



**COMPARACIÓN DE LA MAQUINABILIDAD DE LOS ACEROS INOXIDABLES
13CR-4NI Y 16CR-5NI**

PRESENTADO POR:

KEVIN POTES MORALES

DIRECTOR:

JOHN JAIRO CORONADO MARIN, Ph.D.

CODIRECTOR:

CARLOS ANDRES SOTO SALAMANCA, M.Sc.

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
CALI, COLOMBIA - 2025**

Contenido

Resumen	5
1 Introducción	1
2 Antecedentes	3
3 Objetivos	5
3.1 Objetivo General.....	5
3.2 Objetivos específicos	5
4 Estado del arte.....	6
5 Marco teórico.....	9
5.1 Aceros inoxidables martensíticos	9
5.1.1 Acero 13Cr-4Ni	12
5.1.2 Acero 16Cr-5Ni	13
5.2 Proceso de torneado	13
5.2.1 Parámetros de corte.....	13
5.2.1.1 Velocidad de corte	13
5.2.1.2 Avance	14
5.2.1.3 Profundidad de corte (DOC).....	14
5.2.2 Herramientas de corte para aceros inoxidables	14
5.2.2.1 Geometría y posicionamiento de la herramienta de corte	15
5.2.3 Maquinabilidad.....	17
5.2.3.1 Fuerzas de corte	17
5.2.3.1.1 Dinamómetro para torno	18
5.2.3.2 Rugosidad superficial	18
5.2.3.2.1 Medidas de rugosidad	19
5.2.3.3 Desgaste en los procesos de cilindrado	21
5.2.3.3.1 Mecanismos de desgaste.....	21
5.2.3.3.2 Formas de desgaste en la herramienta	21
5.2.3.4 Vida de la herramienta	22
5.2.3.5 Tipo de viruta y la maquinabilidad	22
5.2.3.6 Influencia de la microestructura sobre la maquinabilidad	24
6 Metodología	25
6.1 Barras de acero inoxidable.....	25
6.2 Metalografía y dureza	25
6.3 Insertos, porta-insertos y Torno CNC	26
6.4 Dinamómetro y medidor de deformaciones	27
6.5 Rugosidad y desgaste de la herramienta	30
6.6 Plan de pruebas y procedimiento	30
6.7 Tratamiento estadístico de los datos experimentales.....	32

6.8	Calificación de los criterios	32
7	<i>Resultados</i>	34
7.1	Virutas.....	34
7.2	Desgaste.....	37
7.3	Rugosidades	41
7.4	Fuerzas de corte	43
8	<i>Conclusiones</i>	48
9	<i>Recomendaciones y trabajos futuros</i>	49

Agradecimientos

A Dios, por acompañarme en este camino, permitiéndome avanzar y enfrentar cada etapa del proyecto.

A mi familia, por su apoyo constante durante todo el proceso.

A mi director, el Dr. John Jairo Coronado, por su guía y las orientaciones que fortalecieron el rumbo de este trabajo.

A mi codirector, el M. Sc. Carlos Andrés Soto, por el tiempo, la disposición y la asistencia a lo largo del desarrollo del proyecto.

A los profesores que apoyaron con materiales y equipos necesarios, lo cual marcó una diferencia importante.

A los profesores del taller de manufactura por el buen ambiente de trabajo y por su disposición para ayudar.

A mis compañeros, por contribuir a un ambiente de trabajo favorable durante esta etapa.

Resumen

Los aceros inoxidables martensíticos 13Cr-4Ni y 16Cr-5Ni son ampliamente utilizados por su alta resistencia a la corrosión y sus propiedades mecánicas. El 16Cr-5Ni se considera una versión mejorada del 13Cr-4Ni en cuestiones de resistencia al desgaste y resistencia a la fatiga, sin embargo, la información disponible sobre la comparación de ambos materiales en términos de maquinabilidad es limitada. Por ello, este trabajo tiene como objetivo evaluar la maquinabilidad de los aceros inoxidables 13Cr-4Ni y 16Cr-5Ni mediante un proceso de cilindrado en seco, con el fin de aportar información que contribuya a los estudios de maquinabilidad. La metodología utilizada incluyó la recolección de virutas, la medición de fuerzas de corte, rugosidad superficial sobre la pieza maquinada y la medición del desgaste de la herramienta. El proceso consistió en la repetición de un ciclo de maquinado hasta desgastar el flanco de la herramienta 0.45mm siguiendo recomendaciones de la norma ISO 3685. Se utilizaron tres velocidades de corte 120, 145 y 170m/min con una profundidad de 0.5mm y un avance de 0.2mm/rev. Los resultados mostraron que el acero 13Cr-4Ni presentó una mejor maquinabilidad que el 16Cr-5Ni, con fuerzas de corte de 25 % a 68 % menores. En ambos materiales se obtuvieron superficies con rugosidades promedio inferiores a 3.2 μm . El desgaste de la herramienta se concentró en el radio de punta, dominado por mecanismos de adhesión y abrasión. El mecanizado del acero 13Cr-4Ni permitió completar de tres a cuatro veces más ciclos de corte antes de llegar al límite de vida de la herramienta, confirmando un desgaste más lento y una mayor maquinabilidad en comparación con el 16Cr-5Ni.

Palabras clave: acero inoxidable, 13Cr-4Ni, 16Cr-5Ni, maquinabilidad, fuerzas de corte, acabado superficial, desgaste de la herramienta.

1 Introducción

El maquinado es un proceso fundamental en la manufactura, que ha permitido el desarrollo de componentes precisos y de alta calidad para una gran variedad de industrias, desde la automotriz hasta la aeroespacial y médica [1] [2] [3]. La precisión y el rendimiento del maquinado permite transformar materiales en componentes clave, lo que impulsa el avance tecnológico y responde a las crecientes demandas de la sociedad [4]. La maquinabilidad de los materiales es un factor clave en procesos de corte, lo que impulsa la búsqueda constante de técnicas para mejorar el desempeño y sostenibilidad del proceso. Esta se evalúa a través de factores como el desgaste de la herramienta [5], las fuerzas de corte [6], la formación de virutas [7], el acabado superficial [8] y la precisión dimensional de las piezas [9].

Las industrias metalmecánicas buscan reducir gastos operativos sin comprometer la calidad de su producción, para lograrlo, requieren datos confiables que les permitan seleccionar materiales no solo por su costo, sino también por su comportamiento en condiciones específicas de mecanizado, la vida útil de las herramientas y la calidad del producto final [10]. La optimización de los parámetros de corte en función de la maquinabilidad de cada material es crucial para maximizar tanto la calidad del producto como la productividad del proceso, permitiendo así una operación más competitiva y rentable [11]. El análisis de las fuerzas de corte, el acabado superficial y el desgaste de la herramienta permitirá una evaluación de las ventajas y limitaciones de cada acero evaluado bajo diferentes condiciones de maquinado.

Este estudio se basa en la comparación de la maquinabilidad de dos aceros inoxidables martensíticos, el 16Cr-5Ni y el 13Cr-4Ni, mediante un proceso de cilindrado en seco. Estos aceros se emplean ampliamente en diversas áreas de la ingeniería, como en las turbinas hidráulicas, gracias a su dureza, resistencia mecánica y notable resistencia a la corrosión [12] [13] [14] [15]. El problema que se busca resolver es determinar cuál de los dos aceros, 16Cr-5Ni o 13Cr-4Ni, presenta menores fuerzas de corte, mejor acabado superficial y menor desgaste de la herramienta al someterse a un proceso de cilindrado seco bajo condiciones controladas: tres velocidades de corte, un avance constante y una profundidad de corte constante. La elección del material de trabajo no solo puede mejorar la calidad y precisión de las piezas, sino también reducir el desgaste de herramientas y de esta forma minimizar los tiempos de producción, aspectos fundamentales en la industria de manufactura [4].

Los resultados obtenidos en procesos de mecanizado, tales como las fuerzas de corte, el tipo de viruta, la vida de la herramienta y las características de la integridad superficial, se emplean como criterios para evaluar la maquinabilidad de un material. Estos resultados tienen un impacto directo en los costos de manufactura, ya que determinan variables clave como el tiempo de ciclo, al definir las velocidades y condiciones de corte viables; el consumo energético, debido a la relación entre fuerzas de corte y potencia requerida; la vida útil de las herramientas, asociada a su desgaste; y la tasa de rechazo, relacionada con variaciones dimensionales y deterioro del acabado superficial [16]. Adicionalmente, en componentes donde la integridad superficial es un factor crítico, la maquinabilidad influye en el desempeño

en servicio, ya que las condiciones de mecanizado pueden generar tensiones residuales, microfisuras, endurecimiento superficial y variaciones de rugosidad, las cuales afectan directamente fenómenos como la fatiga, el desgaste y la eficiencia de los sistemas mecánicos [2]. El estudio de la maquinabilidad de los aceros 13Cr-4Ni y 16Cr-5Ni resulta fundamental para optimizar los procesos de manufactura y garantizar el desempeño adecuado de los componentes mecánicos, ya que los resultados de maquinabilidad como desgaste de la herramienta y fuerzas de corte permiten asociar costos de producción y la calidad del acabado puede determinar si las piezas cumplen con requisitos de manufactura. Sin embargo, la información disponible que permita comparar de manera directa ambos materiales desde el punto de vista de la maquinabilidad es limitada, lo que justifica el desarrollo del presente trabajo.

Con la finalidad de estructurar y visualizar los factores involucrados en la problemática abordada, se elaboró un árbol del problema Figura 1. En él, el problema central se ubica en el centro del esquema, mientras que las causas que lo generan se representan en la parte inferior, y los efectos derivados se sitúan en la parte superior.

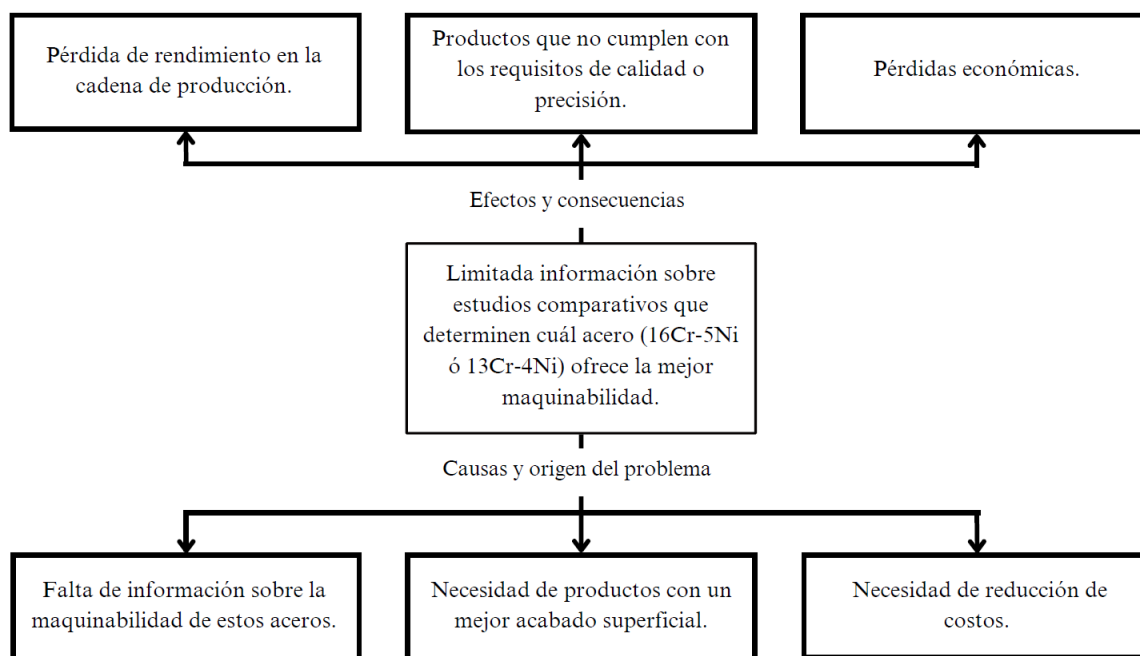


Figura 1 Árbol del problema que presenta el problema central, sus causas y sus efectos, en el contexto de la maquinabilidad de los aceros inoxidables 16Cr-5Ni y 13Cr-4Ni.

2 Antecedentes

Según el *United States Bureau of Reclamation* [17], la selección del material para rodets de turbinas hidráulicas ha estado históricamente condicionada por las exigencias mecánicas, la resistencia a cavitación y corrosión, los costos de fabricación y la facilidad de reparación en servicio, lo que llevó a una transición desde aceros al carbono fundidos hacia el uso predominante de aceros inoxidable. Aunque los aceros inoxidable austeníticos presentan una mayor resistencia a la corrosión, su menor resistencia mecánica y mayor costo han limitado su aplicación en rodets de gran tamaño, favoreciendo el empleo de aceros inoxidable martensíticos fundidos como el CA-6NM, desarrollado a inicios de la década de 1960 como alternativa al CA-15 debido a su mejor comportamiento en fundición, mayor resistencia mecánica, soldabilidad mejorada y resistencia a la cavitación comparable a la de los austeníticos tipo 304. Se documenta el uso de materiales alternativos, como los bronce de aluminio, los cuales pueden ofrecer una resistencia a la cavitación similar a la de los aceros inoxidable; sin embargo, su menor resistencia mecánica, el elevado costo de grandes coladas y las dificultades asociadas a la soldadura han restringido su uso a rodets de pequeño tamaño y, con mayor frecuencia, a impulsores de bombas. En conjunto, estas limitaciones han consolidado a los aceros inoxidable, y en particular a los martensíticos de bajo contenido de carbono, como la opción más adecuada para rodets de turbinas hidráulicas, al ofrecer un equilibrio favorable entre resistencia estructural, desempeño frente a cavitación, reparabilidad y viabilidad económica.

Saenz Betancourt et al. [18], evaluaron el comportamiento del acero inoxidable martensítico ASTM A743 CA-6NM frente a erosión por cavitación, uno de los principales mecanismos de deterioro en rodets de turbinas hidráulicas. En su estudio, el CA-6NM, material típicamente empleado en aplicaciones de hidromecánica, fue sometido a tratamientos termoquímicos de boronizado a diferentes tiempos, analizándose la evolución microestructural y el desempeño frente a cavitación conforme a la norma ASTM G32. Los resultados mostraron que el material boronizado presentó una reducción significativa en la tasa de erosión por cavitación en comparación con el material sin tratar, alcanzando mejoras de hasta el 72 % para condiciones específicas de tratamiento. Este estudio demuestra que el CA-6NM continúa siendo un material de interés para aplicaciones en turbinas hidráulicas, susceptible de ser optimizado para responder a condiciones operativas severas. El potencial de mejora del acero CA-6NM sugiere la continuidad en la fabricación de rodets con este material y, por ende, la necesidad de profundizar en el estudio y la optimización de los procesos de manufactura asociados, particularmente las operaciones de maquinado.

Muñoz Cubillos et al. [15], compararon el comportamiento frente a cavitación y erosión por partícula dura de un acero inoxidable martensítico 16Cr–5Ni con el acero inoxidable martensítico CA-6NM (13Cr–4Ni). En su estudio, el acero 16Cr–5Ni fue sometido a distintos tratamientos de envejecimiento térmico y evaluado mediante ensayos de cavitación ultrasónica y erosión por partícula dura, encontrándose una clara dependencia entre la dureza, el contenido de austenita retenida y la resistencia al desgaste. Los resultados mostraron que, bajo todas las condiciones evaluadas, el acero 16Cr–5Ni presentó una resistencia a la erosión por cavitación superior a la del CA-6NM, mientras que el comportamiento frente a erosión

por partícula dura fue comparable entre ambos materiales cuando el 16Cr–5Ni fue envejecido a 475 °C y 550 °C. Estos hallazgos sugieren que el 16Cr–5Ni puede constituir una alternativa viable al CA-6NM para aplicaciones en turbinas hidráulicas. Desde una perspectiva de manufactura, la coexistencia de materiales con desempeños tribológicos similares o superiores refuerza la necesidad de incorporar criterios adicionales de selección, entre ellos el comportamiento durante las operaciones de maquinado, dado que las diferencias en microestructura, dureza y austenita retenida pueden influir directamente en la maquinabilidad y en la eficiencia en los procesos de fabricación.

Maruzewski et al. [19], estudiaron el impacto de la rugosidad superficial de los componentes hidráulicos sobre el desempeño de una turbina Francis, demostrando que las pérdidas hidráulicas y la eficiencia global están fuertemente influenciadas por la condición superficial de las paredes en contacto con el flujo. En su trabajo se analizaron rugosidades en un rango aproximado de 2.5 μm a 150 μm , identificando que las superficies pueden considerarse hidráulicamente lisas para valores de rugosidad inferiores a 25 μm , mientras que valores superiores conducen a un aumento progresivo de las pérdidas por fricción y a una disminución de la eficiencia. Asimismo, los autores reportaron que procesos de rehabilitación superficial, como el granallado y la pintura, permiten reducir la rugosidad equivalente hasta valores cercanos a 10 μm , recuperando parcialmente el rendimiento de la turbina. Estos resultados ponen de manifiesto que el control de la rugosidad superficial de componentes críticos, como el rodete y los álabes guía, es un factor determinante en el desempeño de turbinas hidráulicas, resaltando la importancia de los procesos de manufactura y maquinado en la calidad superficial final de los aceros utilizados en estas aplicaciones.

Wang et al. [20], investigaron la influencia de la integridad superficial generada por el mecanizado en la resistencia a fatiga de una aleación Al-Si ZL109, evaluando probetas obtenidas mediante diferentes estrategias de torneado. Los autores demostraron que los parámetros de integridad superficial como la rugosidad, las tensiones residuales y la micro dureza tienen un efecto directo sobre el comportamiento a fatiga. En particular, se evidenció que una mayor rugosidad superficial favorece la concentración de esfuerzos y acelera la iniciación de grietas, mientras que la presencia de tensiones residuales compresivas y el endurecimiento por deformación contribuyen a retardar su propagación. Asimismo, las estrategias de corte utilizadas permitieron incrementar la vida a fatiga en más del 60 % respecto al corte en una sola pasada, debido a la generación de superficies con menor rugosidad, mayor microdureza y estados de esfuerzo residual más favorables. Estos resultados soportan que las condiciones de mecanizado influyen de manera determinante en la integridad superficial y, en consecuencia, en el desempeño de los materiales frente a la fatiga.

3 Objetivos

3.1 Objetivo General

Evaluar la maquinabilidad de los aceros inoxidables 16Cr-5Ni y 13Cr-4Ni durante un proceso de cilindrado en seco, mediante el análisis de las fuerzas de corte, la calidad del acabado superficial y el desgaste de la herramienta bajo distintas velocidades de corte.

3.2 Objetivos específicos

- Determinar el efecto de las diferentes velocidades de corte sobre las fuerzas de corte en los dos aceros inoxidables.
- Analizar la calidad del acabado superficial en ambos aceros mediante la medición de rugosidad.
- Identificar el desgaste en la herramienta de corte mediante el análisis de la superficie de la herramienta para cada velocidad de corte.

4 Estado del arte

Senthil Kumar et al. [21], realizaron un estudio sobre el comportamiento de herramientas de corte cerámicas basadas en alúmina durante el maquinado de acero inoxidable martensítico con dureza de 60 HRC. Se emplearon cuatro tipos de herramientas cerámicas: alúmina reforzada con zirconia, alúmina mezclada con carbonitruro de titanio (Ti[C, N]), alúmina con adición de zirconia y carbonitruro de titanio, y alúmina reforzada con fibras de carburo de silicio (SiC). Se evaluó la vida útil de cada herramienta a partir de modelos matemáticos desarrollados mediante análisis de regresión múltiple, utilizando datos experimentales de desgaste de flanco, craterización y muescado. Los resultados muestran que el tipo de desgaste dominante varía con la velocidad de corte: el desgaste de flanco prevalece a bajas velocidades, mientras que a velocidades superiores a 200 m/min, predominan la craterización o el muescado, dependiendo del tipo de herramienta. En general, las herramientas cerámicas con mezcla de carbonitruro de titanio presentaron una vida útil ligeramente superior frente a las demás variantes, destacándose su mejor desempeño en el maquinado de aceros endurecidos.

Geng et al. [22], estudiaron los efectos de la adición de cobre sobre la maquinabilidad y resistencia a la corrosión del acero inoxidable martensítico 4Cr16Mo. Los resultados mostraron que la maquinabilidad mejoró notablemente al incorporar Cu, siendo óptima con un contenido del 1.4% de cobre. A nivel microestructural, se observó mediante difracción de electrones retrodispersados (EBSD) y microscopia episcópica (también conocida como iluminación reflejada) de alta resolución (HREM) que el Cu se dispersa formando fases ricas en cobre de aproximadamente 10 nm. Estas fases favorecen la formación de viruta y reducen el desgaste de herramienta. Además, la resistencia a la corrosión también se vio beneficiada con el aumento de Cu, lo cual amplía el rango de aplicaciones del material.

Thamizhmanii y Hasan [23], analizaron el torneado duro del acero inoxidable martensítico AISI 440C y del acero aleado SCM 440 empleando herramientas de corte de nitruro de boro cúbico (CBN por sus siglas en inglés) y nitruro de boro cúbico policristalino (PCBN por sus siglas en inglés), evaluando parámetros como la rugosidad superficial, el desgaste de flanco, la fuerza de corte y la presión específica de corte. Utilizando velocidades de corte entre 100 y 200 m/min y avances de 0.10 a 0.30 mm/rev, observaron que la rugosidad fue menor a altas velocidades y bajos avances, siendo mejor con herramientas CBN. El desgaste de flanco fue más bajo con PCBN, especialmente al mecanizar SCM 440, mientras que el acero AISI 440C mostró mayor desgaste por su contenido de carbono y cromo, que forma carburos abrasivos. Además, el acero inoxidable generó mayores fuerzas de corte debido a su baja conductividad térmica, lo que impidió una adecuada disipación del calor durante el mecanizado. A diferencia del acero aleado, donde el calor se distribuye entre la viruta, la herramienta y la pieza facilitando la deformación del material, en el acero inoxidable el calor se concentra en la zona de corte, lo que incrementa la resistencia al corte y, en consecuencia, las fuerzas requeridas. Finalmente, se evidenció una disminución en la presión específica de corte con el aumento de la velocidad, indicando una reducción en la resistencia al corte por el efecto térmico.

Corrêa et al. [24], investigaron los mecanismos de desgaste en herramientas recubiertas con carburo de titanio (TiC), carbonitruro de titanio (TiCN) y nitruro de titanio (TiN) mediante deposición química de vapor (CVD por sus siglas en inglés), durante el torneado de aceros inoxidables martensítico S41000 y supermartensítico S41426. Se realizaron pruebas de vida útil de la herramienta bajo diferentes condiciones de corte, luego se analizó el desgaste mediante el uso de microscopia electrónica de barrido (SEM) y dispersión de rayos X (EDS). Los resultados mostraron que el acero supermartensítico presentó una menor vida útil de herramienta a altas velocidades y profundidades de corte. En cuanto a los mecanismos de desgaste, en el acero martensítico predominó la abrasión y la difusión, mientras que en el supermartensítico fueron la adhesión y la abrasión. También se observó desgaste promedio en el flanco y adherencia de material en la superficie de la herramienta en todas las condiciones.

Ranjan y Hiremath [25], investigaron el maquinado del acero inoxidable martensítico AISI 420, caracterizado por su alta dureza y baja conductividad térmica, lo cual complica su mecanizado debido al elevado desgaste de herramienta. Para mejorar su maquinabilidad, se evaluaron herramientas de carburo recubiertas multicapa (TiN-TiCN-Al₂O₃-TiN y TiN-Al₂O₃-TiCN-TiN) y herramientas sin recubrimiento mediante experimentos de torneado y simulaciones por elementos finitos (FEM) en 2D y 3D. Los modelos fueron validados con datos experimentales de fuerzas tangenciales y de avance a una velocidad de corte de 230 m/min, profundidad de 0.3 mm y avances entre 0.14 y 0.25 mm/rev. Los resultados mostraron que el modelo 3D es más preciso que el 2D, con errores máximos de 13.97% en la fuerza tangencial y 5% en la de avance, frente al 59.1% del modelo 2D. Además, el modelo 3D permitió analizar el efecto del recubrimiento y los parámetros de corte sobre el esfuerzo efectivo, temperatura de corte, potencia consumida y temperatura en la herramienta. Se concluyó que el recubrimiento TiN-TiCN-Al₂O₃-TiN ofrece mejor rendimiento al reducir el esfuerzo, la temperatura y el consumo energético durante el mecanizado.

Shareef et al. [26], estudiaron la maquinabilidad de los aceros inoxidables AISI 303, 304, 316, 416 y del acero ASTM A36, utilizando un diseño central compuesto y ensayos de torneado con insertos recubiertos de nitruro de titanio y aluminio. Determinaron rangos de velocidad de corte (90.5-256 m/min), avance (0.0635-0.4826 mm/rev) y profundidad de corte (0.00016-0.00187 m). Identificaron al AISI 316 como el acero con mejor acabado superficial y al AISI 303, así como el de menor consumo de potencia y mejor fragmentación de viruta, atribuida a su composición de 2% de manganeso y 0.15% de azufre. Se concluyó que la velocidad de avance y la profundidad de corte son los factores más influyentes sobre el acabado superficial, el consumo energético, la morfología de la viruta y la precisión dimensional. Además, el análisis determinó que la profundidad de corte es el parámetro más crítico en cuanto a la precisión dimensional.

Bjerke et al. [27], analizaron el comportamiento del desgaste en herramientas de nitruro cúbico de boro policristalino (pcBN) al torner acero inoxidable martensítico 17-4 PH en condición endurecida (HRC 46) a velocidades de corte entre 200 y 600 m/min. Observaron que, si bien el desgaste de flanco está presente en todo el rango de velocidades, los mecanismos de desgaste varían según la velocidad: a bajas velocidades predomina el

desgaste adhesivo, mientras que a velocidades más altas se incrementan los efectos de difusión y oxidación. Además, el recubrimiento (Ti,Al)N no mejora significativamente la vida útil de la herramienta en este rango, aunque sí reduce el desgaste adhesivo prematuro. En general, las herramientas de pcBN demostraron un desempeño superior al de los carburos cementados, permitiendo mayor velocidad de maquinado y mayor vida útil sin necesidad de tratamientos térmicos posteriores.

En conjunto, los estudios revisados demuestran que la maquinabilidad de los aceros inoxidable martensíticos está fuertemente condicionada por la interacción entre la composición química del material, su microestructura, el tipo de herramienta de corte y las condiciones de mecanizado. Desde una perspectiva de manufactura, variables como el desgaste de la herramienta, el acabado superficial, las fuerzas de corte y el consumo energético resultan determinantes para la estabilidad del proceso, la productividad y los costos de producción. Asimismo, se evidencia que estrategias como la selección adecuada de recubrimientos, el uso de materiales avanzados de herramienta y la modificación controlada de la composición química del acero pueden mejorar el comportamiento durante el mecanizado bajo condiciones industriales de alta velocidad.

No obstante, la literatura se concentra en aceros inoxidable martensíticos convencionales o de alto contenido de carbono, así como en grados aleados mediante elementos tradicionalmente empleados para mejorar la maquinabilidad. Estos materiales presentan propiedades diferentes a los aceros inoxidable martensíticos de bajo carbono aleados con níquel, como el CA6NM [17], los cuales pueden exhibir una microestructura, un nivel de dureza y una respuesta ante el mecanizado diferente. En consecuencia, aunque los estudios existentes proporcionan referencias valiosas sobre tendencias generales y metodologías experimentales, no permiten establecer conclusiones directas sobre el comportamiento en mecanizado de los aceros inoxidable martensíticos de bajo carbono.

En la literatura disponible, la mayoría de los estudios de maquinabilidad se han enfocado en aceros inoxidable martensíticos convencionales generalmente con mayores contenidos de carbono y menor contenido de níquel. En este contexto, se expone la necesidad de realizar estudios orientados específicamente a la evaluación de la maquinabilidad de aceros inoxidable martensíticos de bajo contenido de carbono como el 13Cr-4Ni (CA6NM) y el 16Cr-5Ni. Estos estudios son fundamentales para generar criterios de manufactura confiables que permitan optimizar la selección de herramientas, parámetros de corte y estrategias de producción en aplicaciones industriales donde estos materiales son empleados.

5 Marco teórico

5.1 Aceros inoxidables martensíticos

Los aceros inoxidables martensíticos son aleaciones de hierro y cromo con un contenido de cromo generalmente entre 11% y 18%, y un contenido de carbono que puede variar hasta 1.2%, según la dureza deseada. Esta composición permite que, al calentar la aleación, su estructura cristalina de ferrita se transforme en austenita y durante el enfriamiento, esta austenita se convierta en martensita, una fase de alta dureza [28].

La Figura 2 muestra las características distintivas de la estructura martensítica en los aceros inoxidables. Las placas de martensita emergen desde la superficie del material, representando el cambio en la microestructura asociado al enfriamiento rápido durante el tratamiento térmico. Estas placas son responsables de las propiedades mecánicas como la alta dureza y resistencia al desgaste, pero también pueden aumentar la fragilidad si no se manejan correctamente en procesos de templado [28].

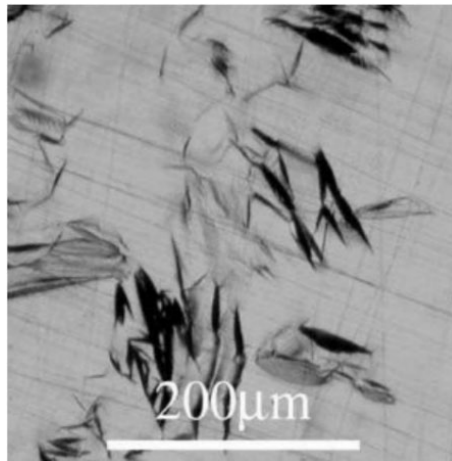


Figura 2 Plaquetas de martensita con morfología acicular y tonalidad oscura, distribuidas dentro de una matriz más clara. Tomado de [28].

Los diagramas de fase hierro-cromo muestran cómo varían las fases del material con cambios en la composición y la temperatura. A continuación, se muestran dos ejemplos con diferente contenido de Cromo (Figura 3) [28].

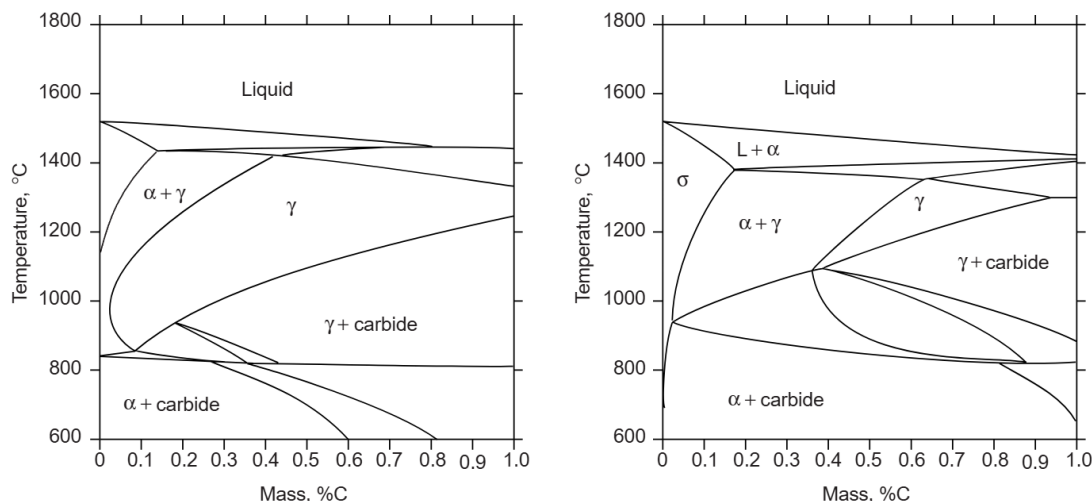


Figura 3 a) Diagrama de fase Hierro-Cromo a 12% Cromo; b) Diagrama de fase Hierro-Cromo a 17% Cromo. Tomado de [28].

En ambos diagramas (Figura 3) se observa que a temperaturas bajas la fase estable más amplia es una mezcla de ferrita (α) y carburos, lo que confirma que la martensita no es una fase de equilibrio y, por tanto, no aparece representada. Al comparar ambos diagramas, al aumentar el contenido de cromo, la región en la que puede existir austenita (γ) se reduce significativamente, tanto en términos de temperatura como de composición. Esta disminución en el campo de estabilidad de la austenita implica que resulta más difícil formar completamente esta fase durante el calentamiento previo al enfriamiento rápido. Sin la presencia de otros elementos aleantes como el níquel, la estabilidad y formación de la austenita en aceros con alto contenido de cromo sería más limitada, el níquel amplía tanto el rango de temperaturas como los niveles de cromo en los que la austenita es estable, permitiendo así su formación y la posterior transformación martensítica [28].

En la Figura 4 se presenta el diagrama ternario Fe–Cr–Ni a 750 °C, que ilustra la estabilidad termodinámica de las fases ferrita (α) y austenita (γ). Según sus composiciones químicas, los aceros 13Cr–4Ni y 16Cr–5Ni se encuentran dentro del campo de estabilidad de la ferrita (α); además, el diagrama confirma que, a medida que aumenta el contenido de níquel, la formación de la fase austenítica (γ) se facilita [29].

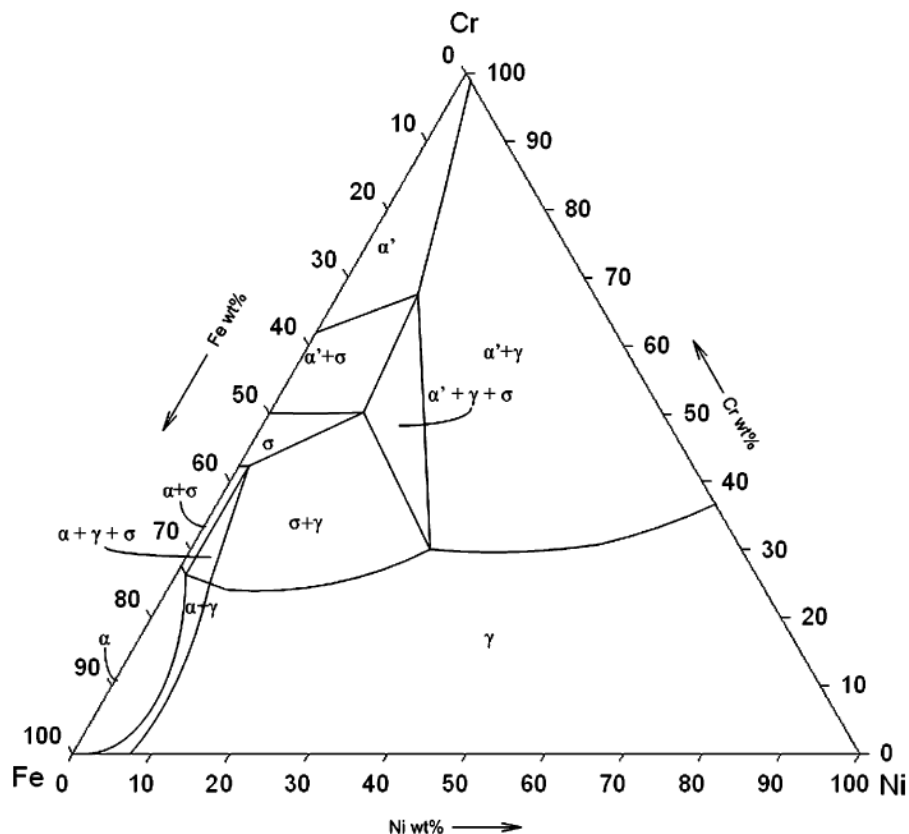


Figura 4 Diagrama ternario Fe–Cr–Ni a 750 °C que muestra la influencia del níquel en la estabilidad de la fase austenítica según la composición. Tomado de [29].

La transformación de austenita a martensita (α') en los casos del 13Cr–4Ni y 16Cr–5Ni corresponde a una reacción no difusional, en la que la fase austenítica se transforma en martensita. En la (Figura 5), que muestra el diagrama CCT del acero CA6NM, equivalente al 13Cr–4Ni, se observa que la combinación de cromo, níquel y carbono favorece la formación de una matriz martensítica incluso a tasas de enfriamiento relativamente bajas.

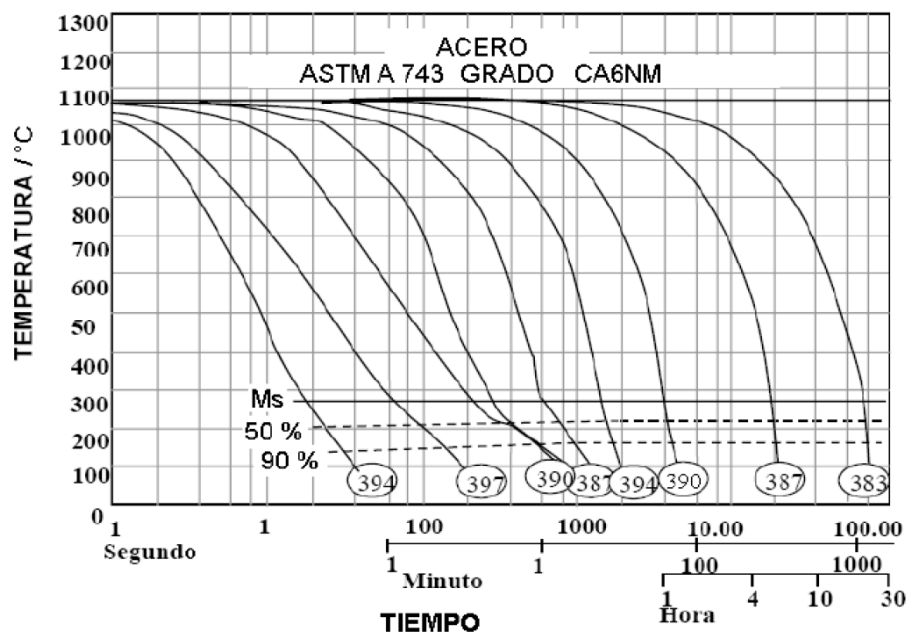


Figura 5 Diagrama CCT del acero 13Cr-4Ni también conocido como CA6NM que evidencia la formación de martensita (α') a diferentes tasas de enfriamiento. Tomado de [30].

5.1.1 Acero 13Cr-4Ni

El acero inoxidable martensítico 13Cr-4Ni designado CA6NM por la norma ASTM A743 [31], es una aleación de fundición que contiene aproximadamente 13% de cromo y 4% de níquel, lo que le otorga una alta resistencia a la corrosión. Este material se utiliza principalmente en aplicaciones donde se requieren buenas propiedades mecánicas, como resistencia a la tracción y dureza, junto con una resistencia razonable a la corrosión. Es comúnmente utilizado en la fabricación de turbinas, válvulas, bombas y componentes para la industria petroquímica y la energía, debido a su capacidad para resistir el desgaste y la fatiga en ambientes corrosivos moderados. Sin embargo, su soldabilidad y ductilidad son limitadas en comparación con aleaciones más avanzadas [28].

Diversos estudios han evaluado el comportamiento del 13Cr-4Ni frente a cavitación, erosión por partícula dura y fatiga, así como el efecto de tratamientos térmicos y termoquímicos sobre su desempeño. Se reporta que tratamientos como el boronizado, la nitruración por plasma, la nitrocarburización y ciclos térmicos de austenitizado, temple y revenido pueden mejorar significativamente su resistencia al desgaste y a la fatiga en comparación con el material sin tratar. En particular, para determinadas condiciones de tratamiento térmico se ha reportado una reducción en la pérdida de material por erosión por partícula dura de hasta un 34 % [32]. Asimismo, en un estudio sobre el boronizado del acero ASTM A743 CA-6NM [18] se indica una reducción en la tasa de erosión por cavitación de hasta un 72 %. Por otro lado, un trabajo que evalúa tratamientos de nitruración por plasma y nitrocarburización en baño de sales [33] reporta incrementos en la resistencia a la fatiga del 74 % y 95 %, respectivamente, en

comparación con el material sin tratar, mientras que la aplicación de un recubrimiento WC-10Co-4Cr muestra una mejora del orden del 27 %.

5.1.2 Acero 16Cr-5Ni

El acero inoxidable martensítico fundido 16Cr-5Ni de bajo contenido de carbono fue desarrollado como una alternativa mejorada del CA6NM (13Cr-4Ni). Presenta mayor resistencia a la corrosión y mayor ductilidad con menor susceptibilidad a la formación de grietas por endurecimiento y buena soldabilidad con mejor comportamiento frente a la fatiga y corrosión en comparación con el CA6NM. Se caracteriza por una fracción significativa de austenita retenida, lo que contribuye a su tenacidad. Puede someterse a envejecimiento térmico para ajustar sus propiedades. Este material es utilizado en sectores como la ingeniería costa afuera (*offshore*), la industria química, la generación de energía y la construcción de componentes como turbinas, bombas y propelas [34].

En un estudio reciente se ha evaluado el comportamiento frente a cavitación y erosión por partícula dura de aceros inoxidables martensíticos 13Cr-4Ni (CA-6NM) y 16Cr-5Ni [15]. El CA-6NM se emplea como material de referencia, mientras que el acero 16Cr-5Ni se analiza bajo diferentes condiciones de envejecimiento. Los resultados reportados indican que el acero 16Cr-5Ni presenta una resistencia a la cavitación superior a la del CA-6NM en todas las condiciones evaluadas, correspondientes a tratamientos de envejecimiento a 475 °C, 550 °C y 625 °C, y que el comportamiento frente a erosión por partículas duras es comparable entre ambos materiales para las condiciones de envejecimiento de 475 °C y 550 °C, mientras que a 625 °C se reporta un incremento en la tasa de desgaste. En conjunto, estos resultados evidencian el potencial del acero 16Cr-5Ni como material alternativo al CA-6NM en componentes de turbinas hidráulicas, especialmente en aplicaciones donde la cavitación constituye el principal mecanismo de deterioro.

5.2 Proceso de torneado

El torneado es un proceso de mecanizado que consiste en la eliminación de material de una pieza en rotación mediante el avance de una herramienta de corte. En este proceso, la pieza de trabajo realiza el movimiento principal de giro, mientras que la herramienta lleva a cabo el movimiento de avance. Este principio permite mecanizar tanto superficies externas como internas [35].

5.2.1 Parámetros de corte

5.2.1.1 Velocidad de corte

En el cilindrado, la velocidad de corte se refiere a la rapidez con la que la superficie de la pieza pasa por el filo de la herramienta, medida en metros por minuto (m/min). Para propósitos generales en aceros inoxidables, las velocidades de corte recomendadas oscilan entre 85 y 215 m/min (275–700 pies/min). En procesos de acabado, estas velocidades pueden variar entre 55 y 290 m/min (175–950 pies/min [4].

5.2.1.2 Avance

El avance en el cilindrado representa el desplazamiento axial de la herramienta por cada revolución de la pieza, expresado en milímetros por revolución (mm/rev). Para mecanizado general de aceros inoxidables, se recomienda un avance de 0.35 mm/rev (0.014 pulgadas/rev). En aplicaciones de acabado, los valores típicos oscilan entre 0.08 y 0.75 mm/rev (0.003–0.03 pulgadas/rev), lo que permite mejorar la calidad de la superficie y minimizar defectos en la pieza final [4].

5.2.1.3 Profundidad de corte (DOC)

La profundidad de corte indica el espesor del material retirado en sentido radial durante el mecanizado. En trabajos generales con aceros inoxidables, se recomienda una profundidad de corte entre 1.5 y 4.4 mm (0.06–0.175 pulgadas) [4].

5.2.2 Herramientas de corte para aceros inoxidables

En el ámbito del maquinado, la norma ISO 513 [36], clasifica los materiales en seis grupos principales según sus propiedades de maquinabilidad. Cada grupo presenta desafíos específicos que influyen directamente en la elección de herramientas de corte y parámetros de proceso [36]. Estos grupos son:

P: Aceros

M: Aceros inoxidables

K: Fundición

N: Metales no ferrosos como aluminio y cobre

S: Aleaciones resistentes al calor y superaleaciones

H: Aceros endurecidos

El grupo ISO M, enfocado en los aceros inoxidables, se caracteriza por propiedades que generan condiciones de corte complejas durante el mecanizado. Estos materiales presentan alta tenacidad, baja conductividad térmica y una marcada tendencia al endurecimiento por deformación, lo que provoca que los filos de corte estén expuestos a altas temperaturas, desgaste por entalladura en las zonas de contacto y formación de filo recocado, afectando la calidad superficial y reduciendo la vida útil de la herramienta. Además, la adherencia del material a la herramienta es frecuente, lo que incrementa el riesgo de fallas prematuras en el proceso.

Dado este comportamiento, la elección de la herramienta de corte para materiales ISO M es fundamental, siendo lo ideal seleccionar herramientas específicamente diseñadas para aceros inoxidables, lo cual debe estar claramente indicado por el fabricante. Estas herramientas suelen incorporar geometrías especiales con ángulos de desprendimiento optimizados para reducir la fricción, recubrimientos avanzados como el nitrato de titanio y aluminio (TiAlN) o los aplicados mediante deposición física en fase de vapor (PVD) que mejoran la resistencia

térmica y disminuyen la adhesión del material, así como calidades de carburo de alta tenacidad capaces de soportar cargas intermitentes y minimizar el desgaste.

5.2.2.1 Geometría y posicionamiento de la herramienta de corte

La geometría básica de una herramienta de corte (Figura 6) son las siguientes: el filo principal (*tool major cutting edge*) es el borde principal encargado del corte del material; el filo secundario (*tool minor cutting edge*) actúa en la zona lateral de contacto; el radio de punta (*nose radius*) conecta ambos filos y su tamaño influye directamente en la resistencia de la herramienta, la calidad del acabado superficial y la estabilidad del proceso de mecanizado; la cara de ataque (*rake face*) es la superficie por la cual se evacua la viruta, y el flanco principal (*flank face*) es la superficie de la herramienta que sigue al filo principal y queda orientada hacia la superficie ya mecanizada de la pieza [37].

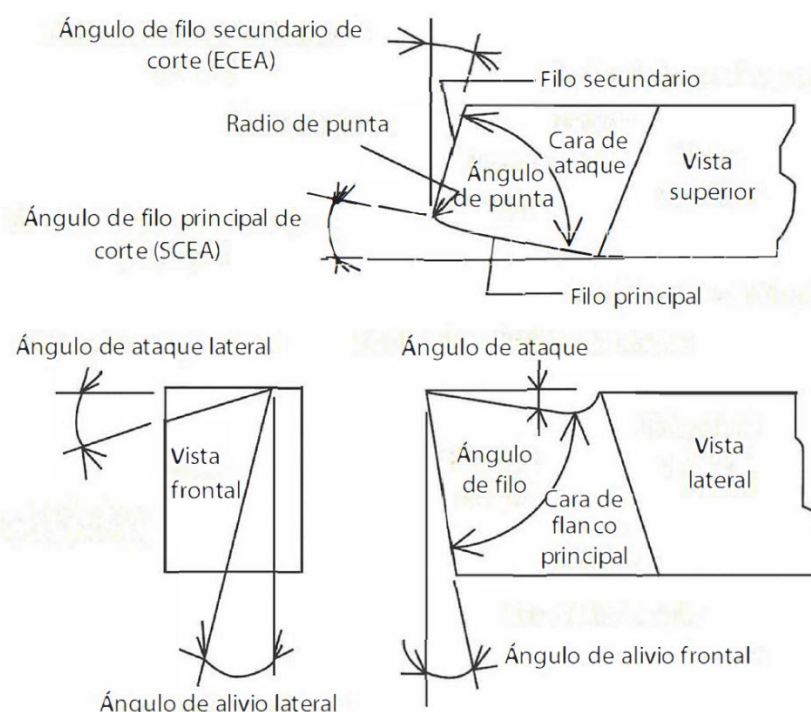


Figura 6 Geometría de una herramienta de corte en torneado con los principales ángulos y filos en tres vistas: superior, frontal y lateral. Editado de [38].

Aumentar el radio de punta mejora el acabado superficial y refuerza la resistencia del filo principal de corte, además de reducir el desgaste en el flanco. Sin embargo, un radio excesivo puede incrementar la resistencia al corte, generar vibraciones no deseadas y dificultar el control de la viruta [39].

El ángulo de ataque: (*back rake angle*) es el ángulo que forma la cara de ataque de la herramienta con respecto a una línea perpendicular a la superficie de corte. Este ángulo, representado por λ (Figura 7), influye directamente en la formación de la viruta, el esfuerzo de corte y el flujo del material [40].

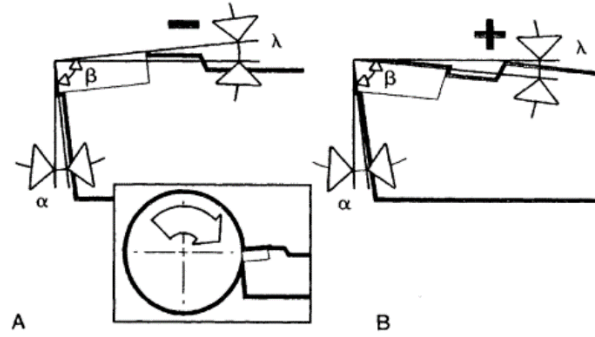


Figura 7 Representación de los ángulos de ataque en una herramienta de torneado desde una vista lateral. En A, la herramienta presenta un ángulo de ataque negativo (-), y en B, un ángulo de ataque positivo (+). Tomado de [37]

Los ángulos de ataque positivos (Figura 7 B) hacen que la herramienta sea más afilada y puntiaguda, lo que reduce su resistencia y puede causar desgaste o fracturas en la punta. Disminuyen las fuerzas de corte y el consumo de energía, favorecen la formación de virutas continuas en materiales dúctiles y ayudan a evitar la formación de rebabas adheridas en la herramienta.

Los ángulos de ataque negativos (Figura 7 A) aumentan la resistencia del filo de corte, volviendo la herramienta más robusta pero menos afilada. Se incrementan las fuerzas de corte, el consumo de energía y la fricción, lo que eleva la temperatura durante el mecanizado. A pesar de estos efectos, pueden contribuir a mejorar el acabado superficial.

Los ángulos de ataque neutros (0°) representan un equilibrio entre los ángulos positivos y negativos. Ofrecen una combinación moderada de resistencia y eficiencia en el corte, siendo adecuados para materiales de dureza intermedia o procesos donde se busca estabilidad sin comprometer demasiado el filo de la herramienta [37].

Ángulo de avance: el ángulo de avance (*lead angle*), afecta la magnitud de la fuerza de corte axial, la fuerza radial y el espesor de la viruta (Figura 8).

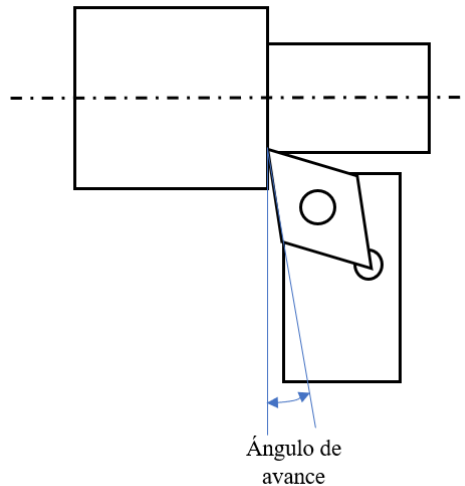


Figura 8 Vista superior del proceso de torneado, mostrando el ángulo de avance, definido como el ángulo entre la dirección del avance de la herramienta y el filo principal de corte.

Un mayor ángulo de avance incrementa la longitud de contacto entre la viruta y la herramienta, lo que reduce el espesor de la viruta. Como consecuencia, la fuerza de corte se distribuye sobre una mayor longitud del filo, lo que puede prolongar la vida útil de la herramienta. Sin embargo, también se incrementa la fuerza radial, lo que puede generar flexiones en piezas delgadas o largas. Además, el control de la viruta se ve afectado, ya que al disminuir su espesor y aumentar su ancho, se dificulta su fragmentación [35].

Se recomienda disminuir este ángulo en piezas delgadas y largas, o cuando la máquina presenta poca rigidez. Por otro lado, aumentar este ángulo es recomendable cuando el proceso de corte genera altas temperaturas, para el desbaste de piezas de gran diámetro o cuando la máquina tiene una estructura rígida y estable [37].

5.2.3 Maquinabilidad

La maquinabilidad se refiere a la facilidad con la que un material puede ser mecanizado y es una medida relativa que depende no solo del material, sino también de las características de la herramienta y las condiciones del proceso de mecanizado [41]. Dado que no existe un método único y universal para evaluarla, los ensayos se centran en distintos aspectos como la vida útil de la herramienta, la fuerza de corte, la calidad del acabado superficial y la morfología de la viruta. Para obtener resultados consistentes, la maquinabilidad se determina mediante ensayos comparativos entre dos o más materiales realizados bajo condiciones controladas [26] [42] [43].

5.2.3.1 Fuerzas de corte

Durante el proceso de cilindrado, la fuerza total que actúa sobre la herramienta puede descomponerse en tres (Figura 9). La fuerza tangencial (F_c) se orienta a lo largo del eje y es la más significativa, ya que representa el esfuerzo principal requerido para cortar el material. La fuerza de avance (F_f) actúa en la dirección del avance de la herramienta, paralela

a la pieza de trabajo, es decir, sobre el eje z . Por último, la fuerza radial (F_p) se dirige a lo largo del eje x , apuntando hacia el centro de la pieza. Aunque suele ser la menor, esta última puede afectar la estabilidad de la herramienta y el acabado superficial [35].

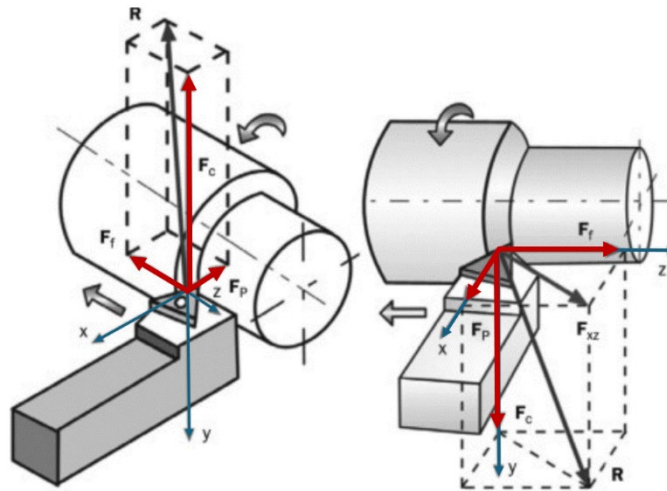


Figura 9 Fuerzas de corte en un proceso de cilindrado. Se muestran las tres componentes principales de la fuerza de corte: F_c (fuerza tangencial), F_f (fuerza de avance) y F_p (fuerza radial), así como su resultante R , que representa la carga total ejercida sobre la herramienta durante el mecanizado. Editado de [35].

5.2.3.1.1 Dinamómetro para torno

Es un dispositivo capaz de medir fuerzas de corte en los procesos de maquinado, puede ser mecánico, piezoeléctrico o basado en galgas extensiométricas, su uso es común en investigación, desarrollo de herramientas y optimización de parámetros de corte [44].

5.2.3.2 Rugosidad superficial

La rugosidad superficial hace referencia a las irregularidades en la superficie de cualquier componente manufacturado [4]. Su importancia radica en que puede influir significativamente en el comportamiento de la pieza en distintos entornos. Afecta la fricción, ya que las irregularidades superficiales generan mayor resistencia al movimiento entre superficies en contacto, lo que a su vez puede influir directamente en el desgaste [45]. También tiene un impacto en la interacción con la luz, alterando su capacidad para reflejar o absorber radiación, aspecto crucial en aplicaciones ópticas y térmicas [46].

Además, la rugosidad influye en la resistencia a la corrosión: superficies más rugosas tienden a retener contaminantes y humedad, acelerando el deterioro, mientras que acabados más lisos reducen el área expuesta a agentes corrosivos. Otro aspecto relevante es su efecto en la adherencia de recubrimientos: una superficie excesivamente lisa puede dificultar la fijación de pinturas o películas protectoras [46].

En campos como la biomedicina y la aeroespacial, la rugosidad también desempeña un papel crucial. Puede afectar la biocompatibilidad de los implantes o modificar la aerodinámica de componentes sometidos a flujos de aire o fluidos [46].

5.2.3.2.1 Medidas de rugosidad

Los parámetros que se miden para describir la rugosidad superficial son los siguientes:

Ra (rugosidad media aritmética): representa el promedio de los valores absolutos de las desviaciones del perfil respecto a la línea media de la superficie [47].

Ry (rugosidad máxima del perfil): también conocido como altura máxima del perfil, mide la distancia vertical entre el pico más alto y el valle más profundo dentro de una longitud de evaluación específica.

Rz (altura media de los picos a los valles): determina la diferencia entre el pico más alto y el valle más profundo dentro de una longitud de evaluación específica. A diferencia de Ry, Rz suele calcularse como el promedio de las diferencias en cinco secciones de la superficie evaluada, proporcionando una medida más representativa del relieve de la rugosidad.

Rq (raíz cuadrática media de la rugosidad): similar a Ra, pero basada en el cuadrado de las desviaciones en lugar de los valores absolutos. Esto significa que Rq otorga mayor peso a las irregularidades más pronunciadas, por lo que es útil en aplicaciones donde se desea un mayor control sobre los picos extremos de la superficie.

Estos parámetros se expresan en micrómetros (μm) y se utilizan para clasificar la calidad de una superficie según su proceso de fabricación. Para contextualizar los valores típicos de rugosidad media (Ra) que pueden obtenerse con distintos métodos de manufactura, se presenta los rangos comunes y menos frecuentes de Ra asociados a cada método (Figura 10). En los procesos de torneado la rugosidad media aritmética se encuentra en un rango entre 0.4 y 6.3 μm .

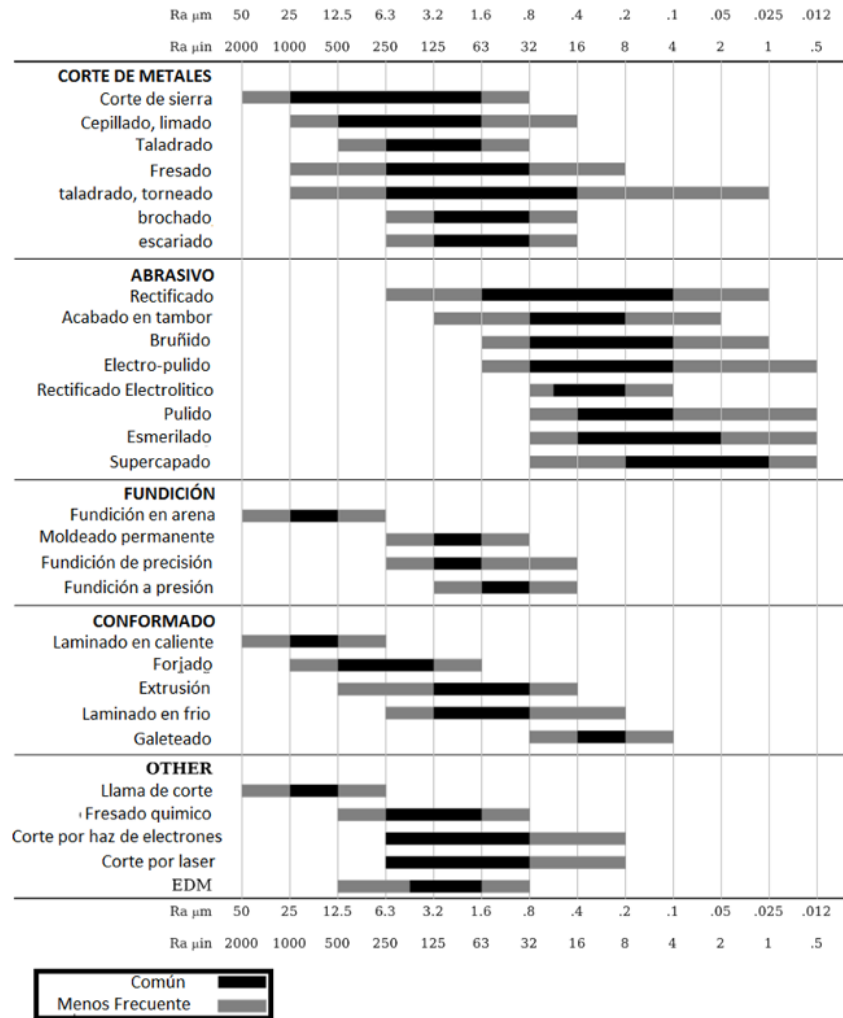


Figura 10 Rugosidad superficial en μm para diferentes procesos de manufactura [48].

Ra teórico en procesos de torneado

Desde un punto de vista teórico, la rugosidad superficial generada en procesos de torneado puede estimarse mediante un modelo geométrico que relaciona el avance por revolución f y el radio de punta de la herramienta r_n . Donde la rugosidad teórica, denominada rugosidad geométrica Ra_g , se calcula mediante:

$$Ra_g = \frac{0.0321f^2}{r_n} \quad (1)$$

Esta expresión supone una herramienta en condiciones ideales de corte y un proceso estable, por lo que no se considera la influencia de vibraciones, deformación plástica ni los mecanismos de desgaste que puede tener la herramienta. En consecuencia, el valor de Ra_g representa una estimación idealizada del acabado superficial. De acuerdo con [38], el valor real de la rugosidad promedio obtenida experimentalmente suele situarse en un rango inferior a $2Ra_g$.

5.2.3.3 Desgaste en los procesos de cilindrado

5.2.3.3.1 Mecanismos de desgaste

La adhesión es un mecanismo en el que, debido al contacto directo y la alta presión entre dos superficies como la herramienta de corte y la pieza de trabajo, se produce una transferencia de material de una superficie a la otra. Como resultado, pueden formarse acumulaciones de material en el filo de la herramienta, fenómeno conocido como formación de filo recrecido (*Built-Up Edge*, BUE), y cuando este material se desprende, puede llevar consigo pequeñas partículas de la herramienta, contribuyendo al desgaste de esta. Este tipo de desgaste es común en materiales dúctiles, donde las altas fuerzas de fricción favorecen la transferencia de material entre las superficies en contacto [24].

La abrasión es un mecanismo de desgaste que se produce cuando partículas duras provocan la pérdida de material. Estas partículas pueden provenir del material de la pieza de trabajo, como óxidos, carburos, nitruros y carbonitruros, lo cual puede generar un desgaste por abrasión de dos cuerpos. Cuando fragmentos de la pieza de trabajo se desprenden y quedan libres entre las superficies en contacto, se produce un desgaste por abrasión de tres cuerpos [24].

La difusión es un mecanismo de desgaste que consiste en la transferencia de átomos entre la herramienta y la pieza de trabajo, impulsada principalmente por altas temperaturas y la afinidad química en la interfaz de contacto. Este proceso ocurre a nivel atómico y debilita gradualmente el filo de la herramienta, pudiendo generar cráteres o cavidades en su superficie. Las zonas desgastadas por este mecanismo presentan una superficie lisa cuando se observan al microscopio, ya que el desgaste ocurre a nivel atómico [24]. La zona desgastada por adhesión generalmente presenta una apariencia más rugosa en comparación con el área afectada por el desgaste por difusión, que suele ser más suave debido a su origen a nivel atómico.

5.2.3.3.2 Formas de desgaste en la herramienta

Los principales tipos de desgaste en herramientas de corte incluyen el desgaste de flanco, la craterización, el muescado, el desgaste en el radio de la punta, y la fractura (Figura 11). El desgaste de flanco ocurre en el flanco principal debido a la fricción con la superficie maquinada y las altas temperaturas, lo que genera desgaste adhesivo o abrasivo. La craterización se presenta en la cara de ataque por difusión de átomos entre la herramienta y la viruta, favorecida por la temperatura elevada y la afinidad química, siendo posible reducirla con recubrimientos. El desgaste de la punta compromete la geometría de la herramienta y disminuye la precisión del corte. El muescado aparece como cavidades generadas por impactos o concentraciones de fuerza, mientras que la fractura gruesa corresponde a la rotura de la herramienta por cargas excesivas o fallas del material [4].

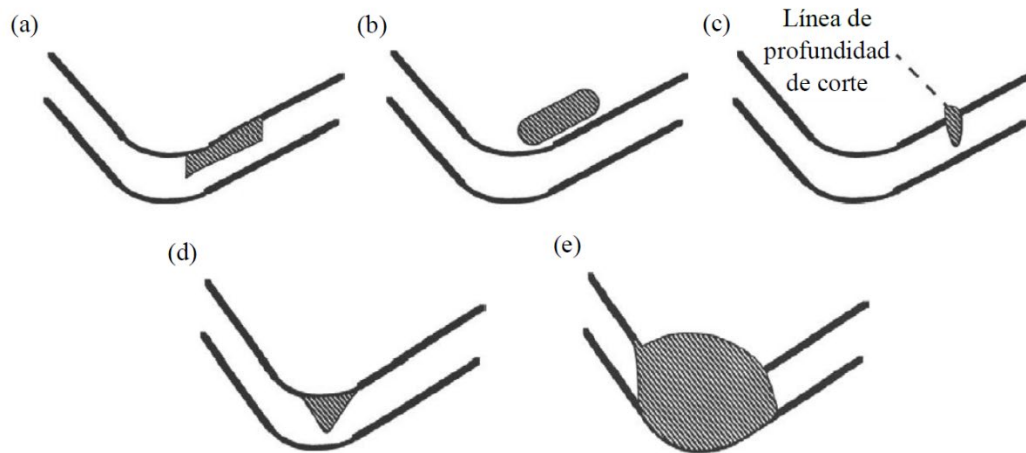


Figura 11 Tipos de desgaste en herramientas de corte: (a) desgaste de flanco; (b) desgaste de cráter; (c) desgaste por muesca; (d) desgaste en el radio de la punta; (e) fractura. Editado de [38].

5.2.3.4 Vida de la herramienta

La vida útil de una herramienta de corte es el período durante el cual esta puede desempeñar su función de manera eficiente y confiable en un proceso de mecanizado. Durante este tiempo, la herramienta debe mantener su capacidad para producir piezas con las dimensiones, el acabado superficial y la calidad requeridos, sin causar daños ni interrupciones excesivas en la producción. Sin embargo, debido a las condiciones de trabajo, como el contacto constante con el material a cortar, la fricción, las altas temperaturas y las fuerzas aplicadas, la herramienta se desgasta progresivamente [49].

Para determinar cuándo una herramienta ha alcanzado el final de su vida útil, se establecen criterios específicos basados en mediciones del desgaste o la aparición de ciertos fenómenos. Estos criterios pueden incluir un desgaste máximo permitido, cambios significativos en la forma de la herramienta, incremento en la temperatura o en las fuerzas de corte, generación de vibraciones o un deterioro del acabado superficial de la pieza. Cuando se cumple alguno de estos criterios, se considera que la herramienta ha llegado al límite de su vida útil y debe ser reemplazada o reacondicionada para evitar daños mayores o pérdida de calidad en la producción [49].

5.2.3.5 Tipo de viruta y la maquinabilidad

En los sistemas de manufactura modernos, donde se avanza hacia operaciones automatizadas sin supervisión humana, el control de la viruta se ha convertido en una necesidad fundamental. Un sistema de maquinado eficiente debe asegurar que las virutas sean pequeñas, para facilitar su manipulación y evacuación, así como regulares y controlables, para evitar interferencias con la herramienta, la máquina y el acabado superficial. Por esta

razón, la capacidad de controlar las virutas se ha vuelto un criterio esencial para evaluar la maquinabilidad de un material [50].

Existen diversos sistemas de clasificación de virutas, los más comunes se basan en el tamaño y forma de estas, mientras que otros más detallados consideran el modo de curvatura, el paso de la espiral y el radio de curvatura. En conjunto, el estudio y control de las virutas permite evaluar de manera más completa la maquinabilidad de un material, facilitando la planificación y optimización de procesos de corte en la manufactura moderna [50].

Los diferentes tipos de viruta que pueden formarse durante el maquinado (Figura 12), destacando su forma característica y longitud. Aunque una viruta continua indica un corte estable, puede ser problemática porque tiende a enredarse, afectando la seguridad y la calidad del proceso. Por esta razón, se utilizan rompe virutas, que son diseños específicos en la herramienta que fragmentan la viruta en pedazos más pequeños, facilitando su evacuación, evitando atascos y mejorando la seguridad y el acabado de la pieza [50].

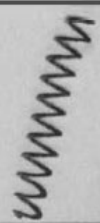
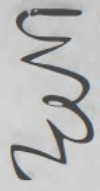
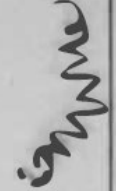
1	2	3	4	5	6	7	8
Viruta tipo cinta	Viruta tubular	Viruta helicoidal cerrada	Viruta helicoidal	Viruta en espiral	Viruta en arco	Viruta fragmentado	Viruta en agujas
							
Corta	Corta	Corta	Corta	Plana	Suelta		
							
Larga	Larga	Larga	Larga	Cónica	Conectada		
							
Enredadas	Enredadas	Enredadas	Enredadas	Corta			

Figura 12 Tipos de viruta generados en el mecanizado según su forma. Editado de [50]

5.2.3.6 Influencia de la microestructura sobre la maquinabilidad

La maquinabilidad de los aceros inoxidables martensíticos no es una propiedad fija, sino que puede variar de manera significativa en función de diversos factores. Entre los más relevantes se encuentran la microestructura del material, la cual está estrechamente ligada a la composición química, así como al proceso de manufactura y al tratamiento térmico aplicado [51].

Desde el punto de vista de la composición química, el contenido de níquel juega un papel importante en la estabilidad de la austenita y en la modificación de la microestructura final. En aceros martensíticos inoxidables de bajo carbono, el níquel puede favorecer la presencia de austenita retenida, lo que tiende a reducir la fragilidad de la matriz martensítica y puede actuar como una fase más dúctil [52]. Este efecto puede contribuir a una reducción de las fuerzas de mecanizado y a un desgaste uniforme de la herramienta.

La austenita retenida, cuando está presente en proporciones controladas, puede desempeñar un rol de “buffer” microestructural. Esta fase puede absorber parte de la energía de deformación y retardar la iniciación y propagación de microgrietas [53]. Sin embargo, su efecto sobre la maquinabilidad puede ser desfavorable, ya que cantidades excesivas pueden inducir transformaciones por deformación que aumentan el endurecimiento durante el mecanizado.

El contenido de carbono también tiene una influencia directa sobre la maquinabilidad. A mayores contenidos de carbono, se incrementa la dureza y la resistencia del acero debido a la formación de una martensita más dura y a la posible presencia de carburos, lo que generalmente deteriora a la herramienta de corte. Por el contrario, en aceros martensíticos de bajo carbono, la reducción de la dureza y de la fracción de carburos suele traducirse en un comportamiento más favorable durante el mecanizado [51].

Desde la perspectiva de los procesos de manufactura y del tratamiento térmico, parámetros como la dureza del material, la fracción de martensita, la distribución de fases y el tamaño de los paquetes o lamelas martensíticas influyen de manera decisiva en la respuesta del material al corte. Tratamientos térmicos que conducen a microestructuras más finas y homogéneas suelen mejorar la estabilidad del proceso de mecanizado, mientras que microestructuras gruesas o heterogéneas pueden aumentar la variabilidad en las fuerzas de corte y el desgaste de la herramienta [51].

Considerando que pequeñas variaciones en la composición química y en el tratamiento térmico pueden dar lugar a microestructuras significativamente distintas, los ensayos experimentales de maquinabilidad resultan fundamentales para evaluar de manera objetiva el desempeño del material bajo condiciones específicas de mecanizado.

6 Metodología

6.1 Barras de acero inoxidable

Para la realización de los ensayos se utilizaron barras fundidas de aproximadamente 25 mm de diámetro. La composición química de las barras (Tabla 1).

Tabla 1 Composición química probetas de prueba (porcentaje de peso wt. %).

Material	C	Cr	Ni	Mn	Si	P	S	Mo
13Cr-4Ni	0.03	12.97	3.57	0.57	0.34	0.02	0.01	0.55
16Cr-5Ni	0.05	15.59	5.54	0.45	-	0.03	0.01	0.10

Los materiales se emplearon en su condición de fundición sin someterlos a un tratamiento térmico, ya que, según recomendaciones de la norma ISO 3685, el proceso de maquinado para pruebas de desgaste debe planificarse considerando la cantidad de material a remover y el desgaste significativo que debe generarse entre cada ensayo, utilizar los dos materiales en este estado permite tener un desgaste significativo y disminuye el material total utilizado. Realizar un tratamiento térmico previo habría implicado un consumo adicional de material y recursos energéticos, incrementando el costo y la complejidad de las pruebas. Por esta razón, la evaluación de tratamientos térmicos no hizo parte del alcance de este trabajo y se plantea como un estudio independiente a futuro, orientado a analizar cómo diferentes tratamientos térmicos podrían mejorar la maquinabilidad de los aceros inoxidables evaluados.

Previo a la realización de las pruebas, se llevó a cabo un cilindrado inicial de las barras con el propósito de eliminar imperfecciones superficiales que pudieran introducir ruido en la medición de las fuerzas de corte. Tras este proceso, las barras quedaron con un diámetro de $19 \pm 0,5$ mm. La condición superficial resultante corresponde a un acabado de torneado, sin la aplicación de procesos adicionales de pulido o rectificado.

6.2 Metalografía y dureza

Como parte de la caracterización de los materiales, se realizó un análisis metalográfico de los aceros inoxidables martensíticos 13Cr-4Ni y 16Cr-5Ni. Las probetas fueron preparadas mediante un proceso de lijado y pulido con alúmina de $0.3\mu\text{m}$, seguido de un ataque químico con reactivo Vilella. Las observaciones se realizaron utilizando un microscopio óptico *Advanced optical (Advanced Instruments S.A.S)*.

Las microestructuras observadas (Figura 13 A y B) presentan características similares a las descritas en la literatura para aceros inoxidables martensíticos. De acuerdo con estos estudios, este tipo de aceros está constituido principalmente por martensita de tipo lámina, dispuesta en paquetes con distintas orientaciones cristalográficas [54] [55].

Asimismo, la literatura señala la presencia de ferrita delta (δ) con morfología laminar o en forma de islas, la cual puede localizarse tanto en los límites como en el interior de los granos previos de austenita. También se ha reportado la existencia de pequeñas fracciones de

austenita retenida (γ) en zonas enriquecidas en níquel, ubicadas preferentemente en los límites de los paquetes martensíticos [55].

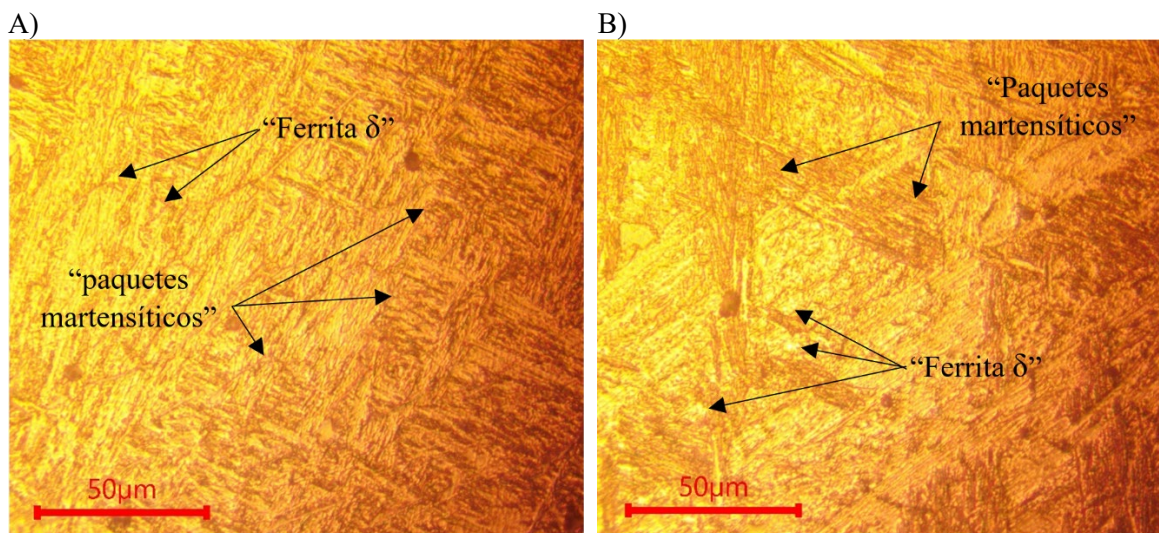


Figura 13 Microestructuras obtenidas mediante ataque con reactivo Vilella: A) acero inoxidable 13Cr-4Ni, B) acero inoxidable 16Cr-5Ni.

La dureza Vickers de los aceros inoxidables 13Cr-4Ni y 16Cr-5Ni se determinó en las secciones transversales de las barras fundidas utilizando un macrodurómetro marca TIME, modelo TH721. Se aplicó una carga de 49.03N durante 15 segundos para cada indentación, realizando un total de ocho mediciones por material. El acero inoxidable 16Cr-5Ni presentó una dureza promedio de 459 ± 19 HV, mientras que el 13Cr-4Ni presentó un valor promedio de 344 ± 16 HV.

6.3 Insertos, porta-insertos y Torno CNC

Para las pruebas se utilizó un inserto de uso general, un portainsertos compatible y un torno CNC, los procesos de cilindrado se realizaron sin refrigerante. Se presentan las referencias comerciales y una breve descripción de sus especificaciones de los elementos que se utilizaron (Tabla 2).

Tabla 2 Información de los insertos, el porta-insertos y el torno CNC.

Inserto:	CNMG 120408-NN
Recubrimiento:	Carburo cementado PVD
Descripción:	Inserto de forma romboidal con un ángulo de punta de 80°, fijado al porta-inserto mediante tornillo y asiento. Tiene una longitud de filo de 12 mm, un espesor de 4.76 mm y un radio de punta de 0.8 mm. Parámetros recomendados para aceros inoxidables: (Vc: 120-210 m/min, f: 0.18-0.32 mm/rev, Ap: 1.0-3.0 mm), Parámetros aceptables de acabado: (f: 0.08 – 0.20 mm/rev, Ap: 0.30 – 1.50 mm)
Portainsertos:	MCLNL 1616H12 Kennametal

Descripción:	Posiciona la herramienta de corte con un ángulo de avance de 5° y un ataque negativo.
Torno:	Leadwell T-5
Descripción:	Control FANUC, sin contrapunto, velocidad máxima 5000 RPM

6.4 Dinamómetro y medidor de deformaciones

El dinamómetro utilizado en este trabajo fue diseñado por Burbano [56] para medir las tres componentes de las fuerzas generadas en procesos de maquinado. Su principio de funcionamiento se basa en la medición de deformaciones mediante galgas extensométricas, estratégicamente ubicadas en elementos deformables de tipo anillo octogonal. Según su diseño, el dinamómetro es capaz de soportar cargas de 3500N (Figura 14).

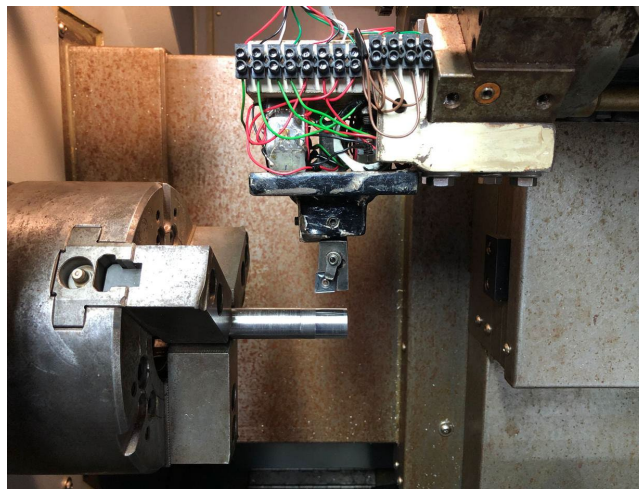


Figura 14 Dinamómetro montado en el torno CNC.

Se emplearon galgas extensiométricas uniaxiales modelo BF350-2AA, con una resistencia de $350.3 \pm 0.1 \Omega$ y un factor de galga de $2.0 \pm 1\%$. La disposición y numeración de las galgas extensiométricas (Figura 15) utilizadas en los tres arreglos de puente completo para la medición de las componentes de fuerza: principal, avance y radial. Para la fuerza principal se emplearon las galgas 1, 2, 3 y 4, configuradas con dos galgas a compresión y dos a tensión. De manera similar, las galgas 5, 6, 7 y 8 se utilizaron para medir la fuerza de avance, también con dos galgas a compresión y dos a tensión. Para la fuerza radial se emplearon las galgas 9 y 10 como activas (a tensión), mientras que las galgas 11 y 12 como pasivas (sin carga). Para la adquisición de datos se utilizó el equipo *Smart Dynamic strain recorder DC-104R* [57] a una frecuencia de muestreo de 500Hz.

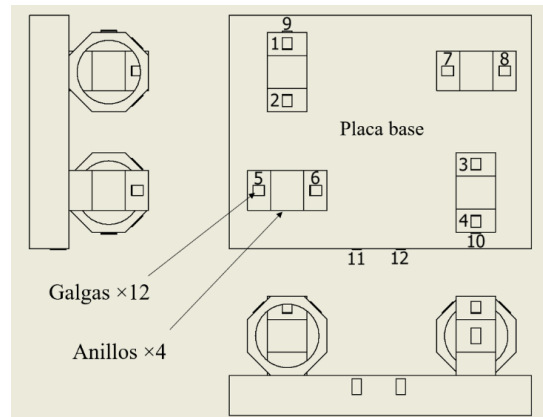


Figura 15 Representación gráfica de la disposición de las galgas en el dinamómetro.

Se realizó la calibración del dinamómetro aplicando fuerzas conocidas en las direcciones axial, tangencial y radial, registrando la respuesta de los arreglos de galgas extensiométricas. El montaje de la calibración (Figura 16) incluye el dinamómetro, un sistema de aplicación de carga mediante discos, y el equipo de adquisición de datos *DC-104R*, encargado de registrar las señales provenientes de las galgas.

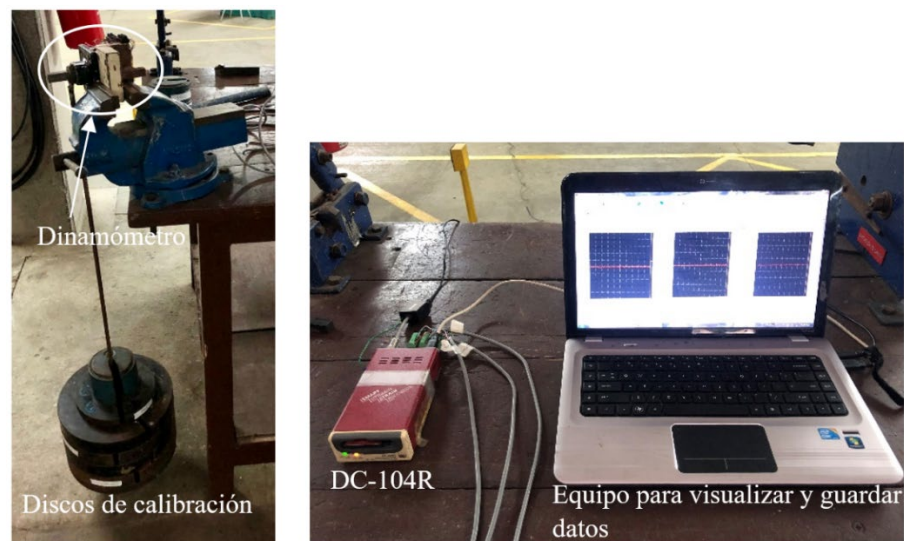


Figura 16 Montaje experimental para la calibración del dinamómetro, mostrando el computador utilizado para la adquisición y registro de datos, el dispositivo DC-104R empleado para la medición de deformaciones, los discos de carga aplicados al dinamómetro y el dinamómetro bajo calibración.

A continuación, se presentan las gráficas de calibración que muestran la respuesta eléctrica registrada en milivoltios frente a la fuerza aplicada (Figura 17, Figura 18 y Figura 19). En la Figura 17 aparecen tres rectas, una por cada dirección de medición. La recta con pendiente más pronunciada corresponde a la componente de fuerza que se está calibrando. Las otras dos rectas presentan pendientes con magnitud despreciable, lo cual indica que la señal inducida en esas direcciones es mínima. Esto confirma una baja sensibilidad cruzada del sistema de galgas y permite asegurar que la señal medida está dominada por la fuerza aplicada en la dirección principal. Las pendientes obtenidas en las Figuras 17, 18 y 19 permiten transformar las señales registradas durante el mecanizado en valores reales de fuerza.

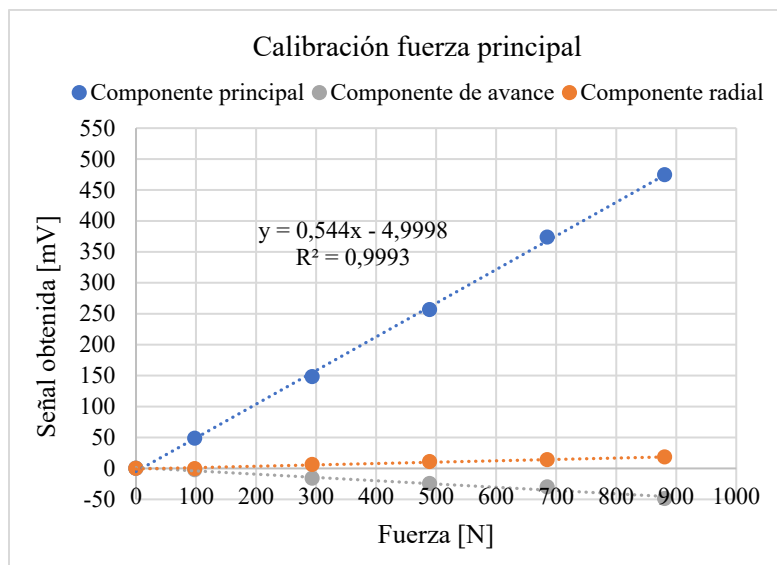


Figura 17 Resultado de calibración para la fuerza tangencial o principal.

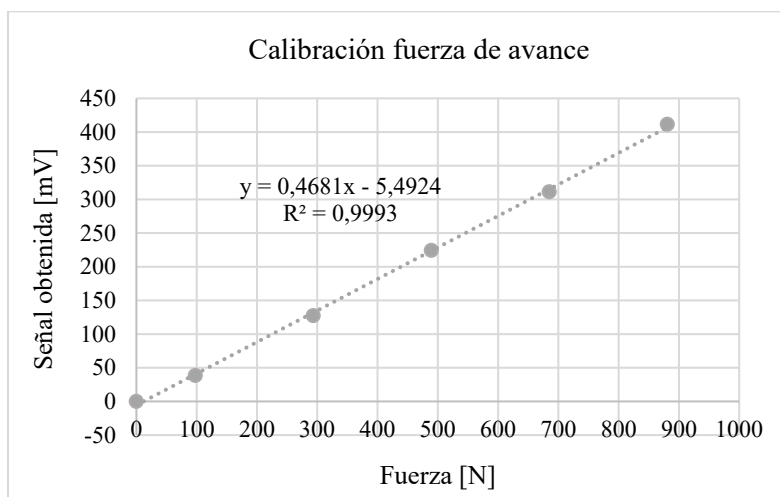


Figura 18 Resultado de calibración para la fuerza axial o de avance.

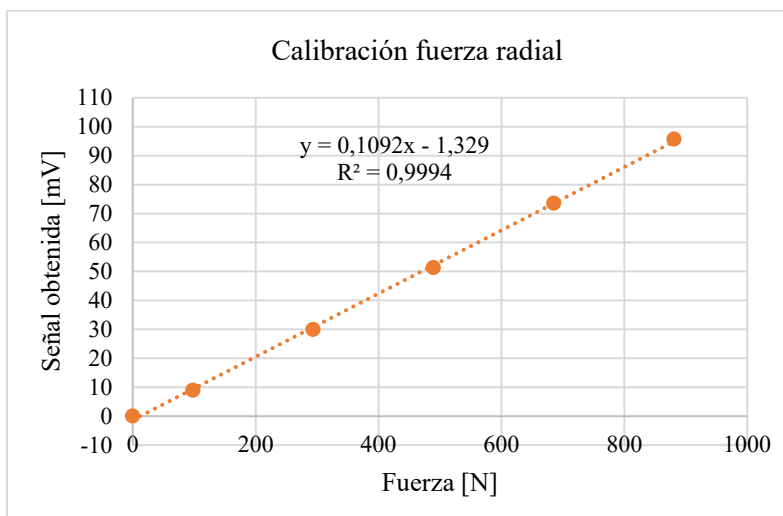


Figura 19 Resultado de calibración para la fuerza radial.

6.5 Rugosidad y desgaste de la herramienta

Para la caracterización general de las piezas y herramientas después del mecanizado, se utilizaron dos equipos principales. La rugosidad superficial se midió con un rugosímetro Mitutoyo SJ-201P [58], configurado con una longitud de muestreo (*cutoff*) de 0.8 mm, una longitud total de evaluación de 4 mm y una velocidad de medición de 0.25 mm/s. Por su parte, el estereoscopio *Advanced Optical Microscope* [59] se empleó para observar y medir el desgaste de las herramientas de corte utilizadas.

6.6 Plan de pruebas y procedimiento

Se diseñó un plan de pruebas que considera como factores el tipo de acero inoxidable empleado y tres velocidades de corte: 120, 145 y 170 m/min (Tabla 3). Durante el mecanizado se mantuvo un avance constante de 0.2 mm/rev y una profundidad de corte de 0.5 mm. Las velocidades seleccionadas se encuentran dentro del rango recomendado por el fabricante de los insertos y coinciden con los valores comúnmente reportados en la literatura para el mecanizado de aceros inoxidables martensíticos [23] [60]. De igual forma, los valores de avance y profundidad de corte fueron definidos con base en referencias, buscando mantener condiciones comparables con estudios similares [24] [61]. Las pruebas se realizaron en un orden aleatorio. La velocidad de corte se mantuvo constante mediante la utilización del código G96 [62], una configuración del control CNC que ajusta automáticamente la velocidad de giro de la pieza, garantizando una velocidad de corte constante durante el mecanizado.

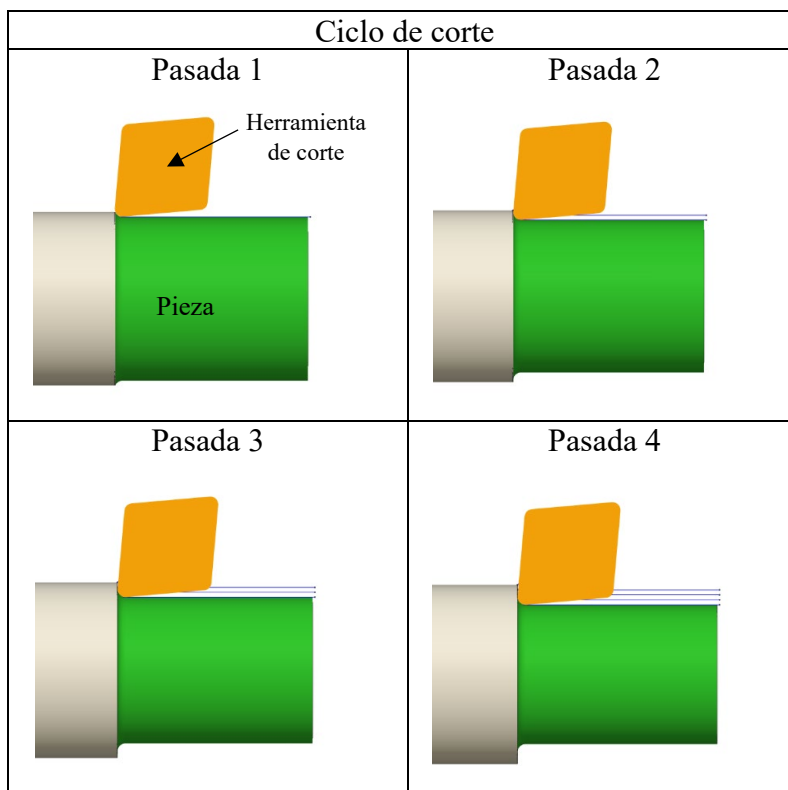
Tabla 3 Plan de pruebas que muestra la combinación de los factores considerados en el desarrollo experimental.

Orden	Acero inoxidable	Velocidad [m/min]
Aleatorio	13Cr-4Ni	120
	13Cr-4Ni	145
	13Cr-4Ni	170
	16Cr-5Ni	120
	16Cr-5Ni	145
	16Cr-5Ni	170

Antes de iniciar las pruebas, se realizó un cilindrado preliminar para eliminar posibles errores de desalineación durante el montaje de la probeta en las mordazas del torno CNC y llevar el diámetro a 18 mm, correspondiente a la condición inicial para la toma de datos.

Para cada combinación de la Tabla 3 se ejecutan ciclos de corte. Los ciclos de corte se pueden definir como procesos de mecanizado compuestos por varias pasadas de la herramienta para producir una pieza [63]. En este estudio, cada ciclo estuvo conformado por cuatro pasadas (Tabla 4), cada una de las cuales abarcó una longitud de 2 cm a lo largo de la probeta y una profundidad de corte de 0.5 mm.

Tabla 4 Ciclo de corte compuesto de cuatro pasadas, hecho con Autodesk Fusion.



El número de repeticiones de los ciclos de corte se limitó por el criterio de vida útil establecido para la herramienta, definido por un desgaste de flanco máximo $VB_{\max} = 0.35$ mm, esto significa que por cada combinación de la Tabla 3 se repiten ciclos de corte hasta alcanzar dicho valor de desgaste; mayor a 0.3 mm teniendo en cuenta la norma ISO 3685 [49] la cual indica que, para materiales distintos a aceros al carbono y hierro fundido el límite de desgaste máximo puede ser ajustado.

Se midieron el desgaste de la herramienta y la rugosidad superficial al finalizar cada ciclo de corte a lo largo de todas las pruebas. Las fuerzas de corte fueron registradas en cada una de las pasadas del primer ciclo, consideradas como las fuerzas del estado inicial de la herramienta, y nuevamente cuando esta superó un desgaste de flanco de 0.35mm, correspondiente al último ciclo de corte de cada condición, consideradas como fuerzas en condición de inserto desgastado.

6.7 Tratamiento estadístico de los datos experimentales

Para las fuerzas de corte, las barras de error incluidas en las gráficas representan la dispersión de los datos expresada mediante la desviación estándar (σ). Esta se calculó con la siguiente expresión:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Donde x_i corresponde al valor medido de cada pasada dentro de un ciclo, $\bar{x}$ es el valor promedio y n el número de mediciones.

Las repeticiones realizadas en la metodología experimental corresponden a ciclos de corte sucesivos sin reemplazo del inserto. Debido a que el desgaste evoluciona durante estos ciclos, las fuerzas medidas presentan una tendencia creciente. En consecuencia, el cálculo de intervalos de confianza asociados a repeticiones independientes no resultaría estadísticamente representativo, ya que las mediciones no provienen de condiciones idénticas sino de un proceso con degradación progresiva de la herramienta.

6.8 Calificación de los criterios

Con el fin de realizar una comparación de los resultados, en este trabajo se estableció una ponderación diferenciada para los criterios empleados: desgaste de la herramienta, fuerzas de corte, rugosidad superficial y morfología de la viruta. La selección de estas variables responde a su uso recurrente en la literatura y a su relevancia directa en términos de costo, calidad y estabilidad del proceso de mecanizado.

El desgaste de la herramienta fue asignado como el criterio de mayor peso (40%), dado que limita directamente la vida de la herramienta, los costos de producción y la estabilidad del proceso y se considera frecuentemente como criterio dominante en la evaluación de la maquinabilidad [43] [64]. Las fuerzas de corte se consideraron el segundo criterio más relevante (30%), ya que están directamente relacionadas con la carga mecánica del sistema y el consumo energético.

La rugosidad superficial y la morfología de la viruta fueron ponderadas con un 15% cada una. El peso asignado a la rugosidad superficial se mantuvo limitado debido a que el proceso de mecanizado no suele constituir la etapa final de fabricación. En componentes industriales, y particularmente en rodetes de turbinas hidráulicas, es habitual la aplicación de procesos posteriores, tales como rectificado y pulido, orientados a mejorar el acabado superficial y el desempeño hidráulico de superficies.

Es importante señalar que los pesos asignados a cada criterio pueden variar dentro de un rango amplio dependiendo de los objetivos específicos del proceso de mecanizado. En contextos donde el costo de producción y la vida de la herramienta son prioritarios, el desgaste de la herramienta y las fuerzas de corte tienden a adquirir mayor relevancia. Por el contrario, en aplicaciones donde la calidad superficial es crítica, la rugosidad superficial

puede recibir un peso superior. Asimismo, consideraciones relacionadas con el tiempo de proceso, la productividad y la seguridad operativa pueden modificar la importancia relativa de la morfología de la viruta. En este sentido, los pesos definidos en el presente estudio representan una ponderación equilibrada orientada a una evaluación comparativa de la maquinabilidad, y no pretenden ser valores universales aplicables a todos los escenarios industriales.

7 Resultados

7.1 Virutas

Se presentan las morfologías de viruta obtenidas para los aceros 13Cr-4Ni y 16Cr-5Ni (Tabla 5) a las tres velocidades de corte evaluadas (120, 145 y 170 m/min). La tabla está organizada en dos columnas que corresponden a cada material, mientras que las filas corresponden a las velocidades empleadas.

Tabla 5 Morfología de las virutas obtenidas en el mecanizado de los aceros 13Cr-4Ni y 16Cr-5Ni a velocidades de 120, 145 y 170 m/min.

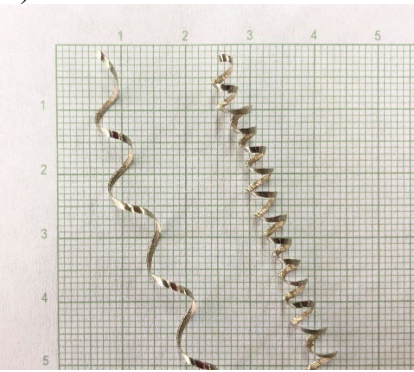
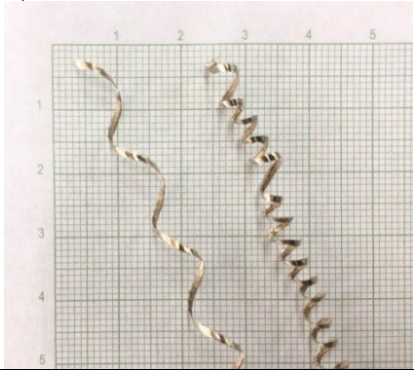
	13Cr-4Ni	16Cr-5Ni
120m/min	A1) 	B1) 
145m/min	A2) 	B2) 
170m/min	A3) 	B3) 



Figura 20 Virutas obtenidas con una herramienta de corte desgastada, material 13Cr-4Ni.

Al maquinar el acero inoxidable 13Cr-4Ni, se observaron virutas largas y helicoidales, de geometría cilíndrica y cónica (Tabla 5 A1–A3). El color predominante fue dorado brillante, el cual se asocia con un proceso de corte adecuado y estable, sin un aumento excesivo de la temperatura. En contraste, las virutas de tonos azules o morados suelen indicar temperaturas elevadas, cercanas a los 500 °C, mientras que las virutas de color oscuro son un signo de desgaste elevado de la herramienta, consecuencia de un incremento excesivo de la temperatura durante el maquinado.

La diferencia principal entre las virutas obtenidas para ambos materiales maquinados radica en su longitud, esta diferencia se atribuye a la mayor dureza del acero 16Cr-5Ni que favoreció la fragmentación de la viruta, dando lugar a virutas más cortas (Tabla 5 B1-B3), en contraste, el acero 13Cr-4Ni, de menor dureza, permitió la formación de virutas helicoidales largas y continuas (Tabla 5 A1-A3).

La imagen A1 hasta la A3 (Tabla 5), se observan dos virutas con geometrías distintas. La viruta ubicada a la izquierda es más alargada y tiene una curvatura más abierta, mientras que la de la derecha es más cerrada y compacta. Ambas corresponden a un mismo ciclo de maquinado, la diferencia en las dimensiones puede atribuirse al contacto variable de la viruta con el rompeviruta. Debido a la longitud, la viruta presenta varios grados de libertad que le permiten moverse de manera no controlada durante el corte. Este movimiento modifica el punto de contacto con el rompeviruta, haciendo que se formen tramos con distinta curvatura incluso dentro de un mismo ciclo de corte. Este fenómeno se observó en las tres velocidades para el acero inoxidable 13Cr-4Ni.

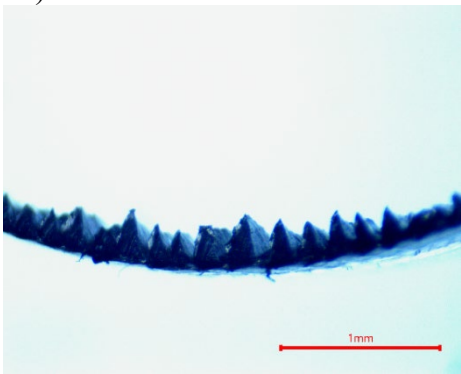
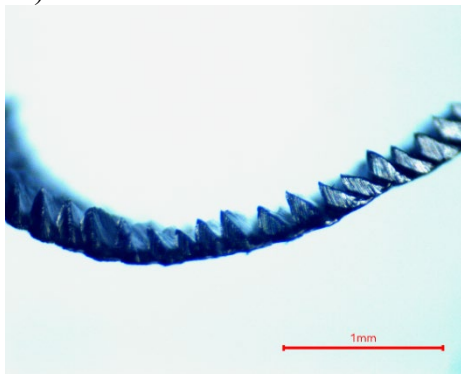
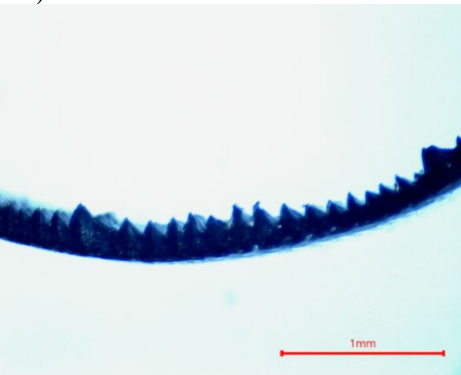
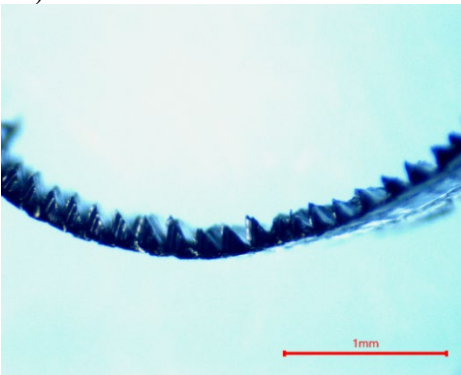
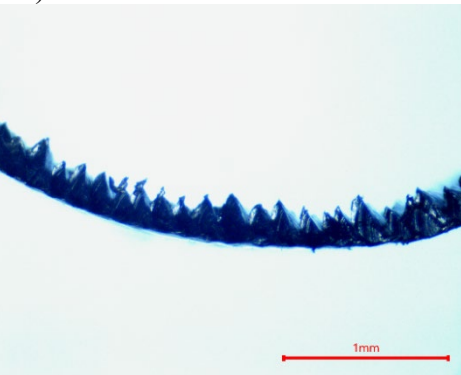
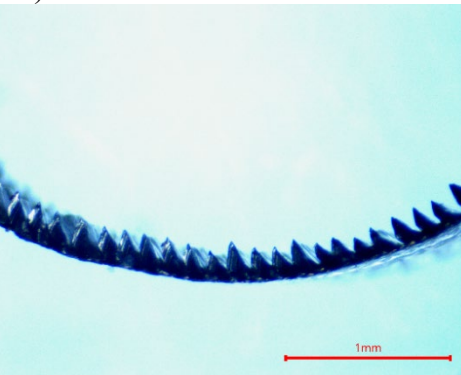
A medida que avanzó el desgaste de la herramienta al maquinar el acero inoxidable 13Cr-4Ni las virutas pasaron de ser helicoidales doradas a virutas más opacas y alargadas (Figura 20), indicando un cambio en las condiciones de fricción y reflejando el deterioro del filo.

Para el caso del 16Cr-5Ni el desgaste de la herramienta produjo un cambio notable en la coloración de las virutas hacia tonos azules y morados (Tabla 5 B3), lo que evidencia un

incremento de la temperatura en la zona de corte. Al mismo tiempo, las virutas se hicieron más pequeñas.

Se presentan imágenes a 50x de la vista lateral de las virutas obtenidas en los aceros 13Cr-4Ni y 16Cr-5Ni (Tabla 6). La disposición de la tabla sigue la misma estructura que en la Tabla 5, con columnas que diferencian cada material y filas que corresponden a las tres velocidades de corte.

Tabla 6 Vista lateral de las virutas (aumento 50x) obtenidas en el mecanizado de los aceros 13Cr-4Ni y 16Cr-5Ni a diferentes velocidades de corte.

	13Cr-4Ni	16Cr-5Ni
120m/min	A1) 	B1) 
145m/min	A2) 	B2) 
170m/min	A3) 	B3) 

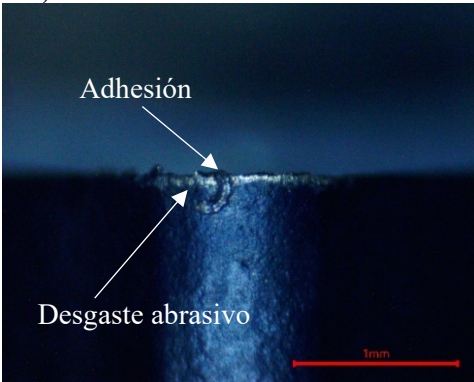
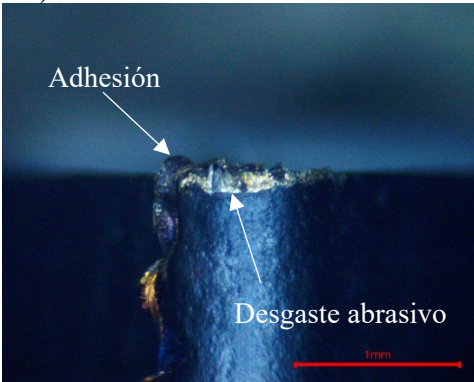
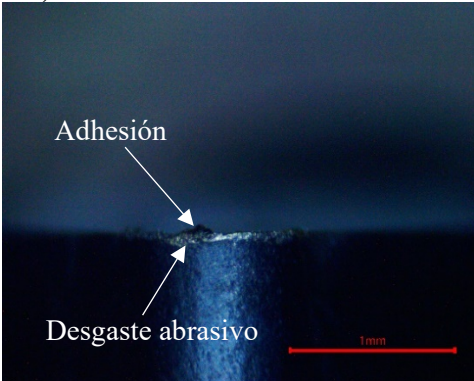
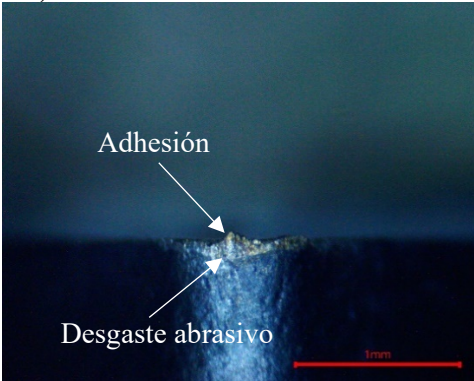
Las virutas obtenidas durante el maquinado de ambos materiales (Tabla 6) presentan una morfología con dientes tipo sierra, característicos de materiales de alta resistencia mecánica y baja difusividad térmica maquinados a altas velocidades de corte [65]. Este comportamiento concuerda con las condiciones utilizadas, ya que ambos aceros inoxidables estudiados presentan elevada resistencia mecánica, tienen baja difusividad térmica y fueron maquinados a velocidades superiores a 100 m/min.

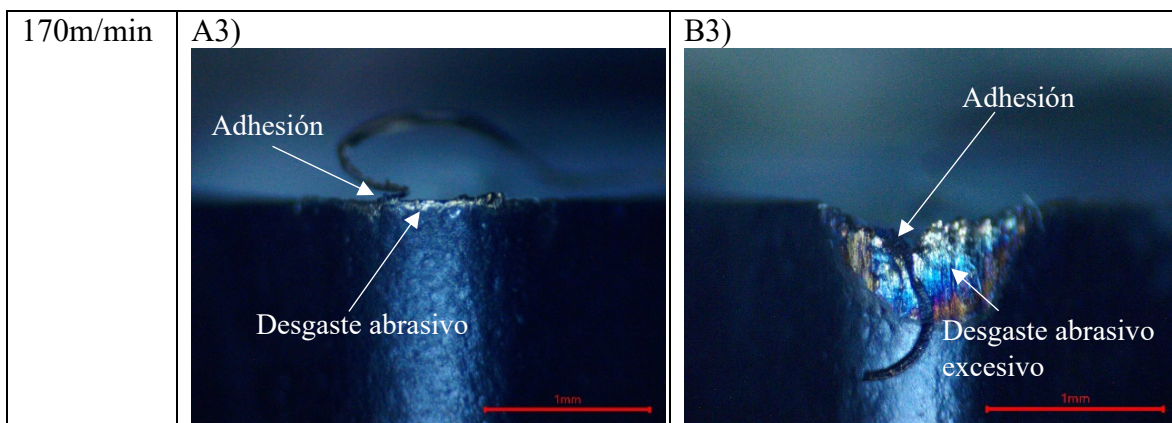
En el caso del acero 13Cr-4Ni (Tabla 6 A), se observa material adherido en los bordes de los dientes y una menor definición en su forma, lo que sugiere una mayor tendencia a la adhesión y una deformación menos controlada durante el corte. En contraste, el acero 16Cr-5Ni (Tabla 6 B), se presenta dientes más definidos y filosos, característicos de una segmentación más limpia de la viruta, coherente con su mayor dureza.

7.2 Desgaste

Se presentan las imágenes correspondientes a la punta de los insertos después de completar un ciclo de maquinado para cada velocidad de corte (Tabla 7).

Tabla 7 Imágenes del desgaste en la punta de los insertos después del primer ciclo para cada velocidad de corte en los aceros 13Cr-4Ni y 16Cr-5Ni.

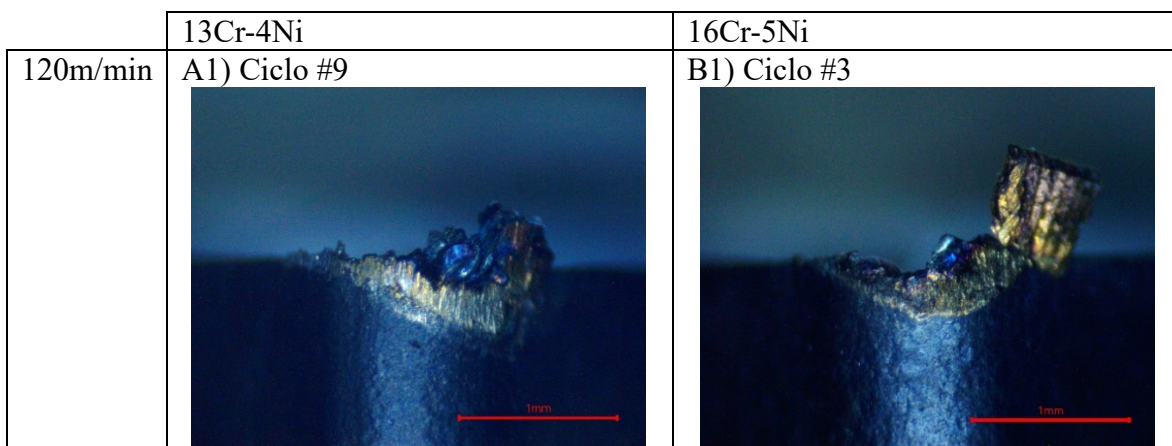
	13Cr-4Ni	16Cr-5Ni
120m/min	A1) 	B1) 
145m/min	A2) 	B2) 

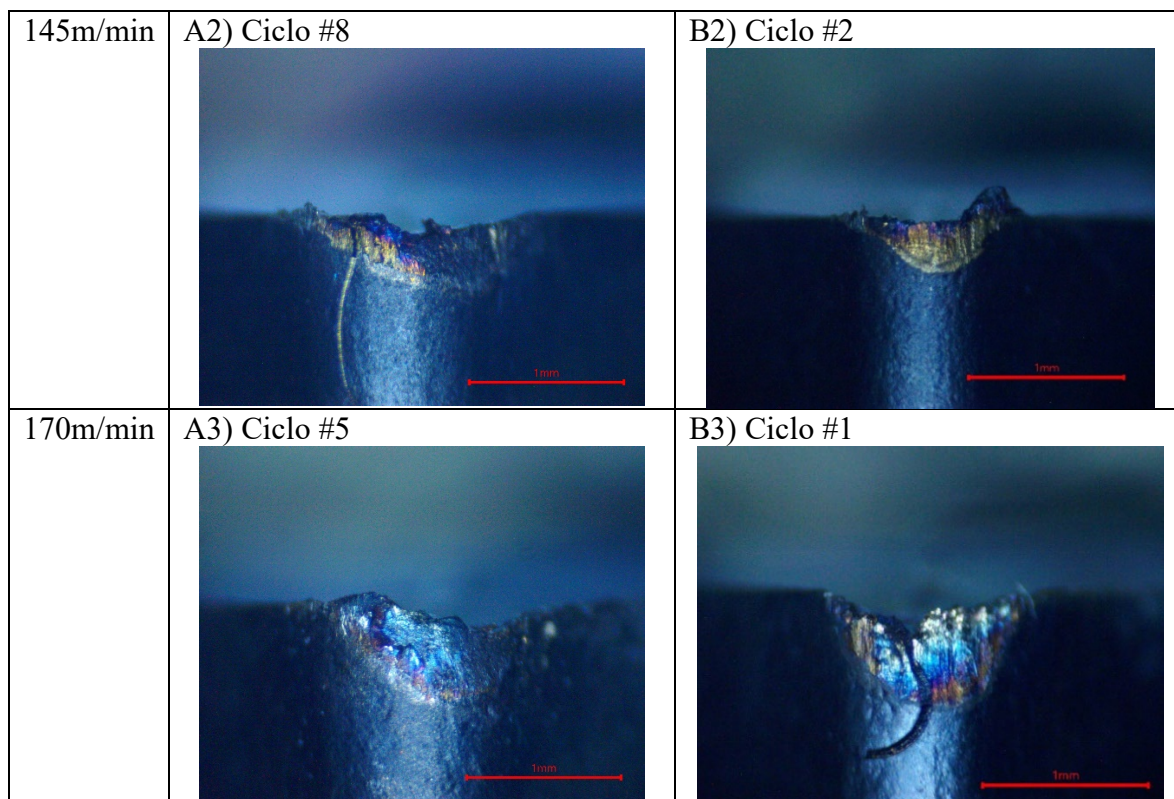


En las imágenes correspondientes al primer ciclo de maquinado se observa que ambos materiales presentan evidencia de adhesión y desgaste abrasivo en las tres velocidades evaluadas. Sin embargo, el acero 16Cr-5Ni muestra un desgaste más pronunciado en comparación con el 13Cr-4Ni, especialmente en la zona del radio de la punta. En particular, en la imagen B3 (Tabla 7), correspondiente al inserto utilizado a 170 m/min en el primer ciclo de maquinado del acero 16Cr-5Ni, se evidencia el mayor nivel de desgaste y se aprecian tonalidades azuladas en la superficie afectada, indicativas de temperaturas elevadas y oxidación local durante el corte, esto sugiere que dicha velocidad de corte genera una afectación considerable sobre el inserto.

Se presentan las imágenes finales de los insertos (Tabla 8), las cuales permiten comparar el desgaste alcanzado en cada material y velocidad de corte. Cada una de las imágenes presentan un desgaste de flanco máximo superior a 0.35 mm.

Tabla 8 Imágenes de los insertos al alcanzar el desgaste máximo para los aceros 13Cr-4Ni y 16Cr-5Ni en las tres velocidades de corte evaluadas (120, 145 y 170 m/min).





En las imágenes correspondientes al estado final de los insertos, tras alcanzar el criterio de vida útil (Tabla 8), se observan tonalidades doradas en todas las superficies de desgaste, indicativas de una exposición prolongada a altas temperaturas durante el mecanizado. Además, se evidencia una marcada adhesión de material de la pieza sobre el filo de corte a la velocidad de 120 m/min en ambos materiales. También se observan tonalidades moradas y azuladas, indicativas de temperaturas elevadas y no deseables durante el proceso de maquinado.

Corrêa et al. [24] reportaron que, al estudiar el mecanizado de aceros martensíticos y supermartensíticos (S41000 y S41426), los mecanismos dominantes eran la abrasión y la difusión para el primero, mientras que para el segundo predominaban la adhesión y la abrasión. En el presente estudio, los aceros 13Cr-4Ni y 16Cr-5Ni mostraron únicamente los mecanismos de abrasión y adhesión, reflejando la interacción típica entre la viruta y el filo bajo las condiciones de corte empleadas.

A continuación, se muestra la evolución del desgaste de la herramienta en función de la cantidad de ciclos realizados en las barras de acero inoxidable 13Cr-4Ni y 16Cr-5Ni (Figura 21).

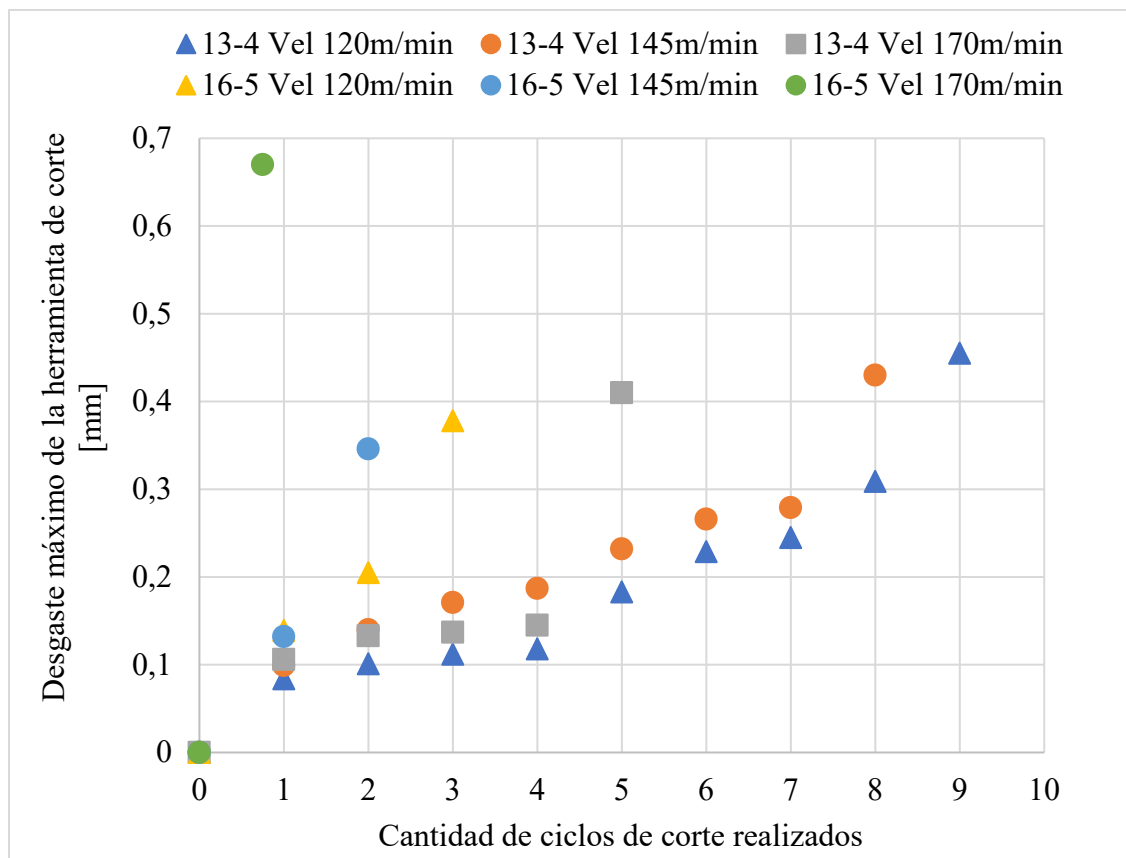


Figura 21 Evolución del desgaste de la herramienta [mm] en función de la cantidad de ciclos realizados en los aceros inoxidables 13Cr-4Ni (13-4) y 16Cr-5Ni (16-5) a diferentes velocidades de corte.

A una velocidad de 120 m/min, la herramienta de corte logró mecanizar el acero inoxidable 13Cr-4Ni durante nueve ciclos, alcanzando un desgaste de 0.45 mm al final de las pruebas. En cambio, al mecanizar el 16Cr-5Ni, la herramienta solo completó tres ciclos, con un desgaste final de 0.38 mm, es decir, es decir, apenas la tercera parte de los ciclos que se pudieron completar al trabajar con el 13Cr-4Ni a 120 m/min.

A una velocidad de 145 m/min, la herramienta de corte logró mecanizar el acero 13Cr-4Ni durante ocho ciclos, alcanzando un desgaste de 0.41 mm al final de las pruebas. En contraste, al mecanizar el 16Cr-5Ni, la herramienta solo alcanzó dos ciclos, con un desgaste final de 0.35 mm, es decir, apenas una cuarta parte de los ciclos alcanzados con el 13Cr-4Ni a 145 m/min.

A la velocidad más alta de 170 m/min, el 13Cr-4Ni permitió completar cinco ciclos con un desgaste final de 0.37 mm, mientras que el 16Cr-5Ni presentó un desgaste acelerado que superó los 0.67 mm antes de completar el primer ciclo de corte.

En las tres velocidades de corte utilizadas, se observa que el desgaste de la herramienta con respecto a los ciclos de corte fue significativamente menor al mecanizar el acero 13Cr-4Ni,

permitiendo completar un mayor número de ciclos antes de alcanzar el desgaste límite de 0.35 mm utilizado como criterio para determinar el fin de vida útil de la herramienta [49].

7.3 Rugosidades

Se presentan los valores promedio de rugosidad (R_a) obtenidos en las superficies maquinadas de los aceros 13Cr-4Ni y 16Cr-5Ni (Figura 22), para las tres velocidades de corte evaluadas. Cada valor corresponde al promedio de las mediciones realizadas a lo largo de todas las pruebas de maquinado, desde el inicio hasta alcanzar el criterio de vida útil de la herramienta, e incluye las barras de error que representan la variabilidad de los resultados en cada condición.

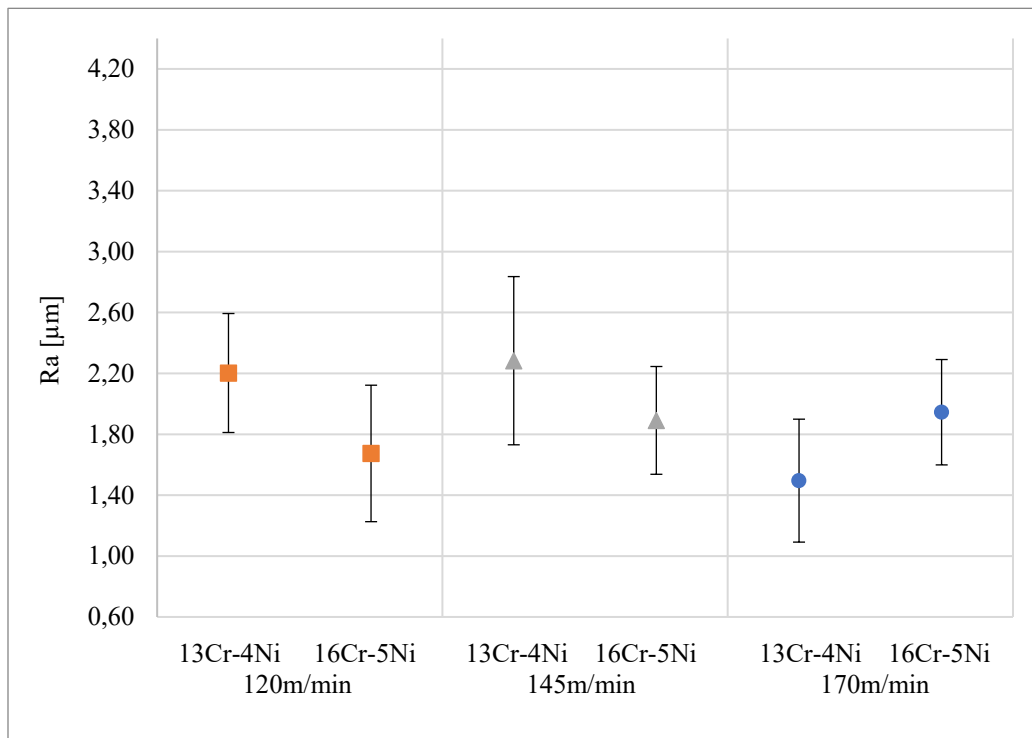


Figura 22 Valores de rugosidad promedio (R_a) obtenidos en el mecanizado de los aceros 13Cr-4Ni y 16Cr-5Ni.

Los resultados de rugosidad superficial (Figura 22) no muestran variaciones significativas entre los dos materiales ni entre las diferentes velocidades, lo que indica una consistencia en la calidad superficial obtenida. Los resultados se encuentran dentro del rango correspondiente a un proceso de torneado fino, cuyo límite superior típico es de aproximadamente $3.2 \mu\text{m}$ [66]. Con la ecuación (1) que depende del avance de la herramienta y del radio, se obtiene una rugosidad geométrica de $1.61 \mu\text{m}$, según la literatura el valor experimental de rugosidad puede llegar a ser hasta dos veces la rugosidad geométrica [38], en este caso $3.22 \mu\text{m}$. El rango de rugosidad [$1.61 \mu\text{m}$ - $3.22 \mu\text{m}$] es consistente con los valores obtenidos teniendo cuenta que en los procesos reales hay efectos por las vibraciones del sistema y desgaste de la herramienta.

Estos valores de rugosidad son comparables con los reportados por Thamizhmanii y Hasan [23], quienes registraron aproximadamente $2\text{ }\mu\text{m}$ al mecanizar AISI 440C con insertos PCBN bajo condiciones de mecanizado similares (velocidades entre 125 y 175 m/min y avance de 0.2 mm/rev). Además, dichos autores evidencian que el tipo de recubrimiento del inserto influye en el acabado superficial: los insertos CBN alcanzaron una rugosidad cercana a $1\text{ }\mu\text{m}$, mientras que los PCBN presentaron valores próximos a $2\text{ }\mu\text{m}$. Esto sugiere que el recubrimiento PVD empleado en este proyecto presenta un comportamiento similar al del PCBN en cuanto a la rugosidad promedio.

El caso correspondiente a la velocidad de corte de 170 m/min en el acero 16Cr-5Ni presenta un valor promedio de rugosidad relativamente bajo, a pesar de evidenciar el desgaste más severo de la herramienta. Este comportamiento puede atribuirse a que, bajo condiciones avanzadas de desgaste, la geometría efectiva de la punta de la herramienta cambia significativamente, generando un aumento considerable del radio de filo. Como consecuencia, el mecanismo predominante deja de ser el corte por cizallamiento y pasa a estar dominado por la deformación plástica y el aplastamiento del material, lo cual reduce la formación definida de los surcos de maquinado. Algunos estudios han reportado que, después de cierto tiempo de maquinado, la rugosidad superficial puede presentar un punto de inflexión a partir del cual deja de aumentar y comienza a disminuir [67] [68].

7.4 Fuerzas de corte

Se presentan las fuerzas resultantes promedio obtenidas del primer ciclo de mecanizado con las velocidades 120, 145 y 170 m/min para los dos aceros inoxidables 13Cr-4Ni y 16Cr-5Ni (Figura 23).

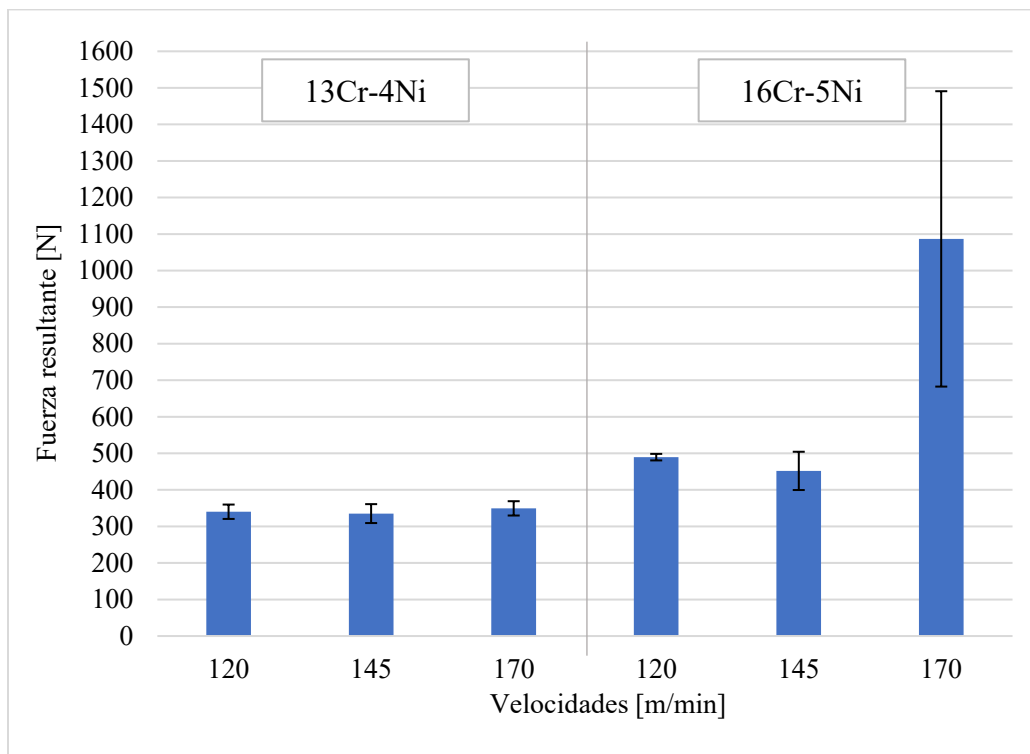


Figura 23 Fuerza resultante promedio en función de la velocidad de corte durante el primer ciclo de mecanizado para los aceros 13Cr-4Ni y 16Cr-5Ni.

Se observan diferencias significativas en las fuerzas de corte entre los dos aceros inoxidables estudiados (Figura 23), coherentes con su dureza. El 13Cr-4Ni con una dureza de aproximadamente 344 HV y fuerzas de corte relativamente estables en las tres velocidades analizadas (120, 145 y 170 m/min), siempre más bajas que las del 16Cr-5Ni. Este último, con una dureza mayor de alrededor de 459 HV, mostró fuerzas de corte más elevadas. Además, se observa un efecto relacionado con la velocidad de corte en el 16Cr-5Ni: a 170 m/min, la fuerza se incrementó de manera significativa debido al desgaste acelerado de la herramienta, evidenciando que tanto las propiedades del material como las condiciones de corte influyeron de forma más marcada en las fuerzas del 16Cr-5Ni que en las del 13Cr-4Ni.

En el acero 13Cr-4Ni (Figura 23), las fuerzas resultantes se mantuvieron sin cambios significativos en el rango de velocidades utilizado (120–170 m/min). Este comportamiento coincide con lo reportado por Mehmet Erdi Korkmaz y Mustafa Günay [61] para el acero inoxidable martensítico AISI 420, quienes, bajo condiciones de mecanizado similares, (velocidades entre 120 y 170 m/min y un avance de 0.2 rev/min), registraron fuerzas principales de aproximadamente 225 N y fuerzas de avance entre 90 y 110 N, lo que equivale a fuerzas resultantes de alrededor de 240 - 250 N, con una variación de solo 10 N.

De forma similar Thamizhmanii y Hasan [23] reportaron para el acero AISI 440C una tendencia estable al utilizar insertos CBN, con fuerzas principales cercanas a 280N en el rango de velocidades de 125 a 175 m/min. Sin embargo, al emplear insertos PCBN bajo las mismas condiciones (125-175 m/min y 0.2 mm/rev), los autores observaron fuerzas principales entre 260 y 330 N, evidenciando un efecto del tipo de recubrimiento sobre las fuerzas de corte. Cabe señalar que estos valores corresponden únicamente a la componente principal de la fuerza, sin incluir la componente radial ni la de avance; esto puede explicar su magnitud más baja comparada con las fuerzas resultantes obtenidas en el presente estudio. Además, factores como la composición química, tratamiento térmico o dureza del material también pueden influir en la magnitud de las fuerzas de corte.

El acero 16Cr-5Ni mostró fuerzas de corte consistentemente más elevadas que el 13Cr-4Ni (Figura 23). El caso más crítico se observó a 170 m/min, que generó una fuerza de corte promedio de 1086 N, con barras de error amplias que oscilaron entre 700 y 1400 N. Esta elevada dispersión refleja un incremento progresivo de la fuerza durante el ciclo de maquinado, asociado al rápido desgaste del inserto. Este comportamiento evidenció que, bajo dicha condición, la herramienta sufre un deterioro acelerado que afecta la estabilidad del proceso, por lo que la velocidad de 170 m/min no se considera recomendable para el mecanizado del acero 16Cr-5Ni.

Posteriormente, se analizaron las fuerzas de corte cuando las herramientas presentaron un desgaste de flanco superior al valor límite establecido $VB_{\max} = 0.35\text{mm}$. La Figura 24 muestra los valores promedio de la fuerza resultante registrados bajo estas condiciones para ambos materiales y velocidades de corte utilizadas.

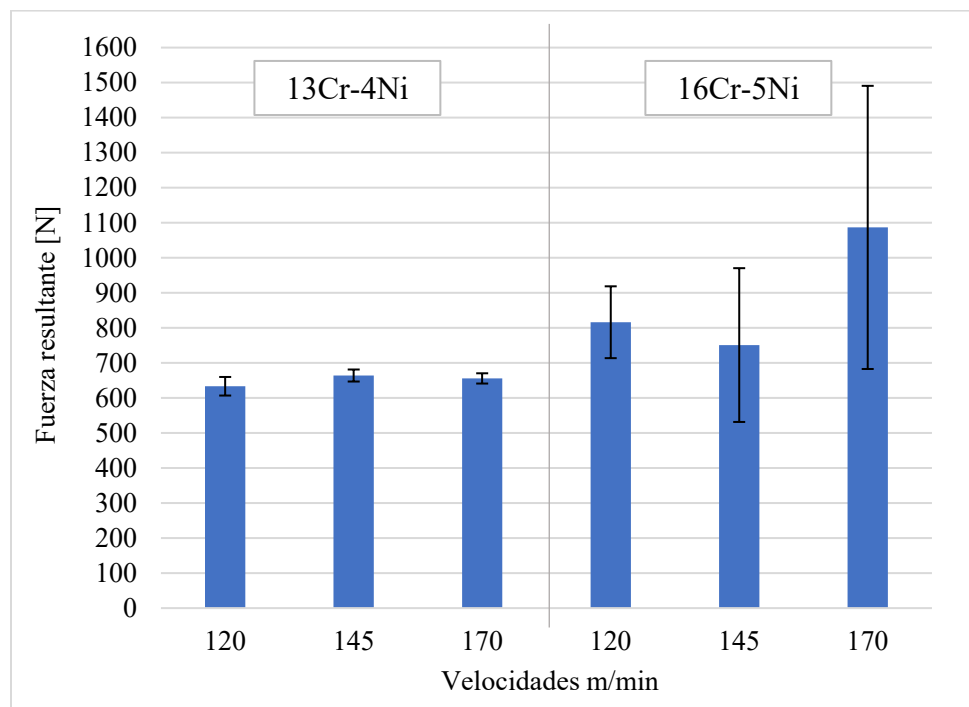


Figura 24 Incremento de la fuerza resultante con un desgaste de flanco principal superior o igual a 0.35mm en los aceros 13Cr-4Ni y 16Cr-5Ni.

Se observa un incremento general de la fuerza resultante en comparación con los valores obtenidos con la herramienta en su estado inicial (Figura 23). Este aumento se asocia al desgaste del filo, que provoca una mayor fricción y un contacto más amplio entre la herramienta y la superficie maquinada.

En el caso del acero 16Cr-5Ni, en las velocidades 120 y 145m/min (Figura 24), aunque el valor promedio de la fuerza resultante aumenta respecto al obtenido con la herramienta nueva, lo más relevante es que dentro del mismo ciclo de mecanizado las fuerzas comienzan en valores bajos y aumentan progresivamente. Esto explica el mayor tamaño de las barras de error, ya que representan esa variación interna causada por el aumento del desgaste durante el corte.

A continuación, se presentan las tablas con la evaluación de los criterios empleados para comparar la maquinabilidad de los aceros 13Cr-4Ni y 16Cr-5Ni.

Tabla 9 Calificación de las virutas obtenidas al mecanizar los aceros 13Cr-4Ni y 16Cr-5Ni.

Calificación virutas (escala de 1 a 10, donde 10 corresponde al mejor resultado obtenido) (Tabla 5)			
	13Cr-4Ni	16Cr-5Ni	Comentario
120m/min	9	10	Las virutas cortas tipo C obtenidas al maquinar el acero 16Cr-5Ni se consideran más favorables, ya que pueden ser evacuadas con mayor facilidad del área de corte, reduciendo el riesgo de interferencia con la herramienta o la superficie de la pieza. En contraste, las virutas generadas al mecanizar el acero 13Cr-4Ni fueron alargadas y helicoidales, con dimensiones variables, lo que puede ocasionar problemas en la superficie maquinada o acumulación en la zona de trabajo. Sin embargo, ambas fueron calificadas con valores similares debido a que no se presentaron inconvenientes significativos durante el proceso.
145m/min	9	10	A 145 m/min, se obtuvo un resultado similar al de 120 m/min, sin variaciones significativas en el tipo o comportamiento de las virutas.
170m/min	10	7	A 170 m/min, el color de las virutas del acero 16Cr-5Ni cambió de manera drástica, lo que indica la presencia de altas temperaturas en la zona de corte. Estas condiciones pueden afectar la estabilidad del proceso, incrementar el desgaste de la herramienta y modificar las propiedades superficiales del material. En contraste, las virutas del 13Cr-4Ni no presentaron cambios drásticos en el color

Tabla 10 Calificación del desgaste de la herramienta al mecanizar los aceros 13Cr-4Ni y 16Cr-5Ni.

Calificación desgaste (escala de 1 a 10, donde 10 corresponde al mejor resultado obtenido) (Figura 21)			
	13Cr-4Ni	16Cr-5Ni	Comentario
120m/min	10	3.33	Se pudo completar hasta 3 veces más ciclos utilizando el acero inoxidable 13Cr-4Ni
145m/min	10	2.5	Se pudo completar hasta 4 veces más ciclos utilizando el acero inoxidable 13Cr-4Ni
170m/min	10	2	Se pudo maquinar aproximadamente 5 veces más ciclos utilizando el acero inoxidable 13Cr-4Ni

Tabla 11 Calificación de la rugosidad superficial al mecanizar los aceros 13Cr-4Ni y 16Cr-5Ni.

Calificación rugosidades (escala de 1 a 10, donde 10 corresponde al mejor resultado obtenido) (Figura 22)			
	13Cr-4Ni	16Cr-5Ni	Comentario
120m/min	7.59	10	Se obtuvo una menor rugosidad promedio en el 16Cr-5Ni
145m/min	6.3	10	Se obtuvo una menor rugosidad promedio en el 16Cr-5Ni
170m/min	10	7.7	Se obtuvo una menor rugosidad promedio en el 13Cr-4Ni

Tabla 12 Calificación de las fuerzas de corte resultantes registradas durante el mecanizado de los aceros 13Cr-4Ni y 16Cr-5Ni.

Calificación fuerzas (escala de 1 a 10, donde 10 corresponde al mejor resultado obtenido) (Figura 23)			
	13Cr-4Ni	16Cr-5Ni	Comentario
120m/min	10	6.95	Se obtuvo una menor fuerza resultante promedio en el cilindrado del 13Cr-4Ni
145m/min	10	7.42	Se obtuvo una menor fuerza resultante promedio en el cilindrado del 13Cr-4Ni
170m/min	10	0.32	Se obtuvo una menor fuerza resultante promedio en el cilindrado del 13Cr-4Ni

Se presentan las calificaciones totales de maquinabilidad obtenidas para los aceros 13Cr-4Ni y 16Cr-5Ni en función de la velocidad de corte (Tabla 13). Los valores fueron calculados a partir de la suma ponderada de los indicadores individuales (virutas, desgaste de la

herramienta, rugosidad superficial y fuerzas de corte), de acuerdo con los pesos establecidos en la metodología.

Tabla 13 Calificación total de los resultados obtenidos para los aceros 13Cr-4Ni y 16Cr-5Ni en función de la velocidad de corte.

		Virutas (15%)	Desgaste (40%)	Rugosidad (15%)	Fuerzas (20%)	Calificación Total
16Cr-5Ni	120m/min	1.50	1.33	1.50	1.39	5.72
	145m/min	1.50	1.00	1.50	1.48	5.48
	170m/min	1.05	0.80	1.16	0.06	3.07
13Cr-4Ni	120m/min	1.35	4.00	1.14	2.00	8.49
	145m/min	1.35	4.00	0.95	2.00	8.30
	170m/min	1.50	4.00	1.50	2.00	9.00

Se observa que, en todas las velocidades de corte, el acero 13Cr-4Ni obtuvo calificaciones más altas que el 16Cr-5Ni, lo que indica un comportamiento más favorable durante el mecanizado.

Estos resultados sugieren que el acero 13Cr-4Ni presenta mejor maquinabilidad bajo las condiciones experimentales evaluadas, mostrando mayor estabilidad en las distintas velocidades de corte. El 16Cr-5Ni tiende a una reducción significativa de su desempeño con el aumento de la velocidad, lo cual se le atribuye al incremento del desgaste de la herramienta de corte.

8 Conclusiones

En el presente trabajo se llevó a cabo de manera exitosa la medición las fuerzas de corte, acabado superficial de la pieza de trabajo, desgaste de la herramienta y el análisis de la forma de viruta, con el fin de evaluar la maquinabilidad de los aceros inoxidables 13Cr-4Ni y 16Cr-5Ni.

Las fuerzas de corte en el acero 13Cr-4Ni mostraron una tendencia estable sin variaciones significativas dentro del rango de velocidades de corte analizado (120, 145 y 170 m/min). En condición de herramienta nueva, la fuerza promedio registrada fue de aproximadamente 340 ± 20 N.

En contraste, el acero 16Cr-5Ni presentó un incremento notable de las fuerzas a 170 m/min, asociado al desgaste acelerado de la herramienta, alcanzando una fuerza resultante promedio de 1086 N. Para las velocidades de 120 m/min y 145m/min, las fuerzas promedio fueron de 490 ± 9 N y 452 ± 52 N, respectivamente.

Al comparar ambos materiales, el 13Cr-4Ni exhibe fuerzas de corte aproximadamente un 25 % menores que el 16Cr-5Ni a velocidades de 120 y 145 m/min, y hasta un 68 % menores a 170 m/min, lo que evidencia una mayor maquinabilidad del 13Cr-4Ni bajo las condiciones evaluadas.

En cuanto al acabado superficial, no se observaron diferencias significativas entre los dos aceros en el rango de velocidades estudiado. En ambos casos, los valores de rugosidad promedio Ra se mantuvieron por debajo de $3.2 \mu\text{m}$, lo que corresponde a un acabado fino dentro del proceso de torneado. Estos resultados indican que las condiciones de corte empleadas permitieron obtener de buena calidad en ambos materiales.

En ambos aceros se evidenció desgaste localizado en el radio de punta de la herramienta, atribuible a la orientación del inserto en el portaherramientas y a la profundidad de corte utilizada. Se identificaron mecanismos combinados de adhesión y abrasión, siendo el acero 16Cr-5Ni el que provocó un desgaste más acelerado, especialmente a la velocidad de 170 m/min. Al mecanizar el 13Cr-4Ni a 120 m/min y a 145 m/min, fue posible completar de tres a cuatro veces más ciclos de corte antes de alcanzar el criterio de vida de la herramienta, lo que confirma un desgaste más lento en las herramientas de corte.

9 Recomendaciones y trabajos futuros

En ausencia de contrapunto en el torno CNC, se recomienda limitar el voladizo de la pieza a un máximo de tres veces su diámetro para ambos materiales. Superar este límite incrementa significativamente la probabilidad de vibraciones no deseadas, lo cual deteriora la calidad superficial y aumenta el riesgo de fractura del inserto.

Para incrementar la vida útil de la herramienta y mejorar el desempeño durante el maquinado, se recomienda evaluar tratamientos térmicos que mejoren la respuesta de los materiales, especialmente para el acero inoxidable 16Cr-5Ni, que presentó la menor maquinabilidad. Asimismo, se sugiere estudiar el uso de diferentes geometrías y calidades de insertos, a fin de identificar combinaciones que reduzcan las fuerzas de corte y el desgaste.

Como trabajo futuro, se propone realizar un análisis microestructural de las virutas mediante técnicas como microscopía SEM, con el fin de evaluar su morfología detallada, los mecanismos de deformación plástica involucrados y posibles cambios microestructurales asociados a las condiciones térmicas y mecánicas del corte. Esta información permitiría correlacionar la forma y estructura de las virutas con la estabilidad del proceso.

Asimismo, sería valioso profundizar en el estudio del desgaste de la herramienta utilizando microscopía SEM y técnicas complementarias como difracción de rayos X (XRD) para identificar la presencia y composición de materiales adheridos al filo. Aunque no se observó formación de cráter durante las pruebas, estas técnicas permitirían caracterizar con mayor detalle mecanismos de desgaste como la adhesión o posibles transformaciones superficiales, y establecer relaciones más precisas con los parámetros de corte y el comportamiento de cada material.

Referencias

- [1] D. Samantaraya, S. Lakade y A. Keche, «An alternate machining method for hardened automotive gears,» *Procedia Manufacturing*, n° doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.077, p. 517–522, 2018.
- [2] Z. Li, Z. Zeng, Y. Yang, Z. Ouyang, P. Ding, J. Sun y S. Zhu, «Research progress in machining technology of aerospace thin-walled components,» *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 119, n° doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.03.111, pp. 463-482, 2024.
- [3] G. Li y S. Ding, «Machining of medical device components,» *Metallic Biomaterials Processing and Medical Device Manufacturing*, n° doi.org/10.1016/B978-0-08-102965-7.00004-7, pp. 137-157, 2020.
- [4] S. Kalpakjian y S. Schmid, *Manufacturing processes for engineering materials* 6ed, Pearson Education, 2016.
- [5] J. Paro, H. Hänninen y V. Kauppinen, «Tool wear and machinability of X5 CrMnN 18 18 stainless steels,» *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 119, n° doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00877-9, pp. 14-20, 2001.
- [6] G. Arndt, «Ultra-high-speed machining: a review and an analysis of cutting forces,» *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers* 187, n° doi.org/10.1243/PIME_PROC_1973_187_149_02, pp. 625-634, 1973.
- [7] A. Daymi, M. Boujelbene y S. Ben Salem, «Effect of the cutting speed on the chip morphology and the cutting forces,» *Archives of Computational Materials Science and Surface Engineering*, pp. 77-83, 2009.
- [8] A. Hamdan, A. Sarhan y M. Hamdi, «An optimization method of the machining parameters in high-speed machining of stainless steel using coated carbide tool for best surface finish,» *Int J Adv Manuf Technol* 58, n° doi.org/10.1007/s00170-011-3392-5, p. 81–91, 2012.
- [9] N. H. Rafai y M. N. Islam, «AN INVESTIGATION INTO DIMENSIONAL ACCURACY AND SURFACE FINISH ACHIEVABLE IN DRY TURNING,» *Machining Science and Technology*, n° doi.org/10.1080/10910340903451456, p. 571–589, 2009.
- [10] K. Gupta, «A Review On Green Machining Techniques,» *Procedia Manufacturing*, vol. 51, n° doi.org/10.1016/j.promfg.2020.10.241, pp. 1730-1736, 2020.

- [11] Y. Isik, «Investigating the machinability of tool steels in turning operations,» *Materials & Design*, vol. 28, n° doi.org/10.1016/j.matdes.2006.03.025, pp. 1417-1424, 2007.
- [12] S. Meimandi, N. Vanderesse, D. Thibault, P. Bocher y M. Viens, «Macro-defects characterization in cast CA-6NM martensitic stainless steel,» *Materials Characterization*, vol. 124, n° doi.org/10.1016/j.matchar.2016.11.040, pp. 31-39, 2017.
- [13] E. Quaranta y P. Davies, «Emerging and Innovative Materials for Hydropower Engineering Applications: Turbines, Bearings, Sealing, Dams and Waterways, and Ocean Power,» *Engineering*, vol. 8, n° doi.org/10.1016/j.eng.2021.06.025, pp. 148-158, 2022.
- [14] C. V. Roa, J. A. Valdes, F. Larrahondo, S. A. Rodríguez y J. J. Coronado, «Comparison of the Resistance to Cavitation Erosion and Slurry Erosion of Four Kinds of Surface Modification on 13-4 Ca6NM Hydro-Machinery Steel,» *J. of Materi Eng and Perform*, vol. 30, n° doi.org/10.1007/s11665-021-05908-9, p. 7195–7212, 2021.
- [15] J. Muñoz Cubillos, O. A. Zambrano, J. J. Coronado y S. A. Rodríguez, «Comparing the Cavitation and Slurry Erosion Wear Resistance of 16Cr-5Ni Stainless Steel With 13Cr-4Ni CA6NM Stainless Steel,» *ASME. Journal of Tribology*, vol. 2, n° doi.org/10.1115/1.4066321, p. 147, September 11, 2024.
- [16] E. Uhlmann, B. Mullany, D. Biermann, K. Rajurkar, T. Hausotte y E. Brinksmeier, «Process chains for high-precision components with micro-scale features,» *CIRP Annals*, vol. 65, n° doi.org/10.1016/j.cirp.2016.05.001, pp. 549-572, 2016.
- [17] United States Bureau of Reclamation, «Facilities instructions, standards, and techniques: Volume 2-5—Turbine repair (W. Duncan, Jr., Rev.),» U.S. Department of the Interior, 1989.
- [18] C. Saenz-Betancourt, S. Rodríguez y J. Coronado, «Effect of boronising on the cavitation erosion resistance of stainless steel used for hydromachinery applications,» *Wear*, n° doi.org/10.1016/j.wear.2022.204330, p. 498–499, 2022.
- [19] P. Maruzewski, V. Hasmatuchi, H. Pascal Mombelli, D. Burggraeve, J. Iosfin, P. Finnegan y F. Avellan, «Surface Roughness Impact on Francis Turbine Performances and Prediction of Efficiency Step Up,» *International Journal of Fluid Machinery and Systems*, n° 10.5293/IJFMS.2009.2.4.353.
- [20] Y. Wang, A. Li, H. Sun y K. Wang, «Effect of machined surface integrity on fatigue resistance of aluminum-silicon alloy ZL109,» *Materials Today Communications*, vol. 37, n° doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.107165, pp. 2352-4928, 2023.
- [21] A. Senthil Kumar, A. Raja Durai y T. Sornakumar, «The effect of tool wear on tool life of alumina-based ceramic cutting tools while machining hardened martensitic stainless

- steel,» *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 173, n° doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.11.012, pp. 151-156, 2006.
- [22] H. Geng, X. Wu y H. Wang, «Effects of copper content on the machinability and corrosion resistance of martensitic stainless steel,» *J Mater Sci*, n° doi.org/10.1007/s10853-007-2084-x, p. 83–87, 2008.
- [23] S. Thamizhmanii y H. Sulaiman, «Machinability of Hard Martensitic Stainless Steel and Hard Alloy Steel by CBN and PCBN Tools by Turning Process,» *Proceedings of the World Congress on Engineering*, 2011.
- [24] J. Geisler Corrêa, R. Bertrand Schroeter y Á. Rocha Machado, «Tool life and wear mechanism analysis of carbide tools used in the machining of martensitic and supermartensitic stainless steels,» *Tribology International*, vol. 105, n° doi.org/10.1016/j.triboint.2016.09.035, pp. 102-117, 2017.
- [25] P. Ranjan y S. S. Hiremath, «Finite element simulation and experimental validation of machining martensitic stainless steel using multi-layered coated carbide tools for industry-relevant outcomes,» *Simulation Modelling Practice and Theory*, n° doi.org/10.1016/j.simpat.2021.102411, p. 114, 2022.
- [26] S. Iqbal, R. P. Durga Kumar y G. Horton, «Effect of materials and process parameters on machinability of stainless steels,» *Manufacturing Letters*, vol. 41, n° doi.org/10.1016/j.mfglet.2024.09.088, pp. 696-707, 2024.
- [27] A. Bjerke, J. Casas, F. Lenrick, J. Andersson, R. M'Saoubi y V. Bushlya, «On the wear mechanisms of uncoated and coated pcBN tools during turning of 17–4 PH martensitic stainless steel,» *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, vol. 127, n° doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2024.106984, 2025.
- [28] M. McGuire, *Stainless Steels for Design Engineers*, ASM International, 2008.
- [29] Y. w. Yen, J. w. Su y D. p. Huang, «Phase equilibria of the Fe–Cr–Ni ternary systems and interfacial reactions in Fe–Cr alloys with Ni substrate,» *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 457, p. 270–278, 2008.
- [30] D. J. Crawford, «CA-6NM– An Update,» 1974.
- [31] ASME, «A743 Standard Specification for Castings, Iron-Chromium, Iron-Chromium-Nickel, Corrosion Resistant, for General Application,» n° 10.1520/A0743_A0743M-03.
- [32] H. Jayaraj, P. Kalhan, G. Prabhakar Chaudhari, S. Kumar Nath y S. Kumar, «Slurry erosion response of heat treated 13Cr-4Ni martensitic stainless steel,» *Materials science forum*, 2012.

- [33] E. Hernández Rengifo, S. Aida Rodríguez y J. J. Coronado, «Improving fatigue strength of hydromachinery 13Cr-4Ni CA6NM steel with nitriding and thermal spraying surface treatments,» *Fatigue and fracture of engineering materials and structures*, vol. 44, n° doi.org/10.1111/ffe.13413, pp. 1059-1072, 2021.
- [34] H. Niederau, «A New Low-Carbon 16Cr-5Ni Stainless Martensitic Cast Steel,» *Stainless Steel Casting, ASTM International*, 1982.
- [35] V. P. Astakhov, Turning, Woodhead Publishing, 2011.
- [36] I. O. f. S. (ISO), «Classification and application of hard cutting materials for metal removal with defined cutting edges — Designation of the main groups and groups of application,» 2012.
- [37] S. C. Black, V. Chiles, A. J. Lissaman y S. J. Martin, Principles of Engineering Manufacture (Third Edition) Turning and Milling, Butterworth-Heinemann, 1996.
- [38] J. S. Agapiou y D. A. Stephenson, Metal Cutting Theory and Practice, 3rd ed, 2016.
- [39] S. Coromant, Tecnología de mecanizado de metal.
- [40] S. Saravanamurugan, B. Shyam Sundar, R. Sibi Pranav y A. Shanmugasundaram, «Optimization of cutting tool geometry and machining parameters in turning process,» *Materials Today: Proceedings*, Vols. %1 de %238, Part 5, n° doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.246, pp. 3351-3357, 2021.
- [41] K. Ma, Z. Liu, B. Wang y D. Liu, «A new characterization methodology for assessing machinability through cutting energy consumption,» *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 55, n° doi.org/10.1016/j.cirpj.2024.10.008, pp. 224-233, 2024.
- [42] AENOR, UNE 36-423-90 Determinación del índice de maquinabilidad, métodos de torneado de corta duración, Vols. %1 de %2UNE 36-423-90, Madrid, 1990.
- [43] K. Björkeborn, U. Klement y H. Oskarson, «Ranking of materials by their machinability applying a short-term test,» 2008.
- [44] S. Yıldız y F. Ünsaçar, «Design, development and testing of a turning dynamometer for cutting force measurement,» *Materials & Design*, vol. 27, n° doi.org/10.1016/j.matdes.2005.04.001, pp. 839-846, 2006.
- [45] P. Wang, H. Liang, L. Jiang y L. Qian, «Effect of nanoscale surface roughness on sliding friction and wear in mixed lubrication,» *Wear*, n° doi.org/10.1016/j.wear.2023.204995, p. 530–531, 2023.

- [46] T. Ruzova y B. Haddadi, «Surface roughness and its measurement methods - Analytical review,» *Results in Surfaces and Interfaces*, vol. 19, n° doi.org/10.1016/j.rsurfi.2025.100441, 2025.
- [47] ASME, «Surface texture (surface roughness, waviness, and lay),» American Society of Mechanical Engineers, 2019.
- [48] K. Gallardo y M. Barona, «Procedimiento operativo de la prueba de rugosidad,» Univalle, Santiago de Cali, 2021.
- [49] ISO, «ISO 3685 Tool-life testing with single point turning tools,» 1993.
- [50] I. S. Jawahir, «The chip control factor in machinability assessments: Recent trends,» *Journal of Mechanical Working Technology*, vol. 17, n° doi.org/10.1016/0378-3804(88)90023-X, pp. 213-224, 1988.
- [51] Z. Liao, J. M. Schoop, J. Saelzer, B. Bergmann, P. C. Priarone, A. Splettstößer, V. M. Bedekar, F. Zanger y Y. Kaynak, «Review of current best-practices in machinability evaluation and understanding for improving machining performance,» *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, p. 151–184, 2024.
- [52] F. Peng, Z. Feng, Y. Zhao y J. Long, «A Novel Reticular Retained Austenite on the Weld Fusion Line of Low Carbon Martensitic Stainless Steel 06Cr13Ni4Mo and the Influence on the Mechanical Properties,» *Metals*, vol. 12(3), p. 432, 2022.
- [53] S. F. Brunatto, R. P. Cardoso y L. L. Santos, «Behavior of Retained Austenite and Carbide Phases in AISI 440C Martensitic Stainless Steel under Cavitation,» *Eng*, vol. 5(3), pp. 1980-1994, 2024.
- [54] X. P. Ma, L. J. Wang, B. Qin, C. M. Liu y S. V. Subramanian, «Effect of N on microstructure and mechanical properties of 16Cr–5Ni–1Mo martensitic stainless steel,» *Materials & Design*, vol. 34, p. 74–81.
- [55] P. Wang, S. P. Lu, N. M. Xiao, D. Z. Li y Y. Y. Li, «Effect of delta ferrite on impact properties of low carbon 13Cr–4Ni martensitic stainless steel,» *Materials Science and Engineering A*, vol. 527(12), p. 3210–3216, 2010.
- [56] F. A. Burbano, «Diseño, construcción y calibración de un dinamómetro para medir fuerzas de corte en un torno CNC (Trabajo de grado),» Universidad del Valle, Santiago de Cali, 2021.
- [57] Tokyo Measuring Instruments Laboratory , «Ltd. Smart Dynamic Strain Recorder DC-104R,» [En línea]. Available: <https://www.tml.jp>.
- [58] Mitutoyo, «Mitutoyo SJ-201P,» [En línea]. Available: <https://www.mitutoyo.com/products-and-solutions/>.

- [59] ADVANCED INSTRUMENTS S.A.S, «Advanced Optical Microscope,» [En línea]. Available: <https://advanced.com.co/catalogo/estereo-microscopio-trinocular-marca-advanced-optical>.
- [60] LAMINA Technologies, «Catálogo técnico de insertos de torneado CNMG 120408 NN LT10».
- [61] M. E. Korkmaz y M. Günay, «Finite element modelling of cutting forces and power consumption in turning of AISI 420 martensitic stainless steel,» *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 43(8), p. 4075–4086, 2018.
- [62] Fanuc, «Manuales Fanuc,» [En línea]. Available: <https://www.fanuc-torno-cnc.com/manuales>. [Último acceso: 10 02 2026].
- [63] E. M. Trent y P. K. Wright , Metal cutting, Butterworth-Heinemann, 1984.
- [64] F. Klocke, Manufacturing processes 1, Cutting, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2011.
- [65] D. Sagapuram, A. Udupa, K. Viswanathan, J. B. Mann, R. M'Saoubi, T. Sugihara y S. Chandrasekar, «On the cutting of metals: A mechanics viewpoint,» *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 142(11), 2020.
- [66] Organización Internacional de Normalización, «ISO 21920-1:2021. Especificaciones geométricas del producto (GPS) — Textura superficial: Perfil — Parte 1: Indicación de la textura de la superficie,» 2021.
- [67] Z. Cui, G. Li, H. Liu, W. Zong, H. Zhang, C. Zhang y K. Du, «Tool anisotropic wear prediction and its influence on surface topography in diamond turning of oxygen-free copper,» *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 318, n° doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2023.118042, 2023.
- [68] N. A. Jasni, M. Amri Lajis y K. Kamaruddin, «Tool Wear Performance of TiAlN/AlCrN Multilayer Coated Carbide Tool in Machining of AISI D2 Hardened Steel,» *Advanced Materials Research*, 2012.