.coromant.com/es-es/products/pages/productdetails.aspx?c=QS-PCLNR%202525-12C)).

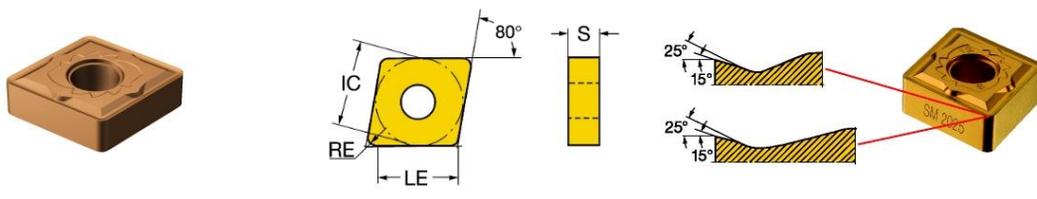
Selección de la herramienta

Con la utilización de un portaherramientas que posee un sistema de lubricación interno, se debe considerar los insertos que se adapten a esta herramienta. Tomando en cuenta que este estudio realiza un torneado medio, los insertos seleccionados a este proceso poseen geometría rómbica de 80°, con una longitud de filo de corte de 12 mm y un radio de punta de 0.4 mm, además de un recubrimiento cuya denominación es CNMG 12 04 04-SM 1125.

En la revisión de la literatura se observó que los insertos de forma romboidal y corte positivo han dado buenos resultados en diferentes investigaciones (SNMA 12 04 08 ISO grado K20/M15) en este tipo de aleaciones de titanio. Dicho esto, se ha buscado una herramienta de corte con características similares y que su geometría se adapte al portaherramientas seleccionado.

Considerando las características anteriormente descritas, el inserto que se seleccionó es el CNMG 12 04 04-SM 1125 (Ver

Figura 15) el cual posee un recubrimiento por deposición física de vapor (PVD) de TiAlN+TiAlN, con un radio punta de 0,397 mm y un ángulo de incidencia de 0°. Estas características reflejan una similitud a los insertos utilizados en el estudio de Aust & Niemann, (1999).

Figura 15*Geometría de insertos*

Nota. Geometría de un inserto CNMG-12 04 04-SM 1125. Tomado de *QS-PCLNR 2525-12C*, por Sandvik Coromant, 2020 (<https://www.sandvik.coromant.com/es-es/products/pages/productdetails.aspx?c=QS-PCLNR-2525-12C>).

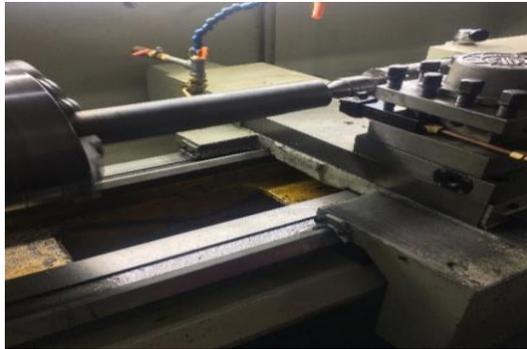
Parámetros de corte

Los principales parámetros de corte que intervienen en el proceso de torneado de un material son la velocidad de corte (V_c), el avance (f) y la profundidad de corte (a_p). Con respecto a la selección adecuada de este tipo de parámetros de corte, hay que tomar en cuenta que influyen significativamente en la vida útil de la herramienta y la integridad superficial de la pieza maquinada.

En los ensayos preliminares, además de contribuir con la preparación del material, aportan información acerca de la temperatura que se genera en la zona de corte entre el elemento a maquinar, la herramienta de corte y el rendimiento del inserto en el mecanizado. Los resultados de estos ensayos preliminares mostraron que las velocidades de corte pueden estar en un rango de 20-60 m/min, la profundidad de corte en un rango de 0,05 a 0,50 mm y la velocidad de avance de 0,03 a 0,5 mm/rev.

Figura 16

Torneado eje de aluminio de titanio Ti-48Al-2Nb-0.7Cr-0.3Si



Nota. Ensayo preliminar para el torneado de una aleación de titanio Ti-48Al-2Nb-0.7Cr-0.3Si.

Sistema de lubricación

Para la implementación de un sistema de refrigeración criogénico, se analizaron varios aspectos como el tipo de fluido refrigerante y presión de trabajo. En este contexto el primer paso fue seleccionar un fluido refrigerante de tipo CO₂ (dióxido de carbono), debido a su disponibilidad en el mercado actual.

Para la implementación del sistema de suministro se recopiló datos de las características técnicas del tanque de CO₂, para seleccionar el tipo de manguera adecuada, el cual, debe soportar los requerimientos necesarios. Los datos definidos para la selección de la manguera son los siguientes: presión de llenado del tanque de 724 PSIG a una temperatura de 15°C. En base a esta información se selecciona una manguera de tipo INOX 321 corrugada (Figura 17).

Figura 17

Manguera para sistema de refrigeración.



Nota. Manguera INOX 321 CORRUGADO utilizada para distribución de gas CO₂.

Se observó que a mayor presión disminuye la temperatura, comprobando la teoría denominada “Efecto Joule - Thomson”, por lo tanto, fue necesario realizar un acople modificado que permita utilizar la presión de llenado completa del tanque (Ver Figura 18).

Figura 18

Acople para tanque de CO₂



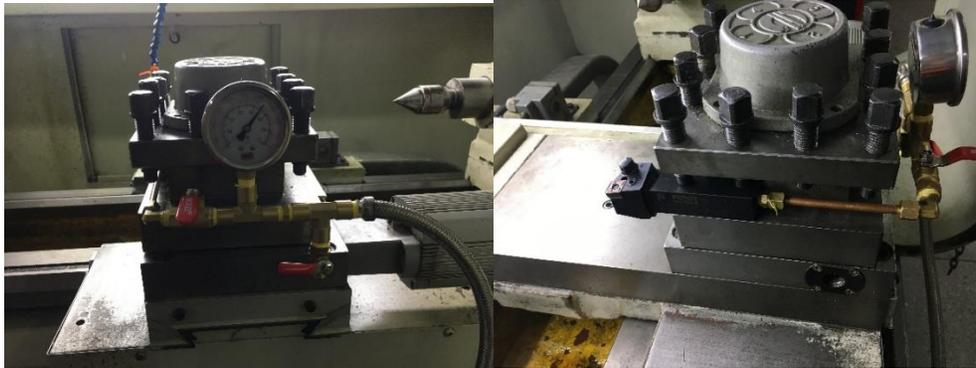
Nota. Adaptación de un acople para salida de gas de CO₂.

Finalmente, para tener un mayor control de la presión que se está suministrando fue necesario acoplar un mainflow, el cual consiste en colocar un sistema de control compuesto de válvulas y un

manómetro entre tanque de CO₂ y el portaherramientas, para así evitar que se produzcan demasiadas pérdidas de presión (Ver Figura 19).

Figura 19

Sistema de lubricación criogénica



Nota. Adaptación de un sistema de lubricación criogénica para un torno CNC VTC 1640-T400.

Diseño estadístico

Para evaluar la maquinabilidad de este aluminuro de titanio generalmente se lo realiza con pruebas y experimentos interactivos, cuyos datos son procesados con métodos estadísticos. La metodología conocida como diseño de experimentos (DOE) es aquella que permite realizar tres niveles de experimentación: factorial completa, fraccionada o parcial (Ranjit, 2010).

La experimentación de tipo factorial completa suele ser aquella que proporciona una visión clara y completa acerca de todos los posibles factores experimentales que pueden ocurrir. No obstante, este tipo de investigación requiere una serie de experimentos que son demasiado extensos y costosos.

Con este antecedente descrito anteriormente se optó por el método estadístico de Taguchi con una experimentación de tipo factorial fraccionaria. El método Taguchi es comúnmente utilizado en varios procesos de evaluación de la maquinabilidad de materiales (Barry et al., 2001; Carvajal Hernandez & Cocha Ajila, 2018; S. D. Castellanos et al., 2019; Khanna et al., 2020; Namb & Paulo, 2011; Pittalà, 2018).

La metodología Taguchi se emplea habitualmente por su diseño de matrices ortogonales, este tipo de arreglo facilita la reducción del tiempo y los recursos necesarios para la realización de experimentos, además permiten la evaluación del efecto causado por cada uno de los factores que intervienen en el proceso. Este método ha demostrado poseer una gran eficacia para la evaluación de superficies mecanizadas tanto en procesos de torneado de aluminuros de titanio como en procesos de torneado por lubricación criogénica, (Aust & Niemann, 1999; S. D. Castellanos et al., 2019; Jawahir et al., 2016; Kaynak & Gharibi, 2019; Luis de Sousa, 2017; Stefansson, 2013).

Para la implementación del método de Taguchi se consideraron los parámetros de corte y los factores principales de velocidad de corte, profundidad de corte y avance. Para ello en el experimento inicial de este estudio se ha tomado como referencia una matriz de arreglo, un ortogonal de 3 factores a 3 niveles y se encuentran representados en la (Tabla 2).

Tabla 2

Tabla descriptiva de los resultados del método Taguchi L9.

Velocidad de Corte	Profundidad de Corte	Avance
Vc [m/min]	ap[mm]	f[mm]
20	0,30	0,20
20	0,15	0,10
20	0,075	0,05
35	0,30	0,10
35	0,15	0,05
35	0,075	0,20
50	0,30	0,05
50	0,15	0,20
50	0,075	0,10

Capítulo IV: Proceso Experimental

Los ensayos se realizaron en un Torno paralelo CNC VTC 1640-T400, cuyas características son: velocidad máxima de 3000 rpm y una distancia entre puntos de 1000 mm. (Figura 20) El material de trabajo es un eje de aluminuro de titanio Ti-48Al-2Nb-0.7 Cr-0.3Si. con densidad de 3.95 g/cm³, una dureza de 286 HV0.025 y un esfuerzo de tensión de 516 MPa.(S. Castellanos, 2019).

Figura 20

Torno paralelo CNC VTC 1640-T400



Nota. Torno paralelo CNC VTC 1640-T400, velocidad de rotación máxima de 3000 rpm, distancia entre puntos de 1000mm.

Para la preparación del material se realizó un proceso de desbastado para eliminar los defectos que trae desde su fabricación, para después someterlo a un proceso de rectificado, el cual nos ayudara a disminuir las tensiones residuales generada en el proceso de torneado.

El proceso de cilindrado consistió en la reducción de 1 milímetro al diámetro total del eje, con una velocidad de corte de 25m/min, profundidad de corte de 0,1 mm y un avance de 0,1 mm a la

longitud total del eje utilizando un sistema de lubricación convencional de emulsión a base de aceite y agua al 6% (Ver Figura 21).

Figura 21

Torneado eje de aluminuro de titanio Ti-48Al-2Nb-0.7 Cr-0.3Si

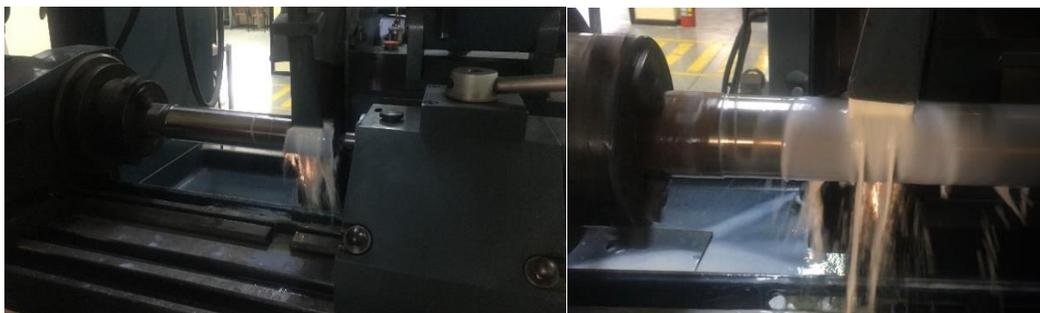


Nota. Proceso de torneado de un eje de aluminuro de titanio Ti-48Al-2Nb-0.7Cr-0.3Si; $V_c=20\text{m/min}$; $a_p=0,1\text{ mm}$; $f=0,1\text{ mm}$.

Para el alivio de tensiones residuales que se pudieron acumular en este proceso se realizó un rectificado cilíndrico del material con el cual se desbaste $0,25\text{ mm}$ al diámetro con pasadas de $5\text{ }\mu\text{m}$, a la longitud total maquinada y con la utilización del mismo sistema de lubricación. (emulsión a base de aceite al 6%) (Ver Figura 22).

Figura 22

Rectificado eje de aluminuro de titanio Ti-48Al-2Nb-0.7 Cr-0.3Si



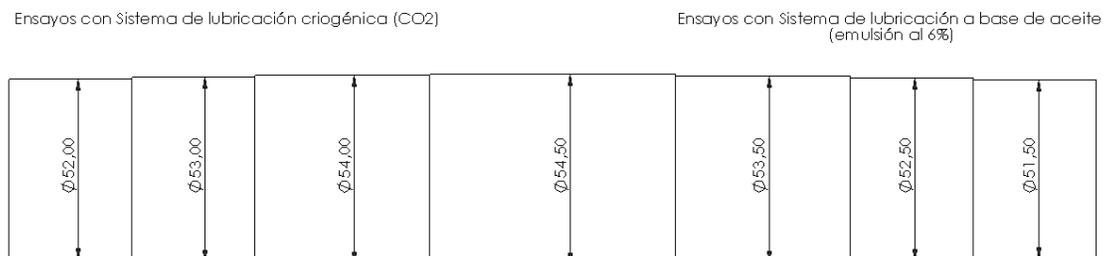
Nota. Proceso de rectificado de un eje de titanio, $V_c= 20\text{m/min}$, $a_p=5\text{ }\mu\text{m}$.

Montaje Experimental

En el proceso de montaje experimental se procedió a analizar los valores de los experimentos que se van a realizar, obtenidos mediante el diseño estadístico de Taguchi (Ver Tabla 2). Para ello se realizó un diseño tipo escalón en el eje (Ver), en el cual se realizarán los diferentes ensayos.

Figura 23

Diseño de eje para la realización de ensayos



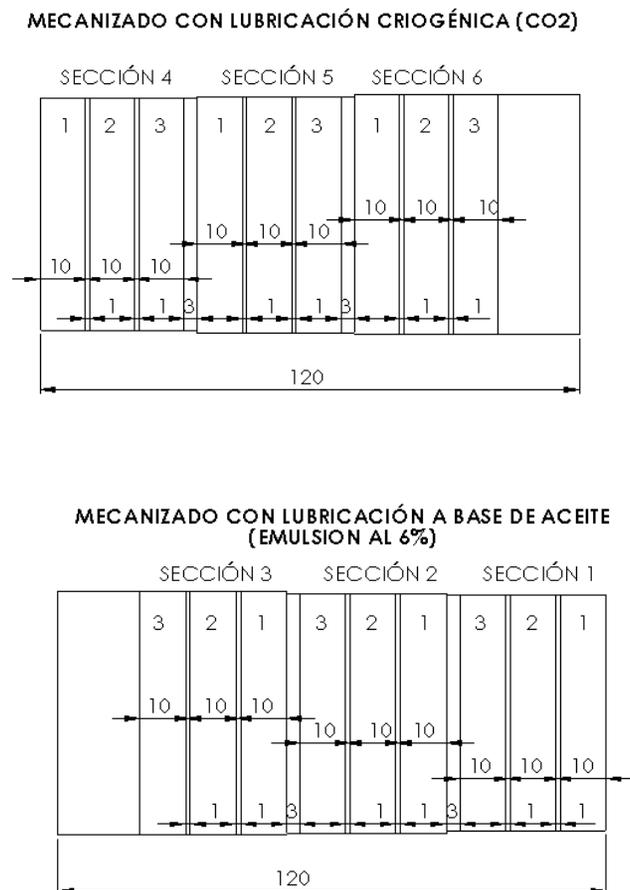
Nota. Diseño del montaje experimental (autor)

El diseño del eje consiste, en la parte derecha realizar la ejecución de los ensayos con la utilización de un sistema de lubricación a base de aceite y en la parte izquierda realizar los ensayos con el sistema de lubricación criogénico.

Se tomó en cuenta la profundidad de corte como un parámetro común para realizar los escalones del eje, cada uno de estos escalones fueron designados como secciones (Ver Figura 24).

Figura 24

Distribución de ensayos en eje de aluminuro de titanio



Nota. Distribución de ensayos (autor)

En la Figura 24 se puede observar que cada parámetro de corte ensayado se encuentra distribuido tanto para la lubricación a base de aceite como para la lubricación criogénica. Estos ensayos tienen una longitud total de 10 mm con separación de 1 mm entre ellos. Con esta distribución los parámetros de ensayo se encuentran indicados en la siguiente tabla (Ver Tabla 3).

Tabla 3

Distribución de parámetros de corte para la realización de ensayos.

	Velocidad de Corte Vc [m/min]	Revolucion es RPM	Avance fn [mm/rev]	Profundida d de Corte ap [mm]	Tipo de Herramienta	Tipo de Lubricación	Presión del Fluido Refrigerant e	
Sección 1	1	20	124	0,2	0,3	CNMG 12 04 04 SM-1125	Emulsión de Aceite y agua al 6%	-
	2	35	216	0,1	0,3	CNMG 12 04 04 SM-1125	Emulsión de Aceite y agua al 6%	-
	3	50	309	0,05	0,3	CNMG 12 04 04 SM-1125	Emulsión de Aceite y agua al 6%	-
Sección 2	1	20	121	0,1	0,15	CNMG 12 04 04 SM-1125	Emulsión de Aceite y agua al 6%	-
	2	35	212	0,05	0,15	CNMG 12 04 04 SM-1125	Emulsión de Aceite y agua al 6%	-
	3	50	303	0,2	0,15	CNMG 12 04 04 SM-1125	Emulsión de Aceite y agua al 6%	-

Sección 3	1	20	119	0,05	0,075	CNMG 12 04 04 SM-1125	Emulsión de Aceite y agua al 6%	-
	2	35	208	0,2	0,075	CNMG 12 04 04 SM-1125	Emulsión de Aceite y agua al 6%	-
	3	50	297	0,1	0,075	CNMG 12 04 04 SM-1125	Emulsión de Aceite y agua al 6%	-
Sección 4	1	20	122	0,2	0,3	CNMG 12 04 04 SM-1125	CO ₂	45 bar.
	2	35	214	0,1	0,3	CNMG 12 04 04 SM-1125	CO ₂	45 bar.
	3	50	306	0,05	0,3	CNMG 12 04 04 SM-1125	CO ₂	45 bar.
Sección 5	1	20	120	0,1	0,15	CNMG 12 04 04 SM-1125	CO ₂	45 bar.
	2	35	210	0,05	0,15	CNMG 12 04 04 SM-1125	CO ₂	45 bar.
	3	50	300	0,2	0,15	CNMG 12 04 04 SM-1125	CO ₂	45 bar.

Sección 6	1	20	118	0,05	0,075	CNMG 12 04 04 SM-1125	CO ₂	45 bar.
	2	35	206	0,2	0,075	CNMG 12 04 04 SM-1125	CO ₂	45 bar.
	3	50	295	0,1	0,075	CNMG 12 04 04 SM-1125	CO ₂	45 bar.

Sistema de Refrigeración

Para la ejecución de los ensayos se utilizó dos sistemas distintos de lubricación, los cuales fueron: una emulsión a base de aceite y un fluido criogénico (CO₂).

El sistema a base de aceite (emulsión) utilizado fue una mezcla entre agua y aceite vegetal al 6%, y suministrado a través del sistema de refrigeración propio de la máquina.

Para el sistema de refrigeración criogénica se utilizó como fluido principal el CO₂ el cual se encuentra suministrado de un tanque cuyas características de envasado son de 15°C, a una presión de 2000 psi. Se realizó un sistema de refrigeración externo el cual transporta el fluido directamente desde el tanque al portaherramientas, evitando la mayor cantidad de pérdidas de presión.

Adquisición de Datos

Adquisición de Imágenes

Para la adquisición de imágenes se procedió a colocar en el torno una cámara de alta velocidad Phantom v2512 (Ver Figura 25) con la ayuda de la cámara se podrá obtener imágenes del momento en el cual se empieza a formar la viruta, para los diferentes tipos de ensayos realizados.

Figura 25

Ubicación de cámara de alta velocidad Phantom v2512



Nota. Ubicación de la cámara de alta velocidad (autor)

La adquisición de imágenes se realizó con parámetros que se estima son aquellos en los que se produce una mayor tasa de remoción de material. Además de este sistema, se procedió a recoger las virutas desprendidas en los ensayos, para después ser analizadas en un microscopio.

Integridad Superficial

Para medir la integridad superficial se utilizó un Rugosímetro portátil de marca Mitutoyo de modelo SurfTest III con un alcance de medición de 0.3-100 μm . y una apreciación de 0.02-5 μm . Antes de iniciar con las mediciones de rugosidad, se verifico que el Rugosímetro se encuentre calibrado, este procedimiento se lo realizo con el patrón propio del equipo (Ver Figura 26).

Figura 26

Calibración del Rugosímetro



Desgaste de la Herramienta

Para la medición del desgaste de la herramienta, se utilizó un Proyector de Perfiles de 10-50x (Ver Figura 27), con alcances longitudinal y transversal de 0-25/0.001 mm.

Figura 27

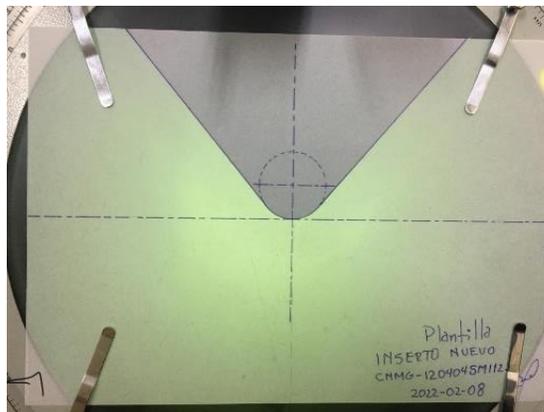
Proyector de Perfiles



Con la ayuda del proyector de perfiles se pudo comparar y medir el desgaste que tiene cada una de los insertos utilizados en los ensayos, para lo cual fue necesario realizar un patrón (contorno de un inserto sin desgaste) de verificación (Ver Figura 28).

Figura 28

Patrón de comparación para desgaste de herramientas



Capítulo V: Validación Del Proceso Experimental

El análisis de los datos obtenidos experimentalmente, nos proporcionan una idea clara acerca del efecto que sucede al momento de mecanizar una aleación de titanio, como se pudo apreciar en capítulos anteriores (Capítulo 2), los aluminuros de titanio es un material de difícil maquinabilidad e intervienen varios factores que afectan significativamente su integridad superficial.

Para la validación del proceso experimental se analizaron 3 aspectos principales del proceso los cuales fueron:

- Integridad Superficial.
- Formación de Viruta.
- Desgaste de la herramienta.

Integridad superficial

La integridad superficial fue verificada mediante el estudio topológico de esta, siendo medida la rugosidad y evaluados los defectos provocados por el proceso de generación de la superficie mediante una valoración cualitativa en el microscopio.

Efectos de los parámetros de Corte en la Rugosidad del material

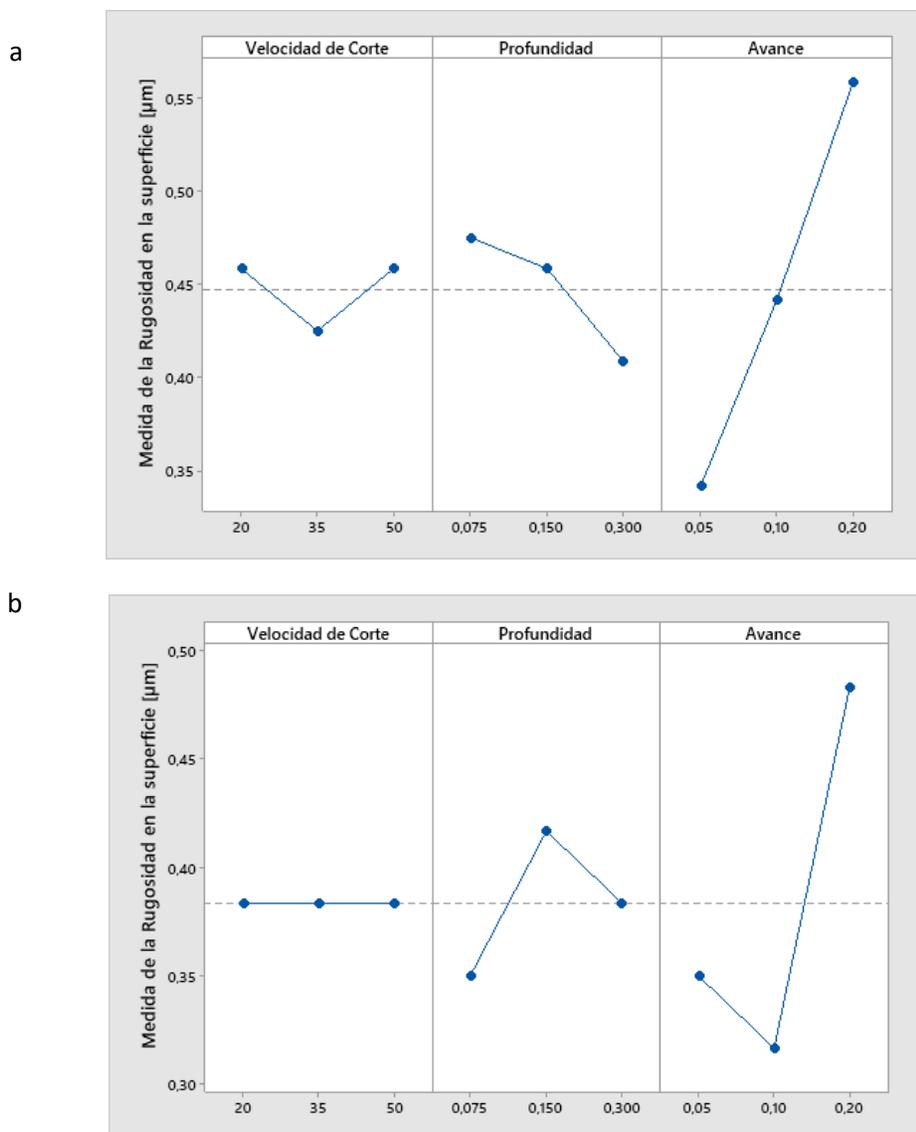
El estudio de los parámetros de corte y su efecto que tienen sobre la rugosidad del material es uno de los principales criterios utilizados para evaluar la maquinabilidad de un material. En la presente investigación, se desarrolló una metodología DOE Taguchi L9, para la evaluación de la rugosidad ante la variación de los parámetros de corte y tipo de lubricación (Ver Tabla 3).

La rugosidad media aritmética (Ra) que posee un componente mecanizado es el principal índice que indica la calidad e integridad superficial del mismo.

En el presente estudio se realizaron análisis tanto para el sistema de refrigeración a base de emulsión y a base de fluido criogénico en la Figura 29 se puede apreciar los resultados obtenidos para el maquinado con refrigeración a base de emulsión y a base de fluido criogénico respectivamente.

Figura 29

Efectos principales de la rugosidad media aritmética Ra (μm).



Nota. a) Resultados de ensayos con sistema de lubricación a base de aceite (emulsión al 6%); b) Resultados de ensayos con sistema de lubricación con fluido criogénico (CO_2).

En los ensayos realizados con lubricación a base de emulsión (Figura 30.a) se puede observar que una configuración adecuada de los parámetros de corte, para la obtención de un buen acabado superficial (baja rugosidad) es, una velocidad de corte de 35 m/min; una profundidad de 0,3 mm y un avance de 0,05 mm/rev.

Como se puede observar en la tabla 4, los parámetros que poseen más influencia en la rugosidad del material son el avance y la profundidad de corte, respectivamente. Para el caso de la velocidad de corte la metodología DOE, nos indica que dicho parámetro no aporta significativamente con el acabado superficial.

Tabla 4

Análisis de varianza para ensayos mecanizados con emulsión.

Fuente	GL	SC Sec.	SC Ajust.	MC Ajust.	F	P
Velocidad de Corte	2	1,527	1,527	0,7637	0,04	0,961
Profundidad	2	75,132	75,132	37,5662	2,00	0,333
Avance	2	77,714	77,714	38,8572	2,07	0,326
Error residual	2	37,510	37,510	18,7549		
Total	8	191,884				

Nota. Análisis de varianza de resultados obtenidos en mecanizado con sistema de lubricación a base de aceite (emulsión 6%).

Para el caso de los ensayos que se realizaron con el sistema de lubricación a base de un fluido criogénico, se puede observar que el parámetro de velocidad de corte, no influye significativamente en el acabado superficial corroborando así con los resultados obtenidos en experiencias previas para este tipo de mecanizado realizada por varios autores (Elshwain & Redzuan, 2014; Fernández et al., 2019; Kaynak & Gharibi, 2019; Klocke et al., 2013; Pittalà, 2018).

Con esta observación de la velocidad de corte, se puede observar que una configuración idónea para la obtención de un mejor acabado superficial es una profundidad de corte de 0,075 mm y un

avance de 0,1 mm/rev. Con dicha configuración se esperaría la obtención, de acabados superficiales con rugosidad Ra de entre 0,4-0,3 μm .

Al igual que en los ensayos realizados con emulsión, se procedió a realizar el análisis de varianzas para observar, cual es la influencia de cada uno de los parámetros de corte.

Tabla 5

Análisis de varianza para ensayos mecanizados con CO₂

Fuente	GL	SC Sec.	SC Ajust.	MC Ajust.	F	P
Velocidad de Corte	2	0,002222	0,002222	0,001111	0,33	0,754
Profundidad	2	0,007222	0,007222	0,003611	1,06	0,485
Avance	2	0,070556	0,070556	0,035278	10,37	0,088
Error residual	2	0,006806	0,006806	0,003403		
Total	8	0,086806				

Nota. Análisis de varianza de resultados obtenidos en mecanizado con sistema de lubricación a base de fluido criogénico (CO₂).

En la Tabla 5 se puede observar que el avance aporta mayor significancia en comparación de la profundidad y la velocidad de corte. Además, el análisis de varianza corrobora con los resultados obtenidos gráficamente, con respecto a la velocidad de corte, la cual no posee gran influencia en la rugosidad del elemento mecanizado.

Defectos superficiales

Uno de los mayores problemas en el maquinado de las aleaciones de TiAl es la calidad superficial. Esto se debe a que este tipo de aleaciones posee una baja ductilidad a temperatura

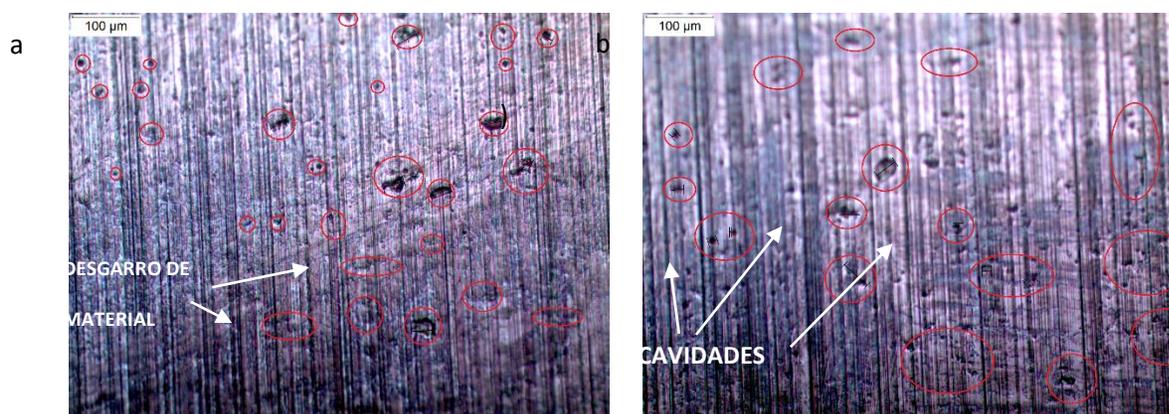
ambiente, lo que suelen provocar una serie de defectos superficiales que modifican la topología de la superficie.

La evaluación de la calidad de la superficie se realizó en todos los ensayos realizados (Apéndice A), en los cuales se pudo observar defectos tales como: grietas superficiales, cavidades, desgarros e incrustaciones de material. Sin embargo, en las zonas analizadas no se encontró ningún tipo de patrón o tendencia acerca de su posible localización, ya que en la misma muestra se observan sectores con gran cantidad de defectos y otras zonas con defectos limitados, siendo esto probablemente un efecto de la microestructura del material.

La presente investigación se enfoca en realizar un análisis a detalle en las superficies que posean valores de rugosidad similares. Para ello se analizaron la topografía superficial de los ensayos de la sección 2.2 cuyos parámetros de corte son de $V_c=35$ m/min; $a_p=0.15$ mm y $f_n=0.05$ mm/rev correspondiente a mecanizado con lubricación a base de aceite y la sección 6.2 cuyos parámetros de corte son $V_c=50$ m/min; $a_p=0.075$ mm y $f_n=0.1$ correspondiente a mecanizado con lubricación criogénica.

Figura 30

Defectos de la superficie mecanizada con emulsión



Nota. Defectos de la superficie mecanizada (Sección 2.2) con sistema de refrigeración a base de aceite (emulsión 6%); $V_c=35$ m/min; $a_p=0.15$ y $f_n=0.3$ mm/rev.

En la Figura 30 se puede observar que en la topografía superficial del componente mecanizado con sistema de refrigeración a base de emulsión al 6% existen varios defectos. Entre los cuales se pueden destacar, cavidades y desgarro del material, además de observarse las líneas producidas en el mecanizado.

Se pudo observar que desde un enfoque de los parámetros de corte la integridad superficial se encuentra afectada principalmente por el avance de la herramienta de corte, mientras que si se reduce este parámetro se obtienen menor cantidad de defectos en la superficie.

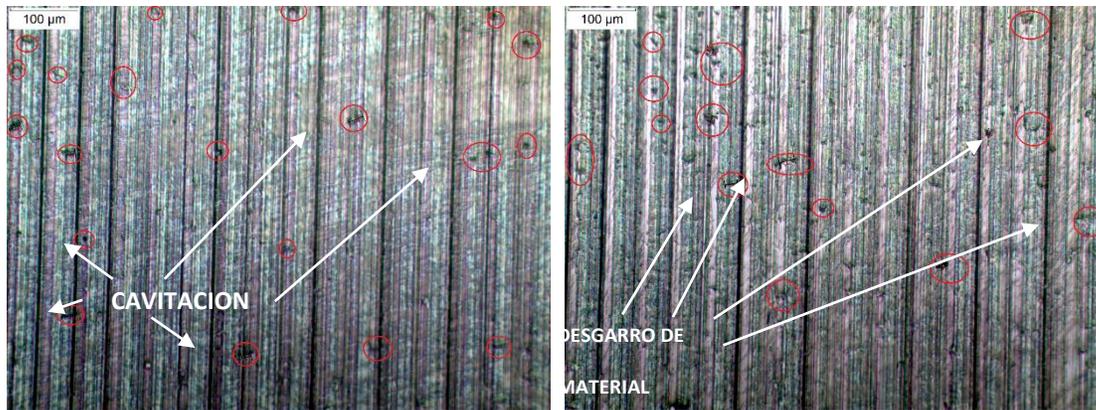
Los defectos observados en el elemento maquinado fueron analizados y cuantificados para tener una referencia acerca de su cantidad y dimensiones que estos pueden tener y definir cuál es su influencia en la topología de la superficie.

La superficie analizada posee una rugosidad Ra que se encuentre en un rango de 0,4 - 0,5 μm , las dimensiones de los defectos encontrados tienen medidas promedio de entre 17 - 19 μm ., mientras que en superficies cuya rugosidad se encuentra en un rango de 0,65 - 0,70 μm . las deformaciones tienen medidas promedio de aproximadamente 24 - 32 μm .

Al igual que en los ensayos realizados con sistema de refrigeración a base de emulsión se pudo observar que uno de los parámetros de corte que afecta significativamente la integridad superficial es el avance de la herramienta de corte.

Figura 31

Defectos de la superficie mecanizada con CO₂



Nota. Defectos de la superficie mecanizada con sistema de refrigeración criogénica (CO₂); $V_c=35$ m/min; $a_p=0.15$ y $f_n=0.05$ mm/rev.

En la Figura 31 se puede observar los defectos encontrados en la superficie, entre ellos se destacan cavidades y desgarro de material, que en comparación con los observados en el mecanizado a base de emulsión son menores, esto podría deberse al tipo de enfriamiento utilizado, ya que este sistema tiende a disminuir la temperatura en la zona de corte.

En esta figura también se pudo observar que las líneas de mecanizado no se encuentran tan marcadas y se obtiene una superficie con un mejor acabado superficial (Rugosidad 0,25-0,35 μm). Un estudio más a detalle, reveló que los defectos superficiales encontrados son menores y poseen longitudes aproximadas de entre 12 - 20 μm .

Formación de Viruta

El estudio de la formación de la viruta es una técnica que se utiliza comúnmente para evaluar la maquinabilidad de un material. Dentro de esta técnica se identifican las características de las virutas y se las asocia con las propiedades del material, parámetros de corte, herramienta de corte, tipo de lubricación, entre otros factores que intervienen al momento de realizar el mecanizado (Davim, 2010).

Considerando que los aluminuros de titanio no son un material fácil de maquinar, el estudio de la formación de viruta no es una tarea fácil en este material, principalmente por su baja ductilidad y su microestructura anisotrópica. Es por ello que los estudios y teorías formuladas para el estudio de viruta en aleaciones metálicas, no son aplicables para este tipo de material.

El estudio de la formación de viruta se lo realizó caracterizando cada una de las virutas obtenidas en los diferentes ensayos, también se utilizó la técnica de grabación de alta velocidad, debido a que varios autores recomiendan este proceso ya que permite observar la formación de viruta durante el proceso de remoción de material (Pujana et al., 2008; Sutter, 2005).

Para la evaluación mediante el uso de una cámara de alta velocidad se utilizaron parámetros de corte basado en la metodología DOE y que poseen la mayor tasa de remoción de material. Sin la utilización de un sistema de refrigeración. El diseño experimental utilizado en este análisis se describe en la Tabla 6.

Tabla 6

Parámetros utilizados para el análisis de la formación de viruta

N.º	Velocidad	Revoluciones	Avance	Profundidad	Tipo de Herramienta	Tasa de
	de Corte		fn	de Corte		remoción
	Vc [m/min]	RPM	[mm/rev]	ap [mm]		de material [mm ³ /min]
1	20	117	0,2	0,3	CNMG 12 04 04 SM-1125	0,0012
2	35	205	0,1	0,3	CNMG 12 04 04 SM-1125	0,00105
3	50	292	0,2	0,15	CNMG 12 04 04 SM-1125	0,0015

Resultados de la grabación de alta velocidad

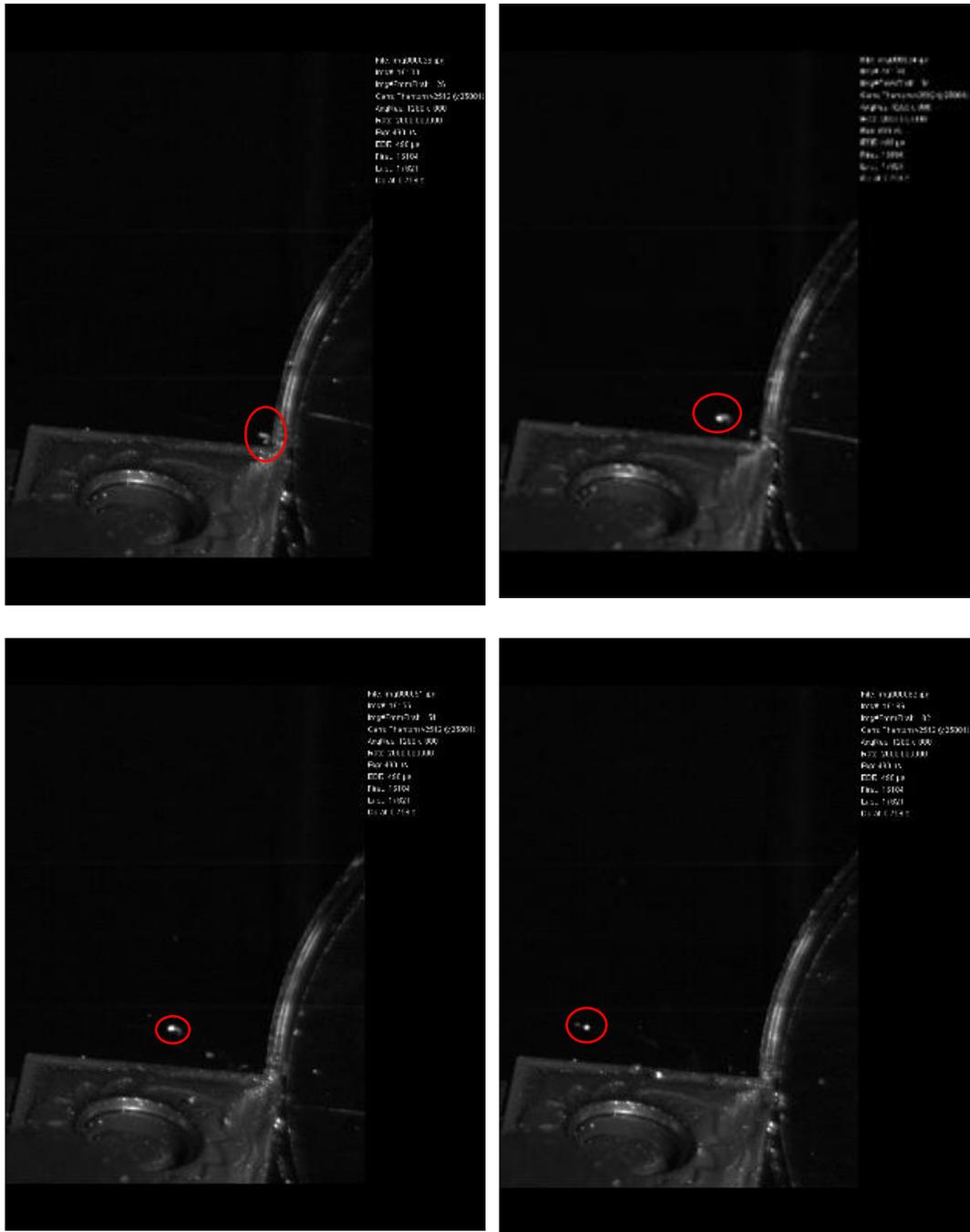
En la Figura 32 se puede observar la secuencia de imágenes registradas por la cámara de alta velocidad en el proceso de mecanizado a diferentes parámetros de corte y con la utilización de un inserto CNMG 12 04 04 SM-1125.

Para el primer se puede apreciar que la viruta formada tiene una forma de rizo definido y de gran tamaño en el filo cortante del inserto. No obstante, las propiedades mecánicas del TiAl (baja ductilidad), limita el proceso de formación de la viruta conduciendo rápidamente a la rotura, formando así varias virutas finas conocidas como virutas tipo aguja (S. Castellanos, 2019)(Ver Figura 32.a).

Figura 32

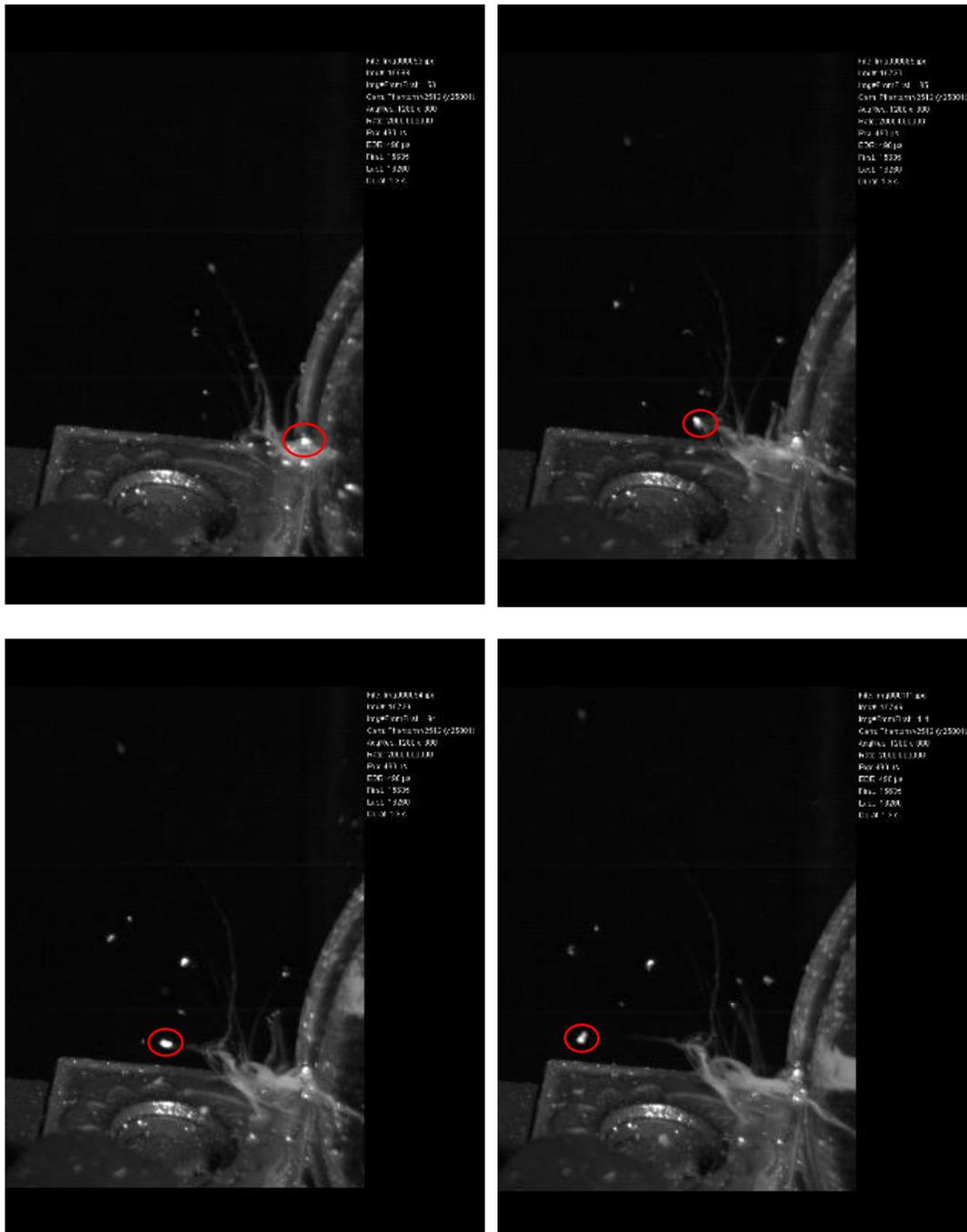
Fotogramas obtenidos en el mecanizado de TiAl

a)



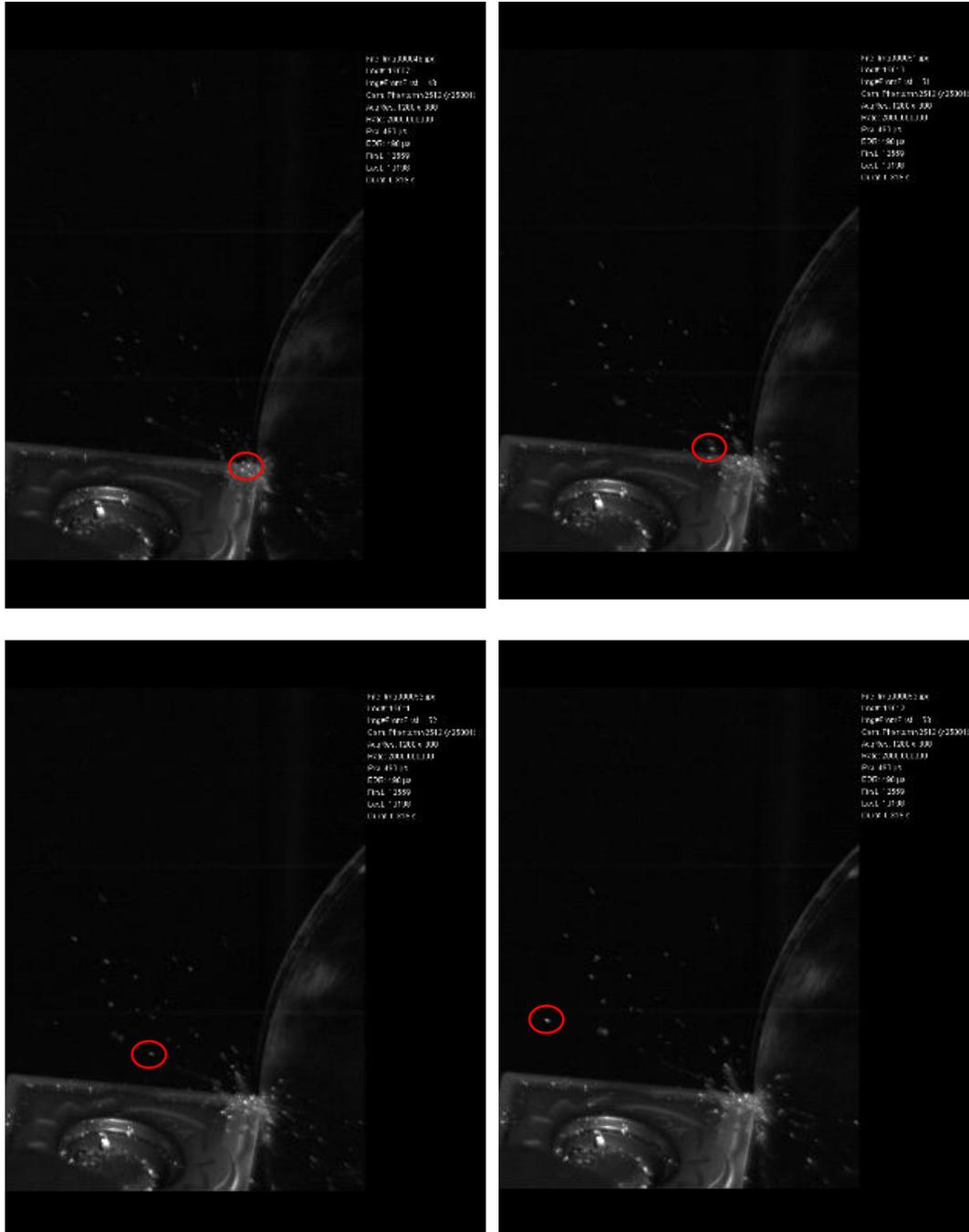
$V_c=20$ m/min; $a_p=0,3$ mm; $f_n=0,2$ mm/rev

b)



$V_c=20$ m/min; $a_p=0,3$ mm; $f_n=0,2$ mm/rev

c)



$V_c=50$ m/min; $a_p=0,15$ mm; $f_n=0,2$ mm/rev

Nota. Fotogramas de formación de viruta en el mecanizado de aleaciones de titanio TiAl.

En el segundo ensayo (Figura 32.b) se puede apreciar que al aumentar la velocidad de corte existe un incremento de la temperatura en la zona de corte. Los aluminuros de titanio al poseer una conductividad térmica baja no disipa el calor rápidamente ocasionando que las virutas no se formen

adecuadamente y fundan entre ellas. Además, se puede observar gran concentración de las virutas en la zona de corte, lo que afecta significativamente al desgaste de la herramienta y a la integridad superficial del elemento maquinado.

El incremento de la temperatura ocasiona que el material aumente significativamente su dureza superficial. Varios autores (Grimaldo, 2016; Kaushal et al., 2016) concluyeron que el mecanizado de este tipo de materiales se asemeja al de un cerámico, por tal motivo recomiendan el uso de sistemas de lubricación alternas.

En el tercer ensayo (Figura 32.c), la velocidad de corte aumenta en comparación a los ensayos anteriores. Por lo tanto, se puede apreciar una formación de viruta más brusca, las virutas no poseen una forma ni tamaño definido. Además, se puede observar que el efecto de la velocidad ocasiona la formación de virutas pequeñas y finas que salen disparadas a gran velocidad de la zona de corte.

Resultados microscópicos

Además de la cámara de alta velocidad se procedió a realizar un análisis a detalle, en el cual, las virutas obtenidas fueron observadas en un microscopio. La utilización del microscopio nos permitió caracterizar cada una de las virutas obtenidas en los ensayos.

Como se puede observar en la Tabla 7, las virutas tienen diferente forma, debido a la variación de los parámetros de corte y el sistema de refrigeración utilizado al momento de realizar el proceso de mecanizado.

Como se pudo observar con la cámara de alta velocidad las virutas que se encuentran con una velocidad de corte (20 m/min) menor poseen una forma de riso definido y un tamaño de $\sim 46\text{-}55\ \mu\text{m}$, mientras que las virutas obtenidas a velocidades de corte elevadas (50 m/min) son de menor tamaño y no poseen una forma definida (Ver Apéndice F).

En el Apéndice F se puede apreciar el efecto que tiene la influencia del refrigerante en la formación de viruta, como se pudo apreciar con la cámara de alta velocidad, se deduce que el

incremento de la temperatura en la zona de corte es elevado y afecta considerablemente a la formación de viruta.

En el caso de un mecanizado con la utilización de un sistema de refrigeración a base de aceite (emulsión al 6%) se puede apreciar que la mayor parte de las virutas formadas son láminas de gran tamaño. Mientras que en el mecanizado con sistema de refrigeración criogénica (CO₂) las virutas poseen forma de rizo bien definido. Además, que su longitud es menor y son más finas (virutas tipo aguja).

Varios autores (S. Castellanos, 2019; Sutter, 2005), en sus trabajos de investigación concluyeron que en el mecanizado de aluminuros de titanio una forma de viruta que contribuye a la mejora de la integridad superficial del elemento maquinado son aquellas que ellos llaman “Tipo Aguja” (Figura 33).

Figura 33

Virutas tipo aguja



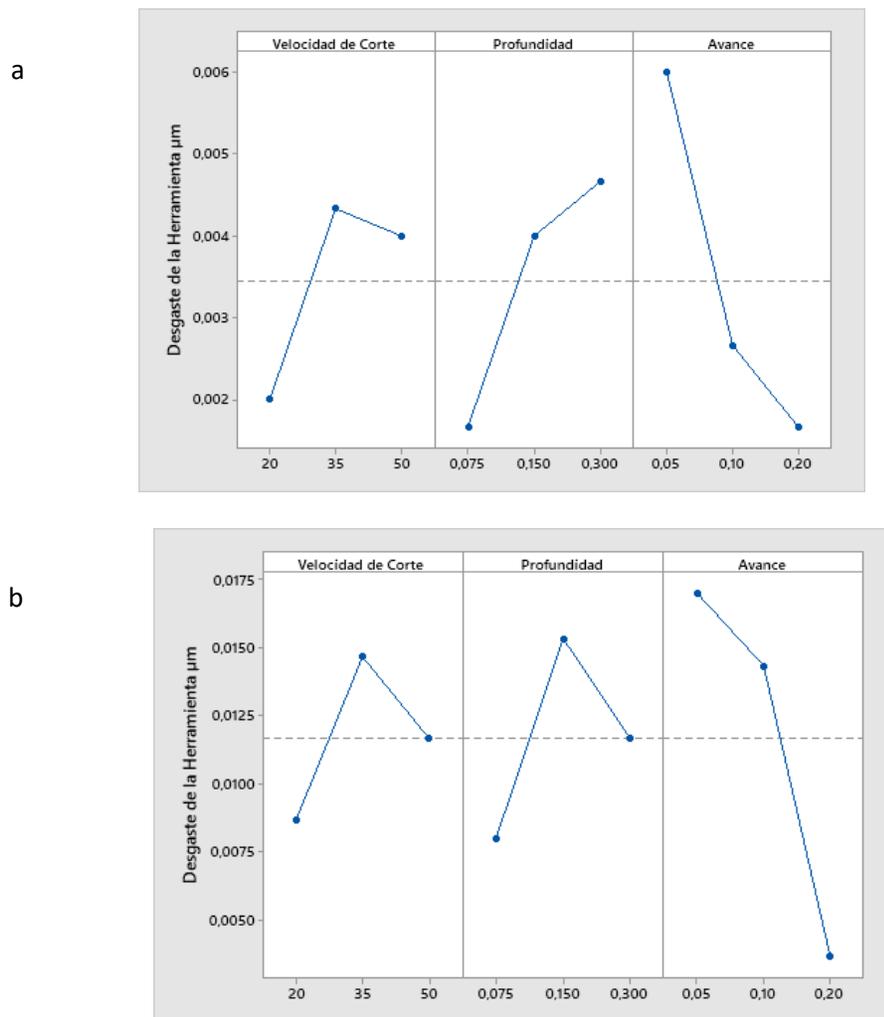
Desgaste de la herramienta

El desgaste de la herramienta depende de numerosos factores, por ejemplo: el material de la pieza de trabajo, el material y geometría de la herramienta de corte, los parámetros de corte (velocidad de corte, avance, profundidad de corte), sistema de refrigeración, entre otros. Debido a las propiedades mecánicas de los aluminuros de titanio varios autores (Elshwain & Redzuan, 2014; Kaynak & Gharibi, 2019; Namb & Paulo, 2011; Pittalà, 2018), hacen énfasis en la utilización de sistemas de refrigeración alternos.

Es importante destacar el efecto que los sistemas de refrigeración influyen significativamente en el desgaste de la herramienta de corte. Para el desarrollo de la presente investigación, al igual que en el caso de la rugosidad se utilizó una metodología DOE Taguchi L9; para evaluar el desgaste producido en la herramienta de corte en los diferentes tipos de ensayos. En la Figura 34 se puede observar el efecto que ocasiona los parámetros de corte y el sistema de refrigeración sobre la vida útil de la herramienta de corte.

Figura 34

Efecto de los parámetros de corte en el desgaste de la herramienta



Nota. a) Efecto del desgaste de la herramienta de corte de ensayos con sistema de lubricación a base de aceite (emulsión al 6%); b) Efecto del desgaste de la herramienta de corte de ensayos con sistema de lubricación con fluido criogénico (CO₂).

Se puede observar en la Figura 36.a, en el mecanizado con un sistema de refrigeración a base de aceite (emulsión al 6%), el menor desgaste de la herramienta se produce cuando el avance de la herramienta de corte es mayor y la velocidad de corte como la profundidad es menor.

Varios autores (Kaynak & Gharibi, 2018; Klocke et al., 2013), concluyen que la vida útil de una herramienta de corte es directamente proporcional a la tasa de remoción de viruta. Por lo tanto, la configuración de parámetros de corte obtenida ($V_c=20$ m/min; $a_p=0,075$ mm y $f_n=0,2$ mm/rev) ocasiona una tasa de remoción menor ($0,30$ cm³/min) en comparación a la configuración de parámetros de corte cuya grafica demuestra un mayor desgaste de la herramienta ($0,26$ cm³/min).

Para el efecto de los parámetros de corte en el proceso de mecanizado con la utilización de un sistema de refrigeración criogénica (Figura 36.b), se puede observar que una configuración eficaz para disminuir el desgaste de la herramienta es igual a la configuración obtenida mediante el sistema de refrigeración convencional. Sin embargo, los valores de desgaste son más significativos.

El aumento de los valores de desgaste en la herramienta puede corresponder al tipo de lubricación, tipo de recubrimiento del inserto, geometría del inserto. Si bien es cierto, este tipo de lubricación proporciona un mejor acabado superficial, afecta considerablemente la vida herramienta de corte.

El desgaste de la herramienta de corte se puede atribuir a la geometría del inserto, ya que el inserto utilizado posee un radio de corte de 4 mm y al trabajar a temperaturas bajas (-12°C) ocasiona que pierda su recubrimiento perdiendo así las propiedades para el cual fue diseñado.

Capítulo VI: Conclusiones Y Recomendaciones

Conclusiones

- En este estudio se desarrolló un análisis de la maquinabilidad de un aluminuro de titanio Ti-48Al-2Nb-0.7Cr-0.3Si en un proceso de mecanizado de arranque de viruta continuo mediante la aplicación de un sistema de refrigeración criogénico, que mejoro la integridad superficial del mismo.
- En la maquinabilidad por arranque de viruta de una aleación de titanio Ti-48Al-2Nb-0.7Cr-0.3Si, uno de los parámetros principales a considerar es la energía mecánica producida por las fuerzas de corte que actúan en el mecanizado, esta aleación al no tener una excelente capacidad de disipar el calor (conductividad térmica) posee una desventaja en comparación a materiales con buena conductividad térmica.
- Las aleaciones de titanio se conocen por su elevada resistencia mecánica y dureza, por tal motivo, durante el proceso de mecanizado los parámetros de corte y el tipo de refrigeración, tienen gran influencia sobre el acabado superficial del elemento y la vida útil de la herramienta de corte.
- La baja ductilidad que poseen los aluminuros de titanio favorecen en la formación de viruta, ya que, como se pudo observar la viruta generada en el proceso de mecanizado, es pequeña y fina. Sin embargo, la baja ductilidad ocasiona que estos materiales tengan un comportamiento de fragilidad, el cual afecta directamente a su integridad superficial.
- Un conjunto de parámetros de corte adecuados para el estudio de la maquinabilidad de una aleación de titanio Ti-48Al-2Nb-0.7Cr-0.3Si, son $V_c=20$ m/min; $a_p=0,075$ mm y $f_n=0,2$ mm/rev, ya que estos demostraron una mejor significativa en la rugosidad del material (disminución aproximada entre 5-10 μ m).

- Se estableció una metodología experimental mediante un DOE (Diseño experimental de Operaciones) que permita estudiar la maquinabilidad de un material variando sus principales factores de corte (velocidad de corte, avance, profundidad de corte).
- Se pudo observar que con el sistema de refrigeración criogénica (CO₂) la rugosidad en la superficie disminuye aproximadamente entre 5-10 μm, en comparación del mecanizado convencional que utiliza refrigerante a base de aceite (emulsión al 6%).
- El sistema de refrigeración criogénico ayuda a mejorar la topografía de la superficie de un elemento maquinado, Debido, a que los defectos encontrados son menores (tamaño y cantidad) en comparación a los defectos encontrados en el mecanizado a base de aceite.
- Se puede evidenciar que la velocidad de corte no afecta significativamente a la integridad superficial en el proceso de mecanizado de las aleaciones de titanio, tanto para sistema de refrigeración convencionales como para sistemas de refrigeración criogénica.
- Existe un mayor desgaste en la herramienta de corte, debido a que, el ambiente de trabajo (temperatura), se encuentra por debajo de los parámetros considerados en su diseño, por tal motivo, este factor afecta significativamente tanto a su composición química como a su recubrimiento.
- Con el sistema de lubricación criogénica se pudo apreciar una formación de virutas mejor formadas y disipadas de la zona de corte, este tipo de virutas dan un indicativo de mejoría en la integridad superficial del elemento maquinado.
- La cámara de alta velocidad proporciono una secuencia de fotogramas, los cuales, nos ayudaron al momento de realizar los ensayos, ya que se podía aplicar la lubricación de una mejor manera.

- El porta insertos utilizado (QS-PCLNR 2525- 12C), al poseer un sistema de refrigeración interna, distribuyó el líquido refrigerante (CO₂) de mejor manera, tanto para refrigerar el filo de corte de la herramienta como el material a mecanizar.
- Los parámetros utilizados fueron basados en experiencias previas realizadas para este tipo de material, como también los parámetros sugeridos por el fabricante.

Recomendaciones

- Es necesario tener en cuenta los parámetros de corte y el tipo de material a trabajar para poder realizar la selección de la herramienta de corte, ya que, para el caso de la aleación trabajada (Ti-48Al-2Nb-0.7Cr-0.3Si) al poseer una dureza elevada, los insertos procedían a perder su filo.
- Como se pudo observar en el mecanizado criogénico la herramienta de corte sufrió un desgaste significativo, esto pudo deberse por la geometría del inserto (radio de corte 4 mm), por tal motivo, se recomienda la utilización de insertos cuyo radio de corte sea mayor o posean distinta geometría.
- Al momento de preparar el material, se recomienda que la parte a mecanizar sea lo más pequeña posible para así evitar descentramientos en el material.
- Antes de realizar los ensayos es recomendable medir la rugosidad y analizar la topografía del mismo, ya que, pueden existir defectos propios de la obtención del material que pueden afectar a los resultados obtenidos.
- El palpador de diamante del rugosímetro debe ubicarse lo más centrado posible al eje, debido a que, al ser un elemento demasiado sensible, puede arrojar valores erróneos.
- Verificar que el portaobjetos se encuentre limpio ya que las virutas son muy pequeñas y pueden confundirse o fusionarse con los residuos que se encuentren en el mismo.

- Tomar precauciones (EPP) al momento de suministrar el fluido criogénico, debido a que este se encuentra almacenado a una elevada presión y temperatura.
- Verificar las condiciones del sistema de lubricación, ya que al manejar una presión elevada (45 bar) y temperaturas bajo 0, cualquier defecto (grietas, fugas, entre otros), puede provocar algún tipo de accidente.
- Las mangueras para transporte de los fluidos refrigerantes deben ser de silicona y recubiertas por acero inoxidable, ya que en las mangueras tradicionales (Caucho) se produce un efecto de cristalización debido a la temperatura del fluido, ocasionando que esta se rompa.

Trabajos Futuros

- El estudio de la maquinabilidad de los aluminuros de titanio es una rama importante en el desarrollo de la industria ecuatoriana. Por tal motivo, es necesario continuar con investigaciones acerca del comportamiento de este tipo de material en el mecanizado.
- Al ser un material nuevo se pudo apreciar que no existe demasiada información en el mecanizado de este material, por lo tanto, basado en este estudio, existen algunas propuestas de trabajos de investigación que puedan desarrollarse, estos trabajos se presentan a continuación:
- Estudio del desgaste de la herramienta de corte en una aleación de titanio Ti-48Al-2Nb-0.7Cr-0.3Si.
- Estudio de la formación de viruta en el mecanizado de una aleación de titanio Ti-48Al-2Nb-0.7Cr-0.3Si.
- Diseño y fabricación de un soporte para adquisición de imágenes en el proceso de torneado mediante el uso de una cámara de alta velocidad Phantom v2512.

Bibliografía

- Adeva, P. (1999). Materiales Intermetalicos Para Aplicaciones Estructurales a Altas Temperaturas. En *Departamento de Metalurgia Física. Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas. CSCIC. Av. Gregorio del Amo, 8, 28040 MADRID.*
<http://digital.csic.es/bitstream/10261/114369/1/Intermetalicos.pdf>
- Aspinwall, D. K., Dewes, R. C., & Mantle, A. L. (2005). The machining of γ -TiAl intermetallic alloys. En *CIRP Annals - Manufacturing Technology* (Vol. 54, Número 1).
- Aust, E., & Niemann, H. (1999). Machining of γ -TiAl. *Advance Engineering Materials*, 1, 53-57.
- Avilés, C., & Bayas, J. (2019). *Diseño de metodología para medir maquinabilidad de piezas fabricadas por manufactura aditiva* [Escuela Politecnica del Litoral, Guayaquil- Ecuador].
<http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/46971>
- Barry, J., Byrne, G., & Lennon, D. (2001). Observations on chip formation and acoustic emission in machining Ti-6Al-4V alloy. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 41(7), 1055-1070. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(00\)00096-1](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(00)00096-1)
- Biermann Dirk, M. C. (2011). Machining of β -titanium-alloy Ti-10V-2Fe-3Al under cryogenic conditions: Cooling with carbon dioxide snow. En *Journal of Materials Processing Technology* (Vol. 211, Número 6).
- Carvajal Hernandez, C. F., & Cocha Ajila, J. J. (2018). Estudio de la influencia de los prametros de corte y geometria con herramienta de acero rapido en procesos de mecanizado en el polimero poliamida 6,. *Tesis*, 1-57. <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/5081/1/UPS-CYT00109.pdf>
- Castellanos, S. (2019). *Machinability Evaluation of in Finishing Operations by Milling*. Universidad de Porto, Porto- Portugal.

- Castellanos, S. D., Alves, J. L., & Neto, R. J. (2017). A comparative study of manufacturing processes of complex surface parts in Titanium Ti6Al4V. *Ciencia e Tecnologia dos Materiais*, 29(2), 73-78.
<https://doi.org/10.1016/j.ctmat.2017.03.002>
- Castellanos, S. D., Cavaleiro, A. J., Jesus, A. M. P. D., Neto, R., & Alves, J. L. (2019). Machinability of titanium aluminides: A review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 233(3), 426-451. <https://doi.org/10.1177/1464420718809386>
- Chen, X., Wang, Z., Ding, D., Tang, H., Qiu, L., Luo, X., & Shi, G. (2015). Strengthening and toughening strategies for tin bronze alloy through fabricating in-situ nanostructured grains. En *Materials and Design* (Vol. 66, Número PA).
- Chen, Y. Y., Li, B. H., & Kong, F. T. (2008). Microstructural refinement and mechanical properties of Y-bearing TiAl alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 457(1-2), 265-269.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2007.03.050>
- Cheng, Y., Yuan, Q., Zhang, B., & Wang, Z. (2019). Study on turning force of γ -TiAl alloy. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 105(5-6), 2393-2402.
<https://doi.org/10.1007/s00170-019-04356-z>
- Clemens, H., & Kestler, H. (2000). Processing and applications of intermetallic γ -TiAl-based alloys. En *Advanced Engineering Materials* (Vol. 2, Número 9).
- Clemens, H., & Mayer, S. (2013). Design, processing, microstructure, properties, and applications of advanced intermetallic TiAl alloys. *Advanced Engineering Materials*, 15(4), 191-215.
<https://doi.org/10.1002/adem.201200231>
- Davim, J. P. (2010). Surface integrity in machining. En *Surface Integrity in Machining* (Número June).
<https://doi.org/10.1007/978-1-84882-874-2>

- Diaz del Castillo, F., & Cárdenas, J. (2015). Superaleaciones. *Facultad de Estudios Superiores Cuautitlan*, 23, 194.
- Direct Industry. (2019). *Colada de un Turbocompresor hecho con TiAl - Topcast Srl*.
<https://trends.directindustry.es/topcast-srl/project-50296-132084.html>
- Elshwain, A. E. I., & Redzuan, N. (2014). Effect of cooling/lubrication using cooled air, MQL + cooled air, N₂ and CO₂ gases on tool life and surface finish in machining - a review. *Advanced Materials Research*, 845, 889-893. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.845.889>
- Fernández, D., Sandá, A., & Bengoetxea, I. (2019). Cryogenic milling: Study of the effect of CO₂ cooling on tool wear when machining Inconel 718, grade EA1N steel and Gamma TiAl. *Lubricants*, 7(1), 1-10.
<https://doi.org/10.3390/lubricants7010010>
- Gharibi, A. (2016). *the Effects of High-Pressure Coolant on Progressive Tool Wear in Machining Stainless Steel*. 781-791.
- Grimaldo, J. (2016). *Estudio del comportamiento termo-mecánico de una aleación Ti-Al-V-Fe para aplicaciones en la industria aeronáutica*. UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN.
- H. Clemens, & Mayer, S. (2016). *Intermetallic titanium aluminides in aerospace applications – processing , microstructure and properties*.
- Hong, S. Y., & Ding, Y. (2001). Cooling approaches and cutting temperatures in cryogenic machining of Ti-6Al-4V. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 41(10), 1417-1437.
[https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(01\)00026-8](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(01)00026-8)
- Hong, S. Y., Ding, Y., & Ekkens, R. G. (1999). Improving low carbon steel chip breakability by cryogenic chip cooling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 39(7), 1065-1085.
[https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(98\)00074-1](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(98)00074-1)

- Hood, R. (2010). *The Machinability of a Gamma Titanium Aluminide Intermetallic*. Universidad de Birmingham, Birmingham- Inglaterra.
- Hosseini, A., & Kishawy, H. A. (2014). *Cutting Tool Materials and Tool Wear*. 31-56.
https://doi.org/10.1007/978-3-662-43902-9_2
- Jabbaripour, B., Sadeghi, M. H., Faridvand, S., & Shabgard, M. R. (2012). Investigating the effects of edm parameters on surface integrity, mrr and twr in machining of Ti-6Al-4V. *Machining Science and Technology*, 16(3), 419-444. <https://doi.org/10.1080/10910344.2012.698971>
- Jawahir, I. S., Attia, H., Biermann, D., Duflou, J., Klocke, F., Meyer, D., Newman, S. T., Pusavec, F., Putz, M., Rech, J., Schulze, V., & Umbrello, D. (2016). Cryogenic manufacturing processes. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 65(2), 713-736. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.06.007>
- Kaushal, A., Vardhan, A., Tiwari, A. C., & Saluja, S. K. (2016). Study the effect of cryogenic cooling on orthogonal machining Process. *American Journal of Engineering Research (AJER)*, 5, 96-104.
www.ajer.org
- Kaynak, Y., & Gharibi, A. (2018). Progressive tool wear in cryogenic machining: The effect of liquid nitrogen and carbon dioxide. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2(2).
<https://doi.org/10.3390/jmmp2020031>
- Kaynak, Y., & Gharibi, A. (2019). Cryogenic Machining of Titanium Ti-5553 Alloy. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, 141(4). <https://doi.org/10.1115/1.4042605>
- Kaynak, Y., Lu, T., & Jawahir, I. S. (2014). Cryogenic machining-induced surface integrity: A review and comparison with dry, mql, and flood-cooled machining. *Machining Science and Technology*, 18(2), 149-198. <https://doi.org/10.1080/10910344.2014.897836>
- Khanna, N., Shah, P., & Chetan. (2020). Comparative analysis of dry, flood, MQL and cryogenic CO2

techniques during the machining of 15-5-PH SS alloy. *Tribology International*, 146(September 2019), 106196. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106196>

Klocke, F., Settineri, L., Lung, D., Claudio Priarone, P., & Arft, M. (2013). High performance cutting of gamma titanium aluminides: Influence of lubricoolant strategy on tool wear and surface integrity. *Wear*, 302(1-2), 1136-1144. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2012.12.035>

Kothari, K., & Radhakrishnan, R. (2012). *Advances in gamma titanium aluminides and their manufacturing techniques*.

Liang, X., Liu, Z., & Wang, B. (2018). State-of-the-art of surface integrity induced by tool wear effects in machining process of titanium and nickel alloys: A review. En *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation* (Vol. 132).

Loria, E. (2001). *Quo vadis gamma titanium aluminide*.

Luis de Sousa, M. (2017). *Análise da Maquinabilidade de Aluminetos de Titânio*. Universidad de Porto, Porto-Portugal.

Morán, J. L. (2000). *Efectos térmicos en mecanizado de piezas de acero al carbono*. <http://oa.upm.es/107/>

Namb, M., & Paulo, D. (2011). Influence of Coolant in Machinability of Titanium Alloy (Ti-6Al-4V). *Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology*, 01(01), 9-14.
<https://doi.org/10.4236/jsemat.2011.11002>

Niinomi, M. (2019). Titanium alloys. *Encyclopedia of Biomedical Engineering*, 1-3, 213-224.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801238-3.99864-7>

Pittalà, G. M. (2018). A study of the effect of CO2 cryogenic coolant in end milling of Ti-6Al-4V. *Procedia CIRP*, 77(Hpc), 445-448. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.278>

- Precision. (2021). *Aplicación de la aleación de titanio en el automóvil - tecnología de titanio y aleación de titanio - Noticias - Baoji Precision Titanium Products Co., Ltd.*
<https://es.psstitaniumfastener.com/news/application-of-titanium-alloy-in-automobile-49549014.html>
- Priarone, P. C., Klocke, F., Faga, M. G., Lung, D., & Settineri, L. (2016). Tool life and surface integrity when turning titanium aluminides with PCD tools under conventional wet cutting and cryogenic cooling. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 85(1-4), 807-816.
<https://doi.org/10.1007/s00170-015-7958-5>
- Pujana, J., Arrazola, P. J., & Villar, J. A. (2008). In-process high-speed photography applied to orthogonal turning. *Journal of Materials Processing Technology*, 202(1-3), 475-485.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.10.007>
- Radkowski, G., & Sep, J. (2014). Surface Quality of Amilled Gamma Titaniumaluminide for Aeronautical Applications. *Management and Production Engineering Review*, 5(2), 60-65.
<https://doi.org/10.2478/mper-2014-0018>
- Ranjit, R. (2010). *Primer on the Taguchi Method* (2nd ed., Número January). Society of Manufacturing Engineers. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.21506.84163>
- Sandvik Coromant. (2020). *QS-PCLNR 2525-12C*. <https://www.sandvik.coromant.com/es-es/products/pages/productdetails.aspx?c=QS-PCLNR 2525-12C>
- Shokrani, A., Dhokia, V., Muñoz-Escalona, P., & Newman, S. T. (2013). State-of-the-art cryogenic machining and processing. En *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* (Vol. 26, Número 7).
- Stefansson, T. (2013). *Application of Cryogenic Coolants in Machining Processes*.

Sun, S., Brandt, M., & Dargusch, M. S. (2009). Characteristics of cutting forces and chip formation in machining of titanium alloys. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49(7-8), 561-568. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2009.02.008>

Sutter, G. (2005). Chip geometries during high-speed machining for orthogonal cutting conditions. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45(6), 719-726. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2004.09.018>

Telenchana Yanqui, J. L. (2013). *Análisis de revestimientos duros en uniones soldadas de acero al carbono A36 mediante el proceso SMAW y su incidencia en las propiedades mecánicas*. Universidad Técnica de Ambato, Ambato- Ecuador.

Turbo Master. (2023). *Válvula MV-R - Racing - Aplicaciones - TurboMaster*. https://www.turbomaster.info/aplicaciones/wastegate_MVR_es.php

Venugopal, K. A., Paul, S., & Chattopadhyay, A. B. (2007). Tool wear in cryogenic turning of Ti-6Al-4V alloy. *Cryogenics*, 47(1), 12-18. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2006.08.011>

Warlimont, H. (2018). Titanium and titanium alloys. En *Springer Handbooks*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-69743-7_7

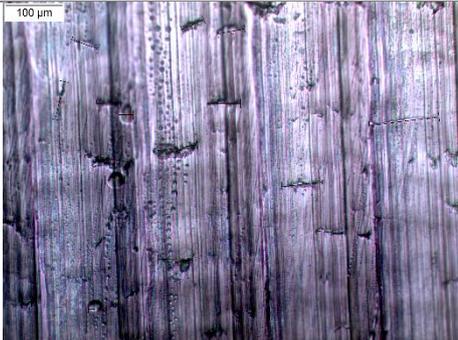
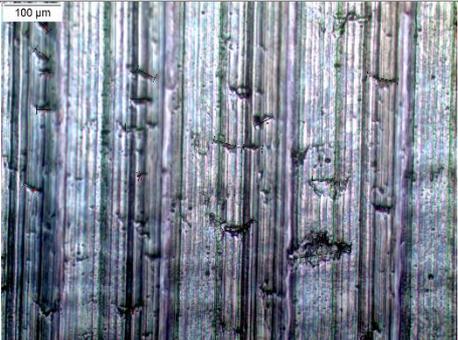
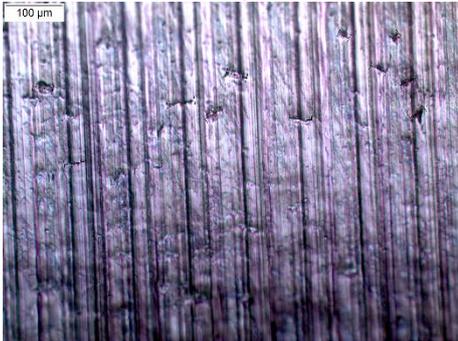
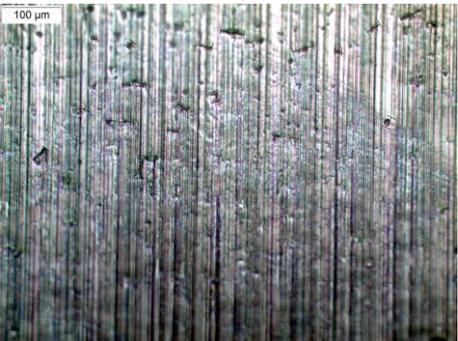
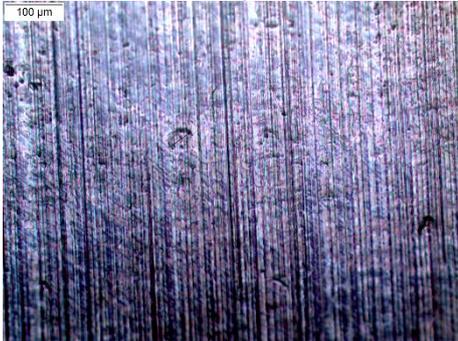
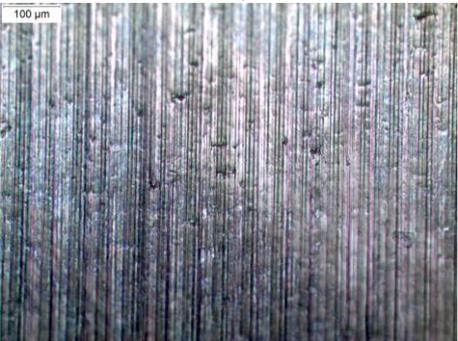
Yildiz Yakup, N. M. (2008). A review of cryogenic cooling in machining processes. En *International Journal of Machine Tools and Manufacture* (Vol. 48, Número 9).

Apéndices

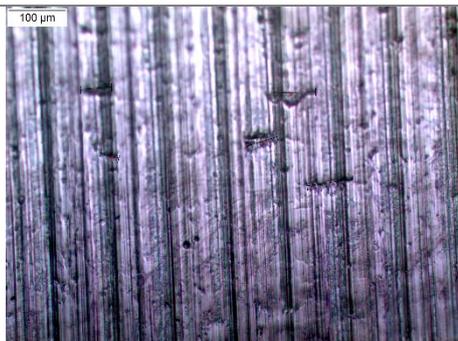
Apéndice A. Topología de la Superficie Mecanizada



RESULTADOS TOPOLOGICOS

Sección	N°	Parámetros de Corte			Topografía de la superficie	
		Vc	fn	ap	Con Emulsión al 6%	Con CO2
	1	20	0,2	0,3	 0,65 µm	 0,50 µm
1;4	2	35	0,1	0,3	 0,45 µm	 0,40 µm
	3	50	0,05	0,3	 0,35 µm	 0,35 µm

1 20 0,1 0,15

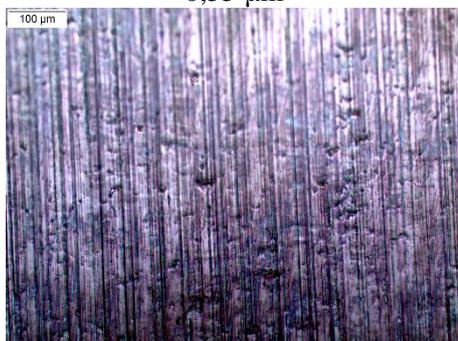


0,55 μm

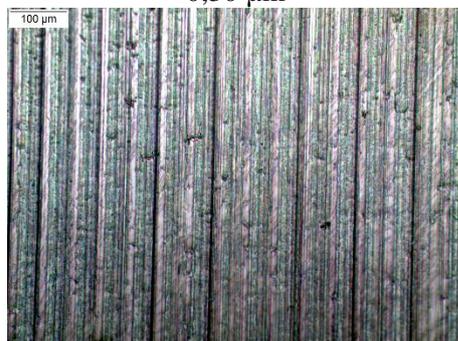


0,30 μm

2;5 2 35 0,05 0,15

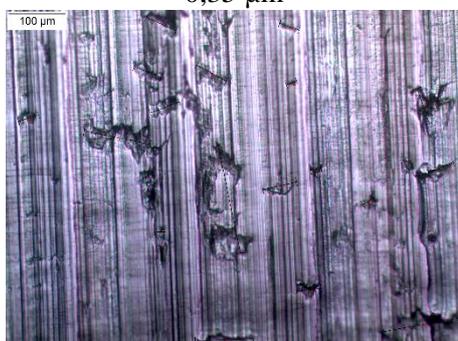


0,35 μm

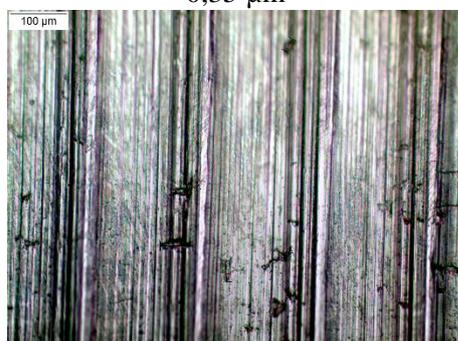


0,35 μm

3 50 0,2 0,15

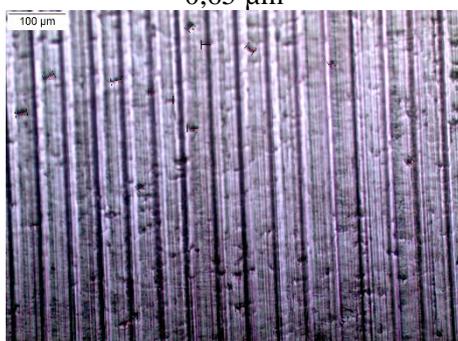


0,65 μm

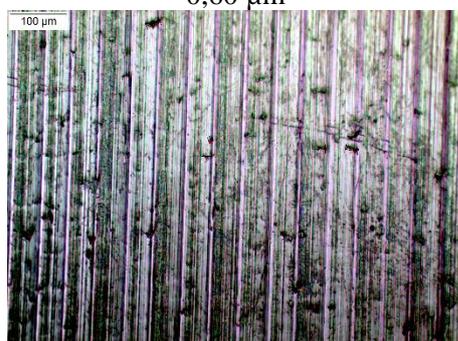


0,60 μm

1 20 0,05 0,075



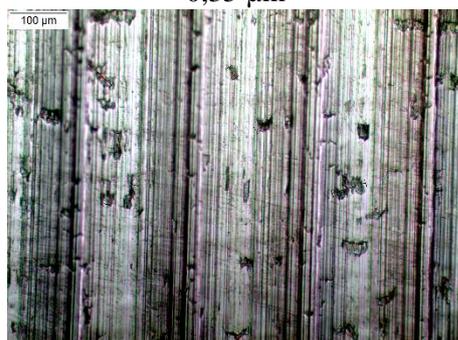
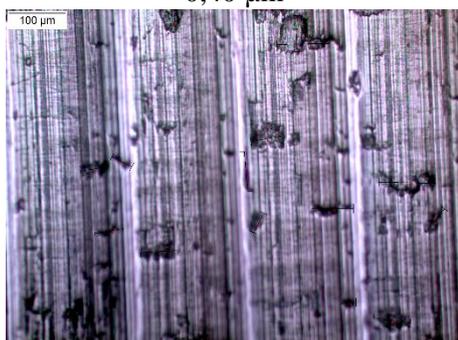
0,40 μm



0,35 μm

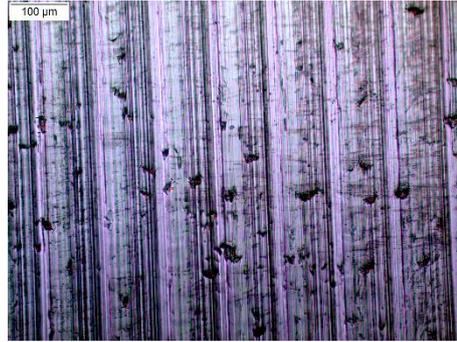
3;6

2 35 0,2 0,075

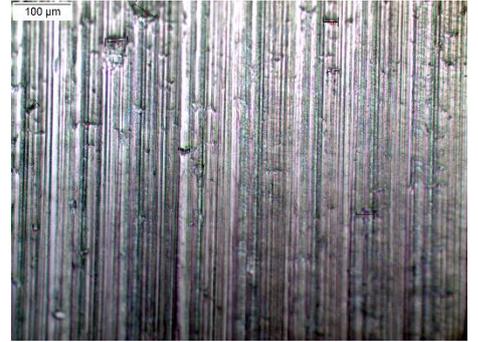


1 50 0,1 0,075

0,60 μm



0,40 μm



0,65 μm

0,35 μm

Apéndice B. Rugosidad de la Superficie Mecanizada



RESULTADOS DE RUGOSIDAD

No	Sección 1			Sección 2			Sección 3			Sección 4			Sección 5			Sección 6		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	0,53	0,44	0,34	0,54	0,33	0,58	0,41	0,65	0,65	0,49	0,40	0,33	0,3	0,31	0,58	0,32	0,40	0,30
2	0,60	0,44	0,34	0,55	0,34	0,63	0,44	0,61	0,70	0,46	0,40	0,36	0,32	0,33	0,58	0,35	0,43	0,29
3	0,53	0,40	0,33	0,50	0,34	0,65	0,45	0,60	0,66	0,47	0,37	0,32	0,32	0,34	0,60	0,30	0,42	0,30
4	0,59	0,44	0,30	0,52	0,31	0,58	0,45	0,65	0,70	0,49	0,40	0,36	0,35	0,31	0,59	0,33	0,40	0,35
5	0,64	0,45	0,30	0,52	0,32	0,64	0,43	0,61	0,68	0,46	0,39	0,35	0,3	0,3	0,58	0,30	0,44	0,33
6	0,57	0,44	0,35	0,53	0,34	0,57	0,45	0,62	0,67	0,48	0,35	0,30	0,35	0,31	0,58	0,33	0,41	0,30
7	0,51	0,45	0,30	0,55	0,33	0,56	0,43	0,64	0,70	0,47	0,40	0,31	0,34	0,31	0,57	0,30	0,40	0,32
Mecanizado Con Emulsión al 6%												Mecanizado con CO2						

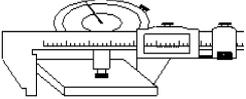
Apéndice C. Desgaste de la herramienta



RESULTADOS DESGASTE DE LA HERRAMIENTA DE CORTE

Nº Inserto	Medida Inicial	Medida Final	Diferencia	Observación
Mecanizado con Emulsión al 6%				
1	0	0	0	No existe desgaste
2	12,513	12,519	-0,006	
3	0	0	0	No existe desgaste
4	12,516	12,518	-0,002	
5	12,311	12,317	-0,006	
6	12,522	12,527	-0,005	
7	12,386	12,398	-0,012	
8	0	0	0	No existe desgaste
9	0	0	0	No existe desgaste
Mecanizado con CO₂				
10	0	0	0	No existe desgaste
11	16,429	16,452	-0,023	
12	16,609	16,612	-0,003	
13	16,622	16,632	-0,01	
14	16,764	16,787	-0,023	
15	16,599	16,61	-0,011	
16	16,493	16,518	-0,025	
17	0	0	0	No existe desgaste
18	16,478	16,499	-0,021	

Apéndice D. Características técnicas del Rugosímetro Portátil

	LIBROS DE VIDA LABORATORIO METROLOGIA	
	EQUIPO: RUGOSÍMETRO PORTATIL	CÓDIGO ESPE: 04-4684-76-00001 CÓDIGO LAB.: DCEM-LB-METRO- HI-01
	HOJA TÉCNICA: IDENTIFICACIÓN	ÚLTIMA MODIFICACIÓN: 2021/06/10

DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO: RUGOSÍMETRO PORTÁTIL

ESTADO DEL EQUIPO	OPERATIVO		NO OPERATIVO	
	X			
ÁREA DE LOCALIZACIÓN EQUIPO	METROLOGÍA BÁSICA	METROLOGÍA INDUSTRIAL	METROLOGÍA SUPERFICIES	METROLOGÍA ÓPTICA
			X	

DESCRIPCIÓN DE OPERACIÓN DEL EQUIPO

MEDICIÓN DEL ACABADO SUPERFICIAL EN ACEROS, ALUMINIOS, POLIMEROS, BRONCE, ETC.

ILUSTRACIÓN DEL EQUIPO

	PARTES	
	1.-	Amplificador / medidor
	2.-	Unidad de poder y desplazamiento
	3.-	Patrón de rugosidad
	4.-	Palpador
	5.-	Conector de entrada
	6.-	Switch Ra – Rt
	7.-	Cut – off
	8.-	Alcance
	9.-	Medidor desplazamiento del Palpador
	10.-	

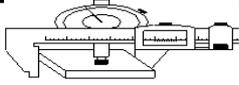
REQUISITOS PARA OPERACIÓN DEL EQUIPO

VOLTAJE:	120V	AMPERAJE	N/A	FRECUENCIA	60 Hz	FASES	1
----------	------	----------	-----	------------	-------	-------	---

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

MARCA:	MITUTOYO	SERIE:	13216
MODELO:	SURFTEST III	PROCEDENCIA:	JAPÓN
ALCANCE DE MEDICIÓN:	0.3 - 100µm / 0.5 - 200 µin	APRECIACIÓN:	0.02 – 5.0 µm 0.5 – 200.0 µin

Apéndice E. Características técnicas del Proyector de Perfiles

	LIBROS DE VIDA: LABORATORIO METROLOGIA	
	EQUIPO: PROYECTOR DE PERFILES 50X	
		HOJA TÉCNICA: IDENTIFICACIÓN

DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO: PROYECTOR DE PERFILES 10-50X

ESTADO DEL EQUIPO	OPERATIVO		NO OPERATIVO	
	X			
ÁREA DE LOCALIZACIÓN EQUIPO	METROLOGÍA BÁSICA	METROLOGÍA INDUSTRIAL	METROLOGÍA SUPERFICIES	METROLOGÍA ÓPTICA
				X

DESCRIPCIÓN DE OPERACIÓN DEL EQUIPO

VERIFICACIÓN DE PERFILES DE ELEMENTOS MECÁNICOS CON AUMENTO DE 10 Y 50X

ILUSTRACIÓN DEL EQUIPO

	PARTES	
	1.-	Espejo de reflexión
	2.-	Fuente de luz
	3.-	Cristal mate de proyección
	4.-	Desplazamiento vertical de la platina
	5.-	Elemento proyectado
	6.-	Revolver de objetivos
	7.-	Botones de encendido y apagado
	8.-	Sujeta papel
	9.-	
10.-		

REQUISITOS PARA LA OPERACIÓN DEL EQUIPO

VOLTAJE:	220V	AMPERAJE	0,15 A	FRECUENCIA	60 Hz	FASES	2
----------	------	----------	--------	------------	-------	-------	---

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

MARCA:	CARLS ZEISS JENA	SERIE:	S/R
MODELO:	MP320	PROCEDENCIA:	Inglaterra
ALCANCE LONGITUDINAL	0 - 25/ 0.001 mm	ALCANCE TRANSVERSAL	0 - 25/ 0.001 mm
ALCANCE MESA GONIOMÉTRICA	0 - 360°/ 2 min	AUMENTOS	10X - 50X



RESULTADOS MICROSCOPICOS DE LA FORMACION DE VBIRUTA

N.º	Parámetros de Corte			Tipo de Refrigeración		
	Velocidad de Corte Vc [m/min]	Avance fn [mm/rev]	Profundidad de Corte ap [mm]	Refrigeración a base de aceite (emulsión al 6%)	Refrigeración con fluido criogénico (CO2)	
Sección 1	1	20	0,2	0,3		
Sección 1	2	35	0,1	0,3		
Sección 1	3	50	0,05	0,3		
Sección 2	1	20	0,1	0,15		
Sección 2	2	35	0,05	0,15		

Sección 3

3	50	0,2	0,15
1	20	0,05	0,075
2	35	0,2	0,075
3	50	0,1	0,075



Nota: Imágenes microscópicas de virutas obtenidas en ensayos realizados con aumento de 20x