

**DIAGNÓSTICO DEL COMPORTAMIENTO TRIBOLÓGICO DE UN INSERTO DE
CARBURO DE TUNGSTENO UTILIZADO EN PROCESOS DE MECANIZADO
EN LA INDUSTRIA**

SEBASTIÁN CAMILO MÁRQUEZ RIBERO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA**

2018

**DIAGNÓSTICO DEL COMPORTAMIENTO TRIBOLÓGICO DE UN INSERTO DE
CARBURO DE TUNGSTENO UTILIZADO EN PROCESOS DE MECANIZADO
EN LA INDUSTRIA**

SEBASTIÁN CAMILO MÁRQUEZ RIBERO

**Trabajo de grado, modalidad proyecto de investigación, para optar el título
de: Ingeniero Metalúrgico**

**DIRECTOR
CRISTIAN CAMILO VIÁFARA ARANGO
Doctor en Ingeniería Mecánica**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA**

2018

DEDICATORIA

Al terminar mis estudios de pregrado dedico este triunfo al profesor, Dr. Cristian Camilo Viáfara Arango, quien con tanta sapiencia me dirigió el proyecto de grado, permitiéndome encontrar mi primer éxito como ingeniero metalúrgico; también debo decir que, por su constancia, su profesionalismo y su honestidad pude bajo la orientación de este gran maestro, encontrar en la investigación algo novedoso y productivo para el futuro de la empresa Industrias Acuña INAL, a la que doy las gracias por permitirme desarrollar este proyecto de grado. También a mis papás quienes me ayudaron moral y económicamente para salir adelante y gracias a la Universidad Industrial de Santander a la cual ingresé con orgullo y méritos, por ser una de las más prestigiosas a nivel nacional y latinoamericano.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar con toda sinceridad mi gratitud a todos los que me colaboraron para realizar este proyecto de vida, el más importante y significativo para mí, porque aquí se condensa todo lo que es el aprendizaje a través de un proceso en el cual fueron decisivos: Dios, quien me dotó de la inteligencia necesaria para asimilar todo este cúmulo de conocimiento y ciencia, mis profesores y mis compañeros de carrera.

Así empieza para mí una nueva etapa en el desarrollo de mi vida y una esperanza para el logro de éxitos frente a los retos que se me presenten de aquí en adelante como profesional de la Ingeniería Metalúrgica.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	15
1. OBJETIVOS.....	17
1.1 OBJETIVO GENERAL	17
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
2. MARCO TEÓRICO	18
2.1 TRIBOLOGÍA	18
2.2 MECANISMOS DE DESGASTE	19
2.3 TORNEADO.....	22
3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	34
3.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	34
3.2 OBTENCIÓN DE LA INFORMACIÓN DEL INSERTO DE CARBURO DE TUNGSTENO	35
3.3 PREPARACIÓN METALOGRAFICA DEL INSERTO DE CARBURO DE TUNGSTENO	35
3.4 CARACTERIZACIÓN DEL INSERTO DE CARBURO DE TUNGSTENO.....	36
3.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DIAGNÓSTICO	37
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	38
4.1 CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA TRIBOLÓGICO DEL PROCESO DE TORNEADO.....	38
4.2 CARACTERIZACIÓN DEL INSERTO WC-CO	42
4.3 CARACTERIZACIÓN DE LA SUPERFICIE DESGASTADA DEL INSERTO WC-CO	47

5. DIAGNÓSTICO DEL COMPORTAMIENTO TRIBOLÓGICO DEL INSERTO WC-CO-TIALN	51
6. CONCLUSIONES	53
7. RECOMENDACIONES.....	54
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	55
BIBLIOGRAFIA.....	57
ANEXOS.....	59

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Composición química (% masa) del acero XAR 400 [9].....	39
Tabla 2. Condiciones de corte en el torneado en INAL.....	41
Tabla 3. Condiciones de corte recomendadas según anexo A.....	41
Tabla 4. Rango sugerido de valores para concentraciones de partículas de WC [10].....	44
Tabla 5. Resultados de dureza del inserto WC-Co.	46

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Esquema de un Sistema Tribológico [1].	19
Figura 2. Desgaste abrasivo por dos cuerpos (a) y desgaste abrasivo por tres cuerpos (b) [1].....	20
Figura 3. Desgaste adhesivo [4].	20
Figura 4. Reacción triboquímica [4].	21
Figura 5. Desgaste por fatiga [4].....	21
Figura 6. Esquema de una operación básica de torneado [3].....	22
Figura 7. Fuerzas que actúan en el torneado [2].	23
Figura 8. Recomendaciones generales de lubricantes para diversos materiales [2].	24
Figura 9. Esquema de proceso de torneado, con los elementos del sistema tribológico [2].....	25
Figura 10. Esquema de la cara de ataque y del flanco de una herramienta de corte [2].....	26
Figura 11. Desgaste en cráter de un carburo de tungsteno [3].	27
Figura 12. Desgaste del flanco de un carburo de tungsteno [3].....	28
Figura 13. Desgaste de la herramienta en función del tiempo de corte [3].	29
Figura 14. Efecto de la velocidad de corte sobre el desgaste de la herramienta [3].	29
Figura 15. Gráfica en escala log-log de la velocidad de corte vs la vida de la herramienta [3].....	30
Figura 16. Valores representativos de n y C para la ecuación de Taylor (5) [3].	31
Figura 17. Micrografía de un carburo de tungsteno (90WC - 10Co) [5].	32
Figura 18. Resistencia relativa de los filos y tendencia al astillado de los insertos [2].	32

Figura 19. Esquema de desgaste en una herramienta no recubierta y una recubierta con TiN [2].	33
Figura 20. Diagrama de flujo del procedimiento experimental.	34
Figura 21. Inserto de carburo de tungsteno desgastado (a), cortado (b) y montado en baquelita (c).	36
Figura 22. Dinámica del sistema tribológico del proceso de torneado en INAL [2].	39
Figura 23. Canasta de acero XAR 400 sin mecanizar (a) y mecanizada (b).	40
Figura 24. Microestructura del inserto WC-Co por SEM a 5.000X (a), 10.000X (b), 20.000X (c) y 30.000X (d).	42
Figura 25. Medidas de las partículas WC del inserto WC-Co.	43
Figura 26. Espectros EDS de la fase gris (a) y de la fase oscura (b) de la microestructura del inserto WC-Co.	44
Figura 27. Espesor (a) y espectro EDS (b) del recubrimiento del inserto WC-Co.	45
Figura 28. Difractograma de Rayos X del inserto WC-Co.	46
Figura 29. Superficie desgastada de la punta de corte del inserto a 150X mediante SEM.	47
Figura 30. Superficie desgastada de la cara de ataque del inserto a 1.300X.	48
Figura 31. Superficie desgastada del flanco del inserto.	49
Figura 32. Espectros EDS del sustrato (a), del recubrimiento (b) y del material adherido (de la pieza de trabajo) (c) de la punta de corte desgastada	50

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Tabla de Recomendaciones Generales para Operaciones de Torneado	59
Anexo B. Valores Numéricos de las Propiedades de los Carburos de Tungsteno	60
Anexo C. Características Generales de Operación de los Materiales para las Herramientas de Corte.....	61

RESUMEN

TÍTULO: DIAGNÓSTICO DEL COMPORTAMIENTO TRIBOLÓGICO DE UN INSERTO DE CARBURO DE TUNGSTENO UTILIZADO EN PROCESOS DE MECANIZADO EN LA INDUSTRIA*

AUTOR: MÁRQUEZ RIBERO SEBASTIÁN CAMILO**

PALABRAS CLAVES: Análisis tribológico, torneado, carburo de tungsteno WC-Co-TiAlN.

DESCRIPCIÓN:

La empresa Industrias Acuña (INAL) fabrica elementos de máquinas utilizando la herramienta de corte WC-Co-TiAlN para sus procesos de mecanizado. La empresa reporta una baja vida útil de esta herramienta, es decir, el inserto WC-Co-TiAlN presenta desgaste prematuro, por lo tanto, es necesario hacer un diagnóstico de su comportamiento tribológico con el fin de determinar las posibles causas de su falla. El inserto WC-Co-TiAlN fue caracterizado mediante Microscopía Electrónica de Barrido (SEM), Espectroscopía de Dispersión de Energías de Rayos X (DRX) y Difracción de Rayos X (DRX). La dureza del sustrato de la herramienta de corte fue de 90 HRA lo cual concuerda con la microestructura observada de partículas de carburo de tungsteno en una matriz de cobalto, sin embargo, esta alta dureza no es adecuada para las condiciones de mecanizado interrumpido para las cuales el inserto es utilizado. El análisis SEM-EDS permitió confirmar la presencia de un recubrimiento (TiAlN) y el pobre desempeño de la herramienta. Se observaron características típicas del mecanismo de desgaste adhesivo. Por lo tanto, el desgaste prematuro de la herramienta de corte podría tener dos causas como la selección del material de la herramienta ya que no se tuvo en cuenta el mecanizado interrumpido y las condiciones operativas inadecuadas de acuerdo a lo recomendado en la literatura del proceso de torneado en INAL.

* Proyecto de grado modalidad proyecto de investigación.

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Director: Cristian Camilo Viáfara Arango. Doctor en Ingeniería Mecánica

ABSTRACT

TITLE: DIAGNOSIS OF THE TRIBOLOGICAL BEHAVIOR OF A TUNGSTENO CARBIDE INSERT USED IN MACHINING PROCESSES IN THE INDUSTRY*

AUTHOR: MÁRQUEZ RIBERO SEBASTIÁN CAMILO**

KEYWORDS: Tribological analysis, turning, WC-Co-TiAlN tungsten carbide.

DESCRIPTION:

Industrias Acuña (INAL) company fabricates machine elements that use the WC-Co-TiAlN cutting tool for its machining processes. The company reports a low useful life of this tool, that is, the WC-Co-TiAlN insert shows a premature wear, hence it's necessary to make a diagnosis of its tribological behavior in order to determine the possible causes of its failure. The WC-Co-TiAlN report was developed using Scanning Electron Microscopy (SEM), X-ray Energy Dispersion Spectroscopy (XRD) and X-ray Diffraction (XRD). The substrate hardness was 90 HRA which is in accordance with the observed microstructure of tungsten carbide particles in a cobalt matrix, however, this high hardness is not adequate for the interrupted machining conditions for which the insert is used. SEM-EDS analysis confirmed the presence of a TiAlN coating and the poor performance of the tool. Typical features of the adhesive wear mechanism were observed. Hence, the premature wear of the cutting tool could have two causes such as the inadequate selection of the tool material since the interrupted machining was not considered and the inappropriate operational conditions used in the INAL turning process which are not according to those conditions recommended in the literature.

* Degree project modality: research project.

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Adviser: Cristian Camilo Viáfara Arango. En Ingeniería Mecánica

INTRODUCCIÓN

En el sector industrial es de gran importancia tener pleno conocimiento del fenómeno del desgaste, ya que éste es una de las principales fuentes no sólo de la pérdida de eficiencia de los equipos, sino de grandes pérdidas económicas. Los daños ocasionados por el desgaste de las piezas en un equipo industrial llevan continuamente a recambio de partes en la maquinaria, provocando tiempos de parada de la producción generalmente grandes [1].

Para prever el desgaste y rotura de las piezas es necesario conocer cuáles son las causas que los provocan, logrando así una mayor productividad de la maquinaria industrial. Lo mencionado anteriormente se logra llevando a cabo un análisis detallado de la pieza desgastada y del sistema tribológico del proceso de mecanizado asociado [1].

En los procesos de mecanizado industriales las herramientas de corte se someten a ciertas condiciones las cuales inducen al desgaste de las mismas como lo son: elevados esfuerzos localizados en la punta de la herramienta, altas temperaturas en la cara de ataque, deslizamiento de la viruta a lo largo de la cara de ataque y deslizamiento de la herramienta a lo largo de la superficie maquinada [2]. Debido a la rapidez del desgaste por las condiciones anteriores, se han desarrollado tecnológicamente herramientas de corte las cuales brindan las propiedades y los beneficios adecuados a la hora de minimizar los costos y los tiempos de producción [2].

Una de las herramientas de corte más avanzadas tecnológicamente son los cermets o materiales compuestos de partículas de carburo de tungsteno en una matriz de cobalto, los cuales poseen propiedades excepcionales que hacen mayor su vida útil

comparándolos con las tradicionales herramientas de corte como los aceros de alta velocidad y las aleaciones de cobalto fundido [3].

La empresa Industrias Acuña (INAL) fabrica maquinaria industrial para algunos sectores de implementación como: palma de aceite, minero, energético, agroindustrial, entre otros, donde utilizan herramientas de corte para realizar el maquinado de piezas de aceros al carbono, aceros inoxidables, aceros tratados térmicamente y otros tipos de materiales. La empresa reporta muy baja vida útil de sus herramientas de corte. Por este motivo se hace necesario realizar un análisis de las herramientas y de las condiciones de operación con el fin de determinar las causas del bajo rendimiento en producción de las herramientas de corte.

El fin de este proyecto es realizar un diagnóstico del comportamiento tribológico de un inserto de carburo de tungsteno utilizado en la empresa para el mecanizado de componentes específicos (canastas) mediante torneado. Por otro lado, se busca promover el vínculo entre la Universidad Industrial de Santander (UIS) y las empresas del área metropolitana de Bucaramanga, que permita contribuir al desarrollo tecnológico y económico de la región. Este proyecto se realizó dentro del ámbito del proyecto “Análisis de problemas de desgaste de herramientas en la industria manufacturera” (código 2303) dirigido por el profesor Cristian Camilo Viáfara Arango y financiado por la Vicerrectoría de Investigación y Extensión (VIE) de la UIS.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar el comportamiento en desgaste de un inserto de carburo de tungsteno utilizado en procesos de mecanizado de la empresa INAL.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Caracterizar el sistema tribológico del proceso de maquinado de acuerdo con las condiciones de operación a partir de la información suministrada por INAL.
2. Caracterizar la composición química, la dureza, la microestructura y la composición de las fases presentes del inserto de carburo de tungsteno mediante las técnicas correspondientes.
3. Realizar un diagnóstico del comportamiento tribológico del inserto de carburo de tungsteno.

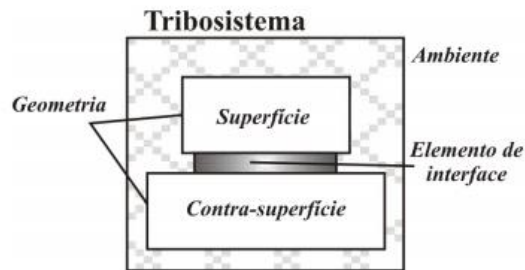
2. MARCO TEÓRICO

El marco teórico utilizado para el desarrollo del presente proyecto está compuesto por temas como el estudio del sistema tribológico, los principales mecanismos de desgaste, el proceso del torneado, el desgaste de las herramientas de corte y los insertos de carburo de tungsteno. Los temas anteriores se describen haciendo uso de referencias bibliográficas especializadas en cada tema, como por ejemplo para el estudio de la tribología y los mecanismos de desgaste se utilizaron libros como el de Zum Gahr [1] y el de Bhushan [5] y para todo lo relacionado con el proceso del torneado se utilizaron libros como el de Kalpakjian y Schmidt [2] y el de Groover [3]. A continuación se describen cada uno de los anteriores temas.

2.1 TRIBOLOGÍA

La ciencia que estudia los principales fenómenos que envuelven el desgaste, la fricción y la lubricación de materiales se denomina tribología [1]. La tribología es una ciencia muy extensa ya que abarca una amplia cantidad de variables que se ven involucradas en diversos factores como las propiedades de los materiales en contacto, las condiciones ambientales, las características dinámicas del contacto, entre otros aspectos [1]. La complejidad del fenómeno anterior llevó a que se introdujera en el año de 1978 el concepto de “Sistema Tribológico”, el cual facilita el estudio de la tribología y los diferentes componentes que influyen sobre ella [1]. En la figura 1 se presenta un esquema que ilustra un sistema tribológico.

Figura 1. Esquema de un Sistema Tribológico [1].



Un sistema tribológico permite el estudio de los tipos de desgaste que pueden estar ocurriendo debido a la interacción de los materiales entre los elementos de un tribosistema. En este sentido, un sistema tribológico consta de cuatro elementos como lo son: el cuerpo básico o la superficie, el contra-cuerpo o la contra-superficie, el elemento de interface o lubricante y el ambiente [1].

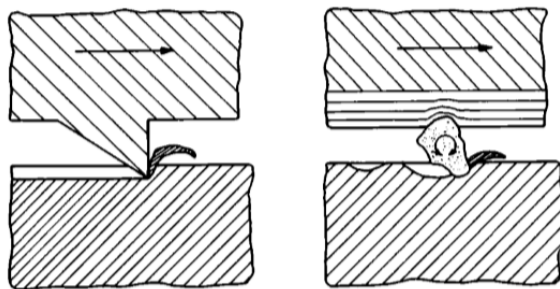
2.2 MECANISMOS DE DESGASTE

El fenómeno del desgaste consiste en la remoción o eliminación de material de una superficie debido a la interacción con una superficie complementaria como resultado de una acción mecánica [4]. La clasificación del desgaste toma dos aspectos en consideración; el primero está basado en el tipo de desgaste como por rodadura, por erosión y por deslizamiento en la pieza o componentes. El segundo aspecto mayormente utilizado toma en consideración las bases del mecanismo o acción tribológica por el cual un material es removido de una superficie; dentro de los principales mecanismos de desgaste se encuentran: abrasión, adhesión, reacción triboquímica y fatiga [1]. A continuación se describen cada uno de estos mecanismos.

El desgaste abrasivo es el desplazamiento de material causado por la presencia de partículas duras que pueden estar incrustadas en una o en las dos superficies que están en movimiento relativo [1]. El desgaste abrasivo puede clasificarse en

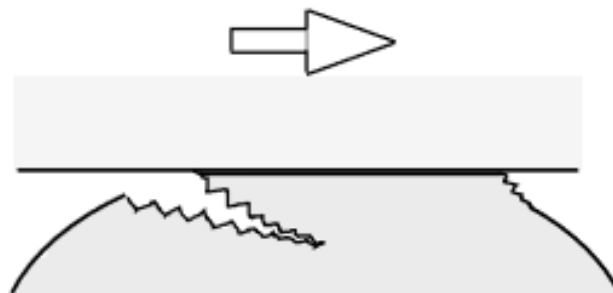
abrasión de dos cuerpos y abrasión por tres cuerpos (Figura 2). En abrasión de dos cuerpos el desgaste es causado por rugosidades duras pertenecientes a una o a ambas superficies en contacto. La abrasión de tres cuerpos se presenta cuando una partícula abrasiva de mayor dureza que las superficies de los materiales actúa como elemento interfacial entre los cuerpos en contacto.

Figura 2. Desgaste abrasivo por dos cuerpos (a) y desgaste abrasivo por tres cuerpos (b) [1].



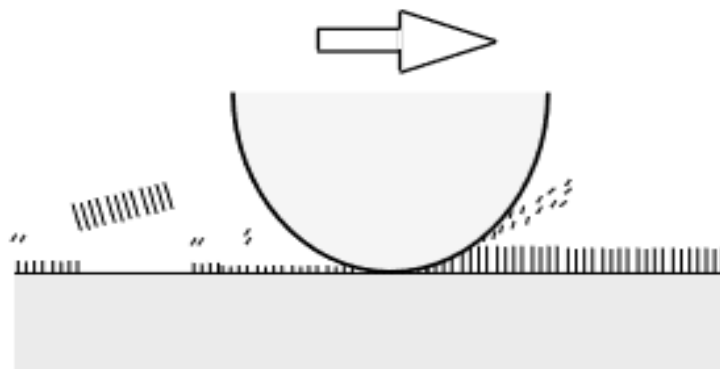
El desgaste adhesivo ocurre cuando dos superficies que se encuentran en movimiento relativo se deslizan una contra la otra. Al ocurrir este deslizamiento, la alta presión local entre las asperezas de contacto da como resultado en deformación plástica, adhesión y formación de uniones a nivel local [1]. Debido al movimiento relativo, las uniones se rompen y se transfiere el material entre las superficies o quedan como partículas libres. En la figura 3 se esquema el desgaste adhesivo.

Figura 3. Desgaste adhesivo [4].



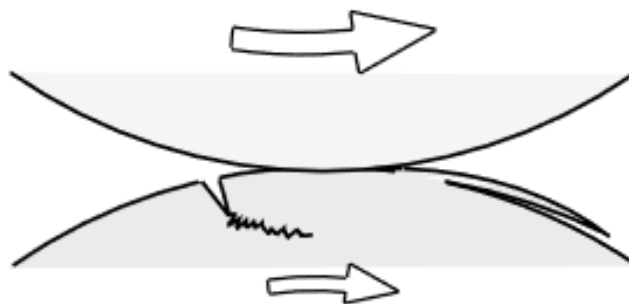
La reacción triboquímica comprende una combinación de procesos mecánicos y térmicos que ocurren en la interfaz de los cuerpos en contacto. La reacción triboquímica se presenta cuando las superficies en contacto reaccionan con el medio ambiente, generando películas de óxidos en la interfaz y también por la acción del proceso mecánico que ocurre [1]. En la figura 4 se esquema la reacción triboquímica.

Figura 4. Reacción triboquímica [4].



El desgaste por fatiga está relacionado con los esfuerzos cíclicos variables a los cuales los materiales son expuestos, éstos pueden inducir a la formación de grietas, que eventualmente, después de un número crítico de ciclos resultarán en la rotura de la superficie con la formación de grandes fragmentos [1]. En la figura 5 se esquema el desgaste por fatiga.

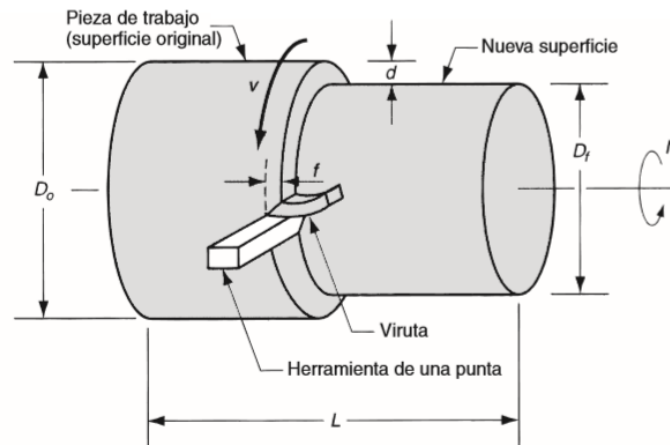
Figura 5. Desgaste por fatiga [4].



2.3 TORNEADO

El torneado es un proceso de maquinado en el cual se utiliza una herramienta de corte, la cual remueve material de la superficie de una pieza de trabajo de geometría cilíndrica en rotación [3]. Este proceso comúnmente se realiza en una máquina llamada torno, con los objetivos de reducir el diámetro de una pieza cilíndrica de trabajo, por lo general a una dimensión especificada dándole un acabado liso de calidad y proporcionándole una longitud mediante un proceso de refrentado [2]. En la figura 6 se ilustra un esquema de la operación básica de torneado.

Figura 6. Esquema de una operación básica de torneado [3].

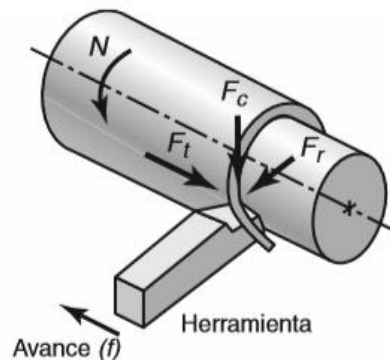


En las herramientas de corte del proceso de torneado actúan tres fuerzas principales que se deben considerar para el diseño de las máquinas y la herramienta, si es requerido un maquinado de precisión. Estas tres fuerzas son: la fuerza de corte (F_c), la fuerza de empuje (F_t) y la fuerza radial (F_r) [2]. A continuación, se describen cada una de ellas.

La fuerza de corte (F_c) actúa sobre la punta de la herramienta hacia abajo, generando que la pieza de trabajo tienda a ir hacia arriba, por lo tanto, esta fuerza

suministra la energía requerida para la operación de corte [2]. La fuerza de empuje (F_t) actúa en la dirección de avance de la herramienta haciendo que ésta tienda a ir hacia la derecha alejándola del plato. La fuerza radial (F_r) tiende a alejar la herramienta de la pieza de trabajo ya que actúa en la dirección radial. En la figura 7 se ilustra un esquema de las fuerzas en torneado anteriormente descritas.

Figura 7. Fuerzas que actúan en el torneado [2].



Condiciones de corte en el torneado

En el torneado hay algunas condiciones de corte y parámetros muy importantes que se deben tener en cuenta para realizar adecuadamente el proceso, éstos son la velocidad de rotación (N), la velocidad de corte (V), el avance (f), la velocidad de avance (f_r), el tiempo para maquinarse de extremo a extremo una pieza (T_m) y la profundidad de corte (d) [3].

A continuación, se presentan las ecuaciones matemáticas para calcular dichos parámetros.

- $N = \frac{V}{\pi D_o}$ [rev/min] (1)

- $d = \frac{D_o - D_f}{2}$ [mm] (2)

- $T_m = \frac{L}{Nf}$ [min] (3)

- $f_r = Nf$ [mm/min] (4)

En el anexo A se presenta una tabla con recomendaciones específicas en cuanto a los parámetros del proceso de torneado para diversos materiales de piezas de trabajo y herramientas de corte.

Lubricación en el torneado

Los fluidos de corte o lubricantes se aplican para mejorar la operación de torneado de manera significativa ya que éstos brindan beneficios como: reducir la fricción y el desgaste mejorando la vida útil de la herramienta, reducir las fuerzas y el consumo de energía, proteger la superficie maquinada de la corrosión ambiental, entre otros [2]. Sin embargo, en la actualidad existe la tendencia al maquinado seco, es decir, sin utilizar ningún lubricante puesto que esto ayuda a la reducción de costos en el proceso y alivia el impacto ambiental por el uso de los lubricantes. Debido al gran avance tecnológico de las herramientas de corte, el uso del maquinado seco es una gran alternativa para procesos de maquinado como torneado y fresado en aceros, aceros aleados y fundiciones [2]. En la figura 8 se recomiendan algunos lubricantes apropiados para diversos materiales de piezas de trabajo.

Figura 8. Recomendaciones generales de lubricantes para diversos materiales [2].

Material	Tipo de fluido
Aluminio	D, MO, E, MO + FO, CSN
Berilio	MC, E, CSN
Cobre	D, E, CSN, MO + FO
Magnesio	D, MO, MO + FO
Níquel	MC, E, CSN
Metales refractarios	MC, E, EP
Aceros	
al carbono y baja	D, MO, E, CSN, EP
aleación inoxidable	D, MO, E, CSN
Titanio	CSN, EP, MO
Zinc	C, MC, E, CSN
Zirconio	D, E, CSN

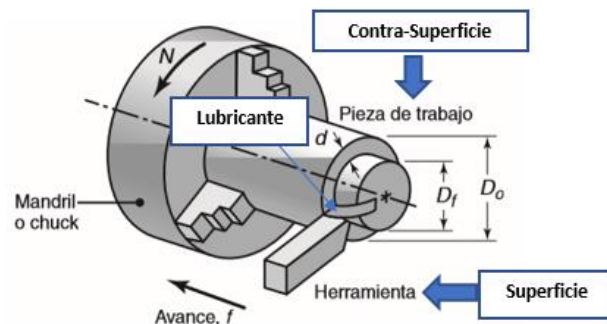
Nota: CSN = químicos y sintéticos; D = seco; E = emulsión; EP = presión extrema; FO = aceite grasoso y MO = aceite mineral.

Tribología del proceso del torneado

En los procesos de manufactura suceden con demasiada frecuencia los fenómenos tribológicos. La manufactura es un proceso por el cual se transforma una materia prima para adquirir ciertas características como por ejemplo un acabado superficial de calidad, una forma y unas dimensiones requeridas, entre otras [4]. En este sentido, en la manufactura hay diversas condiciones que afectan la vida de las herramientas como: las velocidades altas de deslizamiento o corte, las temperaturas elevadas y las condiciones ambientales a las cuales se expone el proceso. En otras palabras, durante algunos procesos de manufactura actúan mecanismos de desgaste debido al contacto en movimiento relativo de las superficies de la herramienta y del material procesado [4].

En la tribología del proceso de mecanizado existen aspectos muy importantes a tener en cuenta como lo son la lubricación y los mecanismos de desgaste a los cuales se ve sometida la herramienta de corte. Como se mencionó en la sección 3.1, el sistema tribológico permite el estudio de los tipos de desgaste a partir de la interacción de los materiales entre los elementos del mismo. En la figura 9 se ilustra un esquema de una operación de mecanizado llamada torneado, donde se identifican los elementos del sistema tribológico de dicho proceso (figura 1).

Figura 9. Esquema de proceso de torneado, con los elementos del sistema tribológico [2].



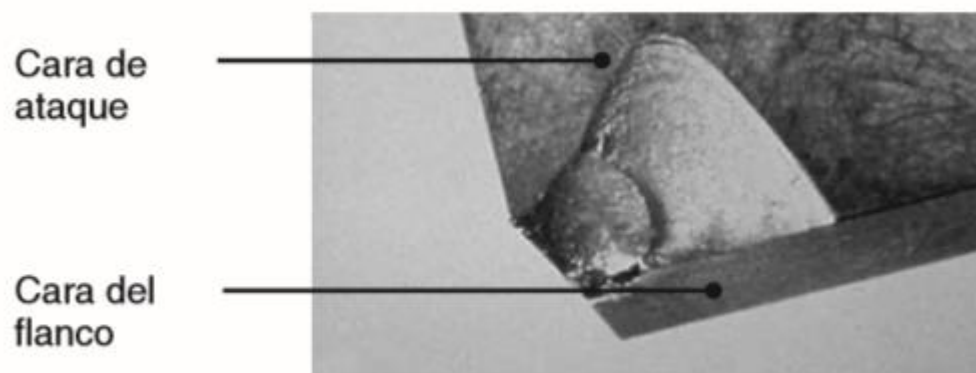
De acuerdo a la figura 1, los elementos del sistema tribológico para la operación de torneado (figura 6) son:

- **Ambiente:** Condiciones ambientales como temperatura y humedad en el lugar de la empresa.
- **Elemento de interface:** Lubricante o fluido de corte.
- **Contra-superficie:** Pieza de trabajo.
- **Superficie:** Herramienta de corte.

Desgaste en las herramientas de corte

El desgaste es un proceso gradual que depende de los materiales de la herramienta y de la pieza de trabajo, de la geometría de la herramienta, de los parámetros del proceso de mecanizado, de la lubricación, entre otros [2]. El desgaste gradual ocurre en dos lugares de la herramienta de corte: en el flanco y en la parte superior de la superficie de inclinación, por lo tanto, existen dos tipos de desgaste en la herramienta que son: desgaste en cráter o craterización y desgaste en el flanco (figura 10) [3]. A continuación, se describen cada uno de estos tipos de desgaste.

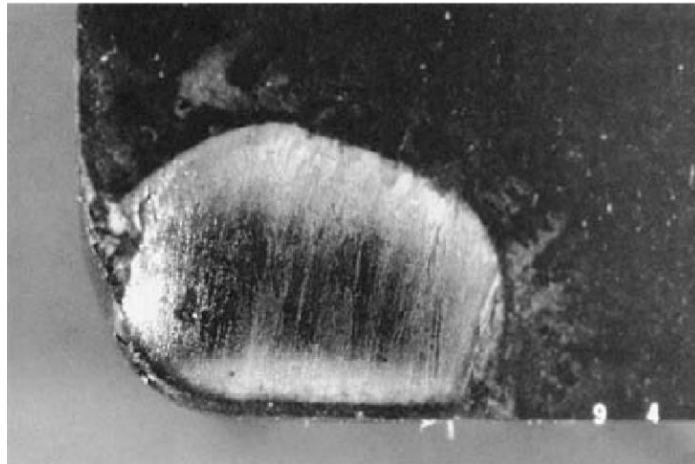
Figura 10. Esquema de la cara de ataque y del flanco de una herramienta de corte [2].



El desgaste en cráter o craterización ocurre en la cara de ataque de la herramienta, debido a la acción de la viruta que se desliza contra la superficie. La temperatura en

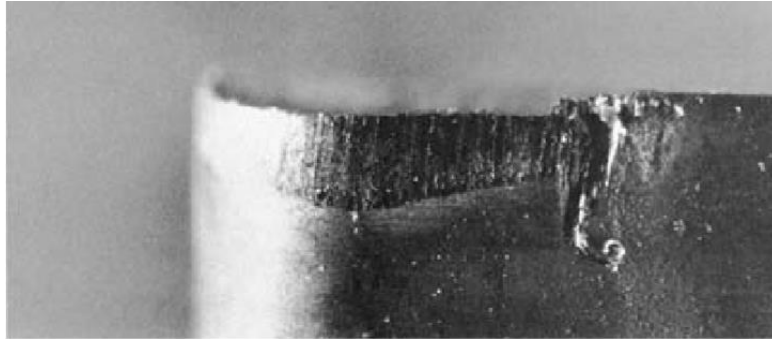
la interfaz herramienta-viruta y los altos esfuerzos son los factores que contribuyen a la acción de desgaste [2]. La craterización se lleva a cabo debido al proceso de difusión, el cual consiste en el movimiento de átomos de los materiales en contacto a través de la interfaz herramienta-viruta, ocasionando que la superficie de la herramienta pierda dureza por la acción de los átomos y así quedando más susceptible tanto al mecanismo de abrasión como al mecanismo de adhesión. Si la herramienta de corte tiene un recubrimiento, éste disminuye la acción del proceso de difusión [3]. En la figura 11 se ilustra el desgaste en cráter en una herramienta de carburo de tungsteno.

Figura 11. Desgaste en cráter de un carburo de tungsteno [3].



El desgaste del flanco ocurre en la cara de alivio o flanco de la herramienta debido al rozamiento o fricción producto de la interacción a lo largo de la superficie maquinada. De lo anterior se originan los mecanismos de desgaste adhesivo y abrasivo tal como se puede observar en la figura 12, la cual muestra el desgaste en el flanco de una herramienta de corte de un carburo cementado.

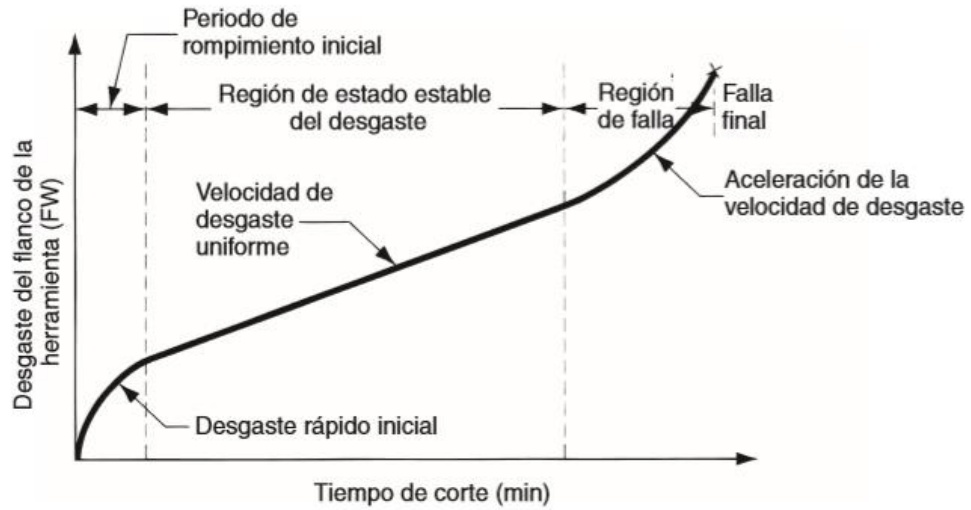
Figura 12. Desgaste del flanco de un carburo de tungsteno [3].



La vida de la herramienta de corte se define como el tiempo de mecanizado durante el cual es posible utilizarla, sin llegar a correr el riesgo de que ocurra una fractura en la misma que pueda conllevar a una falla catastrófica [3]. Durante el tiempo de mecanizado, los mecanismos de desgaste van produciendo mayores niveles de desgaste en la herramienta a medida que se va incrementando el tiempo y la velocidad de corte tal como se muestran en las figuras 13 y 14, donde se puede analizar de manera cualitativa y cuantitativa la relación general de desgaste de una herramienta de corte, más exactamente del desgaste del flanco [3]. No obstante, existe una relación similar para el desgaste en cráter o craterización.

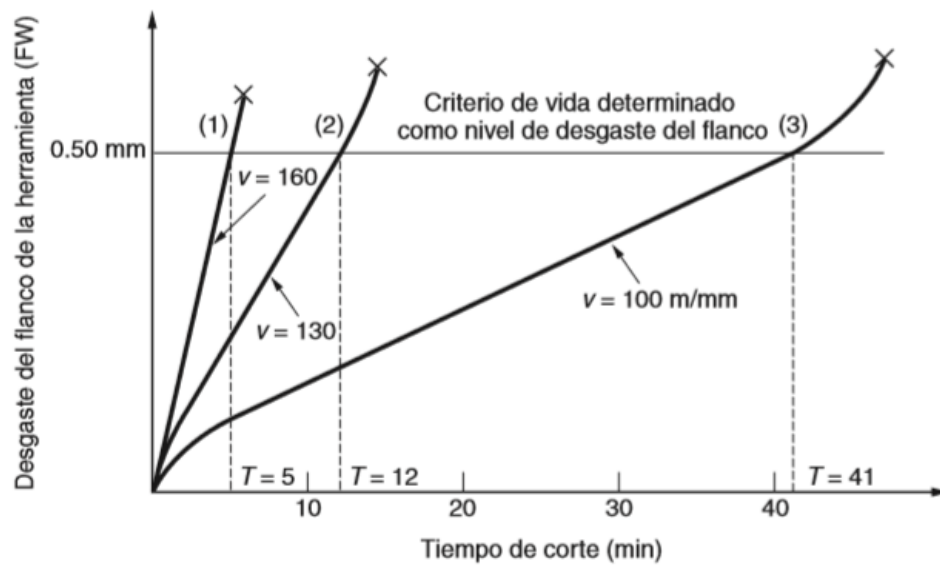
En la curva del desgaste del flanco de la herramienta de corte se puede identificar tres regiones (figura 13). La primera es el periodo de rompimiento inicial en donde ocurre el desgaste inicial rápido del borde cortante afilado en sus primeros minutos de usos. En la segunda región, el desgaste ocurre como una función lineal del tiempo, es decir, la velocidad con la cual se desgaste el flanco es uniforme. Por último, la velocidad del desgaste se empieza a acelerar, dando origen a la región de falla, en la cual se reduce la eficiencia del proceso de mecanizado hasta el punto que ocurra la falla final [3].

Figura 13. Desgaste de la herramienta en función del tiempo de corte [3].



El incremento de la velocidad de corte durante el proceso de mecanizado es determinante para la reducción de la vida de la herramienta, ya que como lo muestra la figura 14, existe una relación indirecta entre velocidad de corte y tiempo de corte o mecanizado, es decir, cuando la velocidad de corte es mayor la tasa de desgaste aumenta, haciendo que la vida de la herramienta de corte se reduzca.

Figura 14. Efecto de la velocidad de corte sobre el desgaste de la herramienta [3].



En el año 1900, el ingeniero F.W. Taylor descubrió una relación matemática con la cual se puede calcular de manera cuantitativa la vida de una herramienta de corte y se conoce como la ecuación de Taylor [3]:

$$VT^n = C \quad (5)$$

Donde:

V = Velocidad de corte, m/min o ft/min

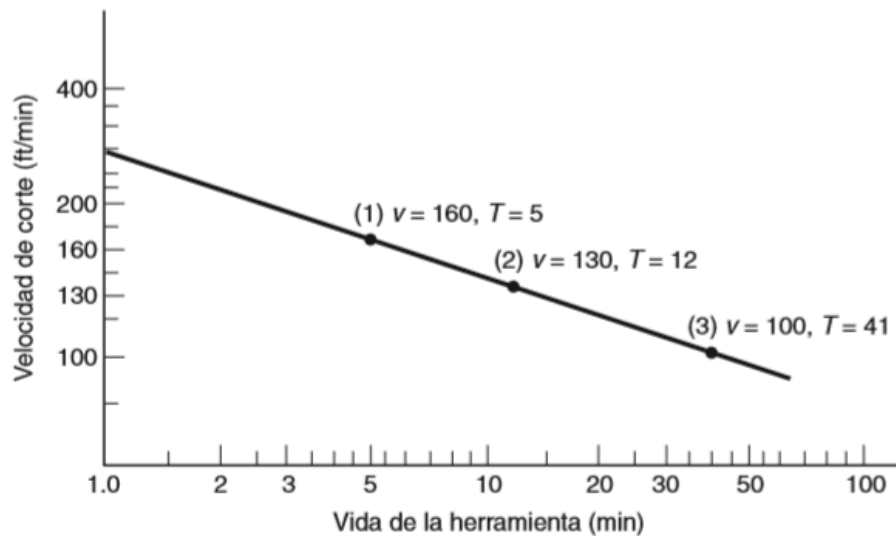
T = Vida de la herramienta, min

n = Constante positiva dependiente del material de la herramienta

C = Constante que depende del material de la herramienta y trabajo y las condiciones de corte

En la figura 15 se grafica la ecuación (5) donde n es la pendiente de la recta y C es la intersección sobre el eje de la velocidad, tomando como referencia que la vida de la herramienta sea de un minuto.

Figura 15. Gráfica en escala log-log de la velocidad de corte vs la vida de la herramienta [3].



En la figura 16 se presenta una tabla con una lista de valores de n y C para diversos materiales de herramientas de corte en el torneado

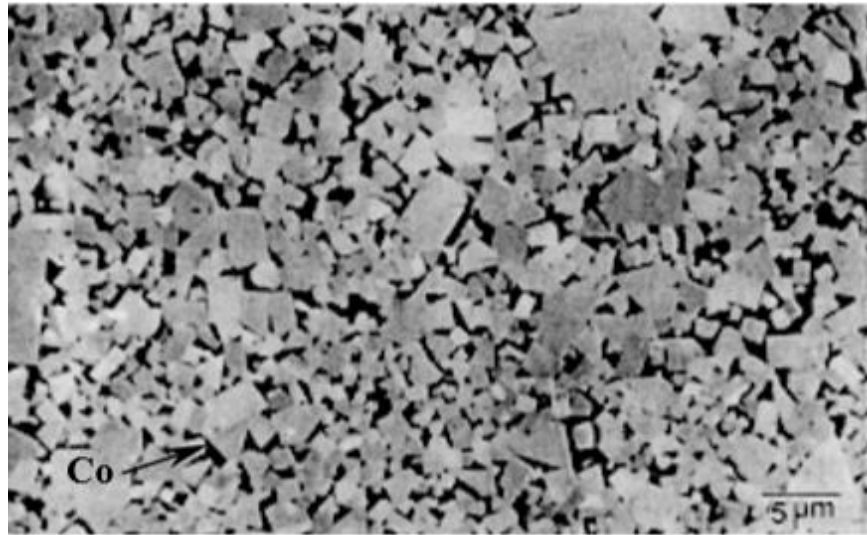
Figura 16. Valores representativos de n y C para la ecuación de Taylor (5) [3].

Material de herramienta	n	C			
		Corte sin acero		Corte con acero	
		m/min	ft/min	m/min	ft/min
Acero para herramienta simple al carbono	0.1	70	(200)	20	60
Acero de alta velocidad	0.125	120	(350)	70	200
Carburo cementado	0.25	900	(2700)	500	1500
Cermet	0.25			600	2000
Carburo recubierto	0.25			700	2200
Cerámico	0.6			3000	10000

Insertos de carburo de tungsteno

Los carburos de tungsteno o carburos cementados son una clase de materiales duros para herramientas de corte que consisten en partículas de carburo de tungsteno (WC) aglutinadas en una matriz de cobalto (Co) como se observa en la figura 17. La cantidad de Cobalto suele estar entre el 6% y 25%, afectando así significativamente las propiedades de la herramienta [2], ya que éste metal es dúctil, sin embargo, cuando la cantidad de cobalto es baja, los insertos de carburo de tungsteno tienden a fallar por fractura debido a la falta de tenacidad por la elevada dureza, es por esto que se recomienda una herramienta con una adecuada cantidad de cobalto, sobre todo cuando el corte es interrumpido [3]. Si el contenido de cobalto aumenta, se disminuyen las propiedades como la resistencia al desgaste, la dureza y la dureza en caliente, pero aumenta la tenacidad y la resistencia al impacto [2]. En la figura 17 se muestra una micrografía de un carburo de tungsteno.

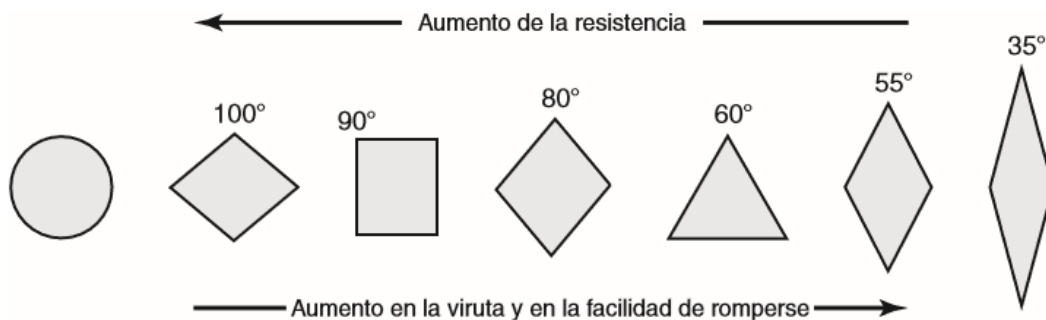
Figura 17. Micrografía de un carburo de tungsteno (90WC - 10Co) [5].



En los anexos B y C se presentan tablas con los valores numéricos de las propiedades de los carburos de tungsteno (anexo B) y las características generales de operación de los materiales para las herramientas de corte (anexo C).

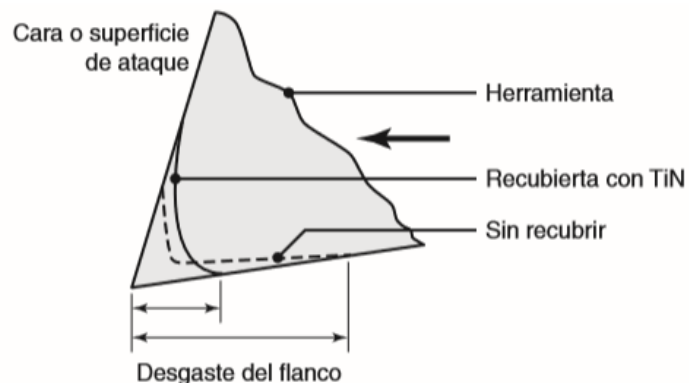
Existen diversos factores por los cuales la vida útil de las herramientas de corte se ve afectada, uno de ellos es la geometría del inserto. La importancia de ésta radica que cuanto menor sea el ángulo de la punta de corte menor será la resistencia del filo de corte y por consiguiente habrá mayor facilidad de romperse [2]. En la figura 18 se muestran distintas geometrías de insertos.

Figura 18. Resistencia relativa de los fillos y tendencia al astillado de los insertos [2].



Los carburos de tungsteno recubiertos son insertos de carburo cementado creados en 1970 con un recubrimiento de un material de carburo de titanio, nitruro de titanio u óxido de aluminio con características como alta resistencia al desgaste, alta dureza en caliente, alta adhesión del recubrimiento al sustrato, disminución del proceso de la difusión, entre otras [2]. El recubrimiento se aplica al sustrato por deposición química o física teniendo un espesor que varía entre 2 y 15 μm , ya que si es más grueso tiende a ser más frágil [2]. Los insertos recubiertos tienen una vida útil mayor a la de uno no recubierto, sólo si se operan a mayores velocidades de corte evitando así que el recubrimiento se desgaste más rápido debido a la adhesión de viruta [3]. En la figura 19 se ilustra un esquema de desgaste característico de una herramienta sin recubrir y una con recubrimiento de nitruro de titanio.

Figura 19. Esquema de desgaste en una herramienta no recubierta y una recubierta con TiN [2].

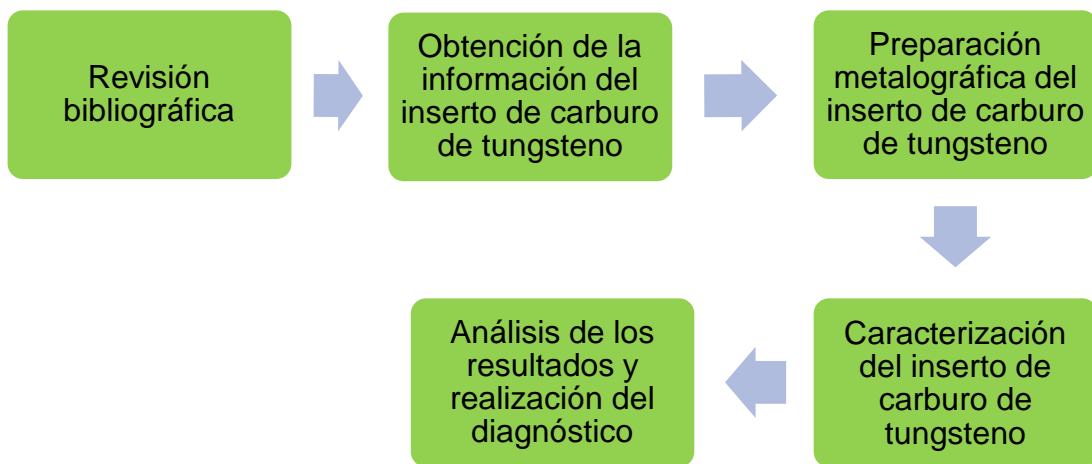


Sin embargo, los insertos recubiertos cuando las operaciones son de corte interrumpido tiende el recubrimiento a sufrir desportilladuras ocasionando una falla prematura de la herramienta, es por esto que para estas situaciones son preferibles los carburos sin recubrir y formulados para una mayor tenacidad [3].

3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En la figura 20 se ilustra el diagrama de flujo del procedimiento experimental del presente proyecto.

Figura 20. Diagrama de flujo del procedimiento experimental.



El procedimiento experimental que se llevó a cabo para alcanzar los objetivos propuestos se describe a continuación.

3.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Se hizo una búsqueda de diversos tipos de materiales bibliográficos como libros, artículos, tesis de grado y la página del fabricante de la herramienta, con el fin de recopilar toda la información necesaria para realizar el análisis de resultados y el diagnóstico del comportamiento tribológico del inserto. Las fuentes bibliográficas mencionadas están directamente relacionadas con el estudio de la tribología del

mecanizado con insertos de carburo de tungsteno. Lo anterior se ha logrado haciendo uso de las bases de datos disponibles en la UIS.

3.2 OBTENCIÓN DE LA INFORMACIÓN DEL INSERTO DE CARBURO DE TUNGSTENO

Se recopiló la información requerida de las condiciones operativas de corte del inserto en el proceso de torneado como la velocidad de rotación, el avance, la profundidad de corte, el diámetro inicial y final de la pieza de trabajo, la longitud de corte y la información técnica comercial de la herramienta de corte por parte del fabricante. Esta información operativa de la herramienta junto con la revisión bibliográfica permite el estudio del comportamiento tribológico del inserto WC-Co, con el fin de determinar las causas de la baja vida útil de éste y por ende su bajo rendimiento en producción. La información se obtuvo por medio de visitas y entrevistas al personal de la empresa INAL.

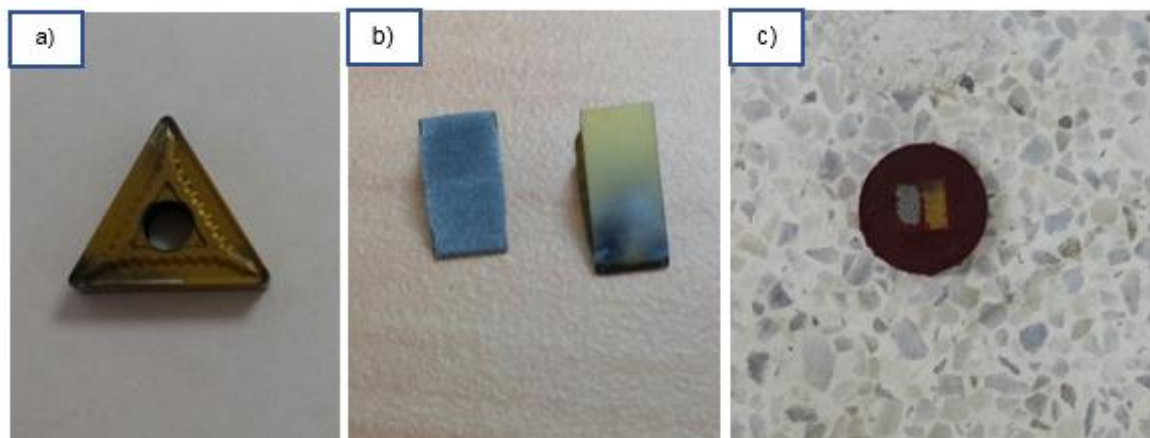
3.3 PREPARACIÓN METALGRÁFICA DEL INSERTO DE CARBURO DE TUNGSTENO

La preparación metalográfica se desarrolló en las instalaciones del Laboratorio de Metalografía de la UIS, haciendo uso de la norma ASTM B 665 – 03 para la preparación metalográfica de los carburos de tungsteno [6]. La preparación se efectuó de la siguiente manera:

- 1) Se cortó el inserto (pastilla) de carburo de tungsteno con un disco de rueda de diamante para poder hacer el montaje de la muestra.
- 2) El montaje de la muestra se hizo en un material plástico de fenol – formaldehído (baquelita). En la figura 21 se muestra el inserto desgastado, cortado y montado en baquelita.

- 3) El desbaste se realizó mediante el uso de lijas con numeración desde la P120 hasta la P1200, utilizando cantidades suficientes de agua como refrigerante.
- 4) El pulido se hizo manualmente deslizando la muestra sobre una tela sintética de pelo corto (pañó) a una velocidad de 500 – 600 rpm haciendo uso de la pasta de diamante para dejar la superficie pulido tipo espejo.
- 5) El ataque químico se hizo en una solución de una parte de ácido clorhídrico HCl y una parte de peróxido de hidrógeno H_2O_2 para revelar la microestructura del inserto [7].

Figura 21. Inserto de carburo de tungsteno desgastado (a), cortado (b) y montado en baquelita (c).



3.4 CARACTERIZACIÓN DEL INSERTO DE CARBURO DE TUNGSTENO

La caracterización del material se realizó mediante el uso de las siguientes técnicas:

- **Espectroscopía de Dispersión de Energías de Rayos X (EDS):** Con esta técnica se pudo analizar la variación de la composición química microestructural, comprendiendo mapas de distribución de elementos químicos y perfiles de concentración de elementos en puntos diferentes del inserto de WC-Co, como también de su recubrimiento y las superficies desgastadas. Esta

técnica se realizó en el Laboratorio de Microscopía de la sede de Guatigüará de la UIS.

- **Microscopía Electrónica de Barrido (SEM):** Con el uso de esta técnica se pudo obtener información de la microestructura de la muestra. Se tomaron micrografías del sustrato de carburo de tungsteno desde los 1000 hasta los 30.000 aumentos, del recubrimiento de TiAlN y de las superficies desgastadas de la herramienta desgastada. Esta técnica se realizó en el Laboratorio de Microscopía de la sede de Guatigüará de la UIS.
- **Dureza:** Con esta técnica se pudo obtener la dureza de la muestra en distintas partes de la misma, según la norma ASTM B294 – 17 los carburos cementados utilizando la escala Rockwell A [HRA] con un indentador de pirámide de diamante con una carga de 60 Kg-f (588,4 N) [8]. Esta técnica se realizó en el Laboratorio de Metalografía de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales de la UIS.
- **Difracción de rayos X (DRX):** Con esta técnica se pudieron determinar las fases cristalinas mediante comparación con los difractogramas de las bases de datos, junto con un análisis cuantitativo. Esta técnica se realizó en el Laboratorio de Rayos X de la sede de Guatigüará de la UIS.

3.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DIAGNÓSTICO

El análisis de resultados y el diagnóstico del comportamiento tribológico del inserto de carburo de tungsteno se realizó usando la información del marco teórico como las recomendaciones operativas del inserto de carburo de tungsteno en el proceso del torneado, las propiedades de los carburos de tungsteno, el desgaste de las herramientas de corte, el sistema tribológico asociado al proceso de torneado, entre otras; comparando lo anterior con la información de las condiciones operativas brindada por la empresa INAL y los resultados de la caracterización de la herramienta de corte desgastada.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA TRIBOLÓGICO DEL PROCESO DE TORNEADO

Los elementos del sistema tribológico para la operación de torneado en la empresa INAL de acuerdo a la figura 1 son:

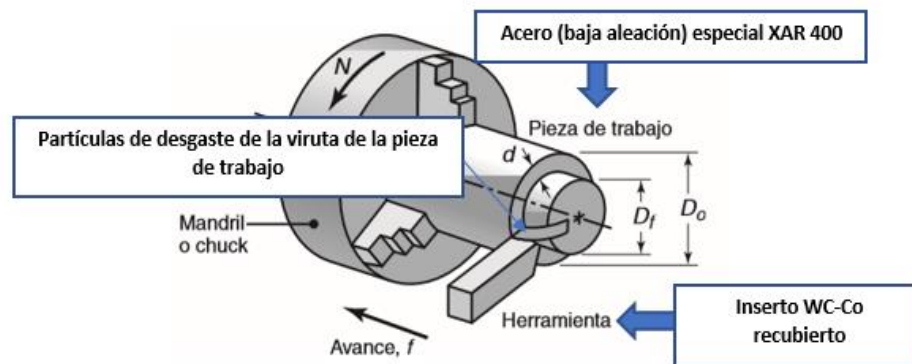
- **Ambiente:** Condiciones ambientales de INAL (temperatura $\approx 29^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ y humedad $\approx 70\% \pm 10\%$).
- **Elemento de interface:** Partículas de desgaste de la viruta de la pieza de trabajo.
- **Contra-superficie:** Pieza de trabajo (canasta) del material acero (baja aleación) antiabrasivo especial XAR 400.
- **Superficie:** Inserto de carburo de tungsteno recubierto (herramienta de corte).
- **Dinámica del sistema:** Los valores de la dinámica del sistema se encuentran a continuación:

- $D_o = 251 \text{ mm}$
- $D_f = 245 \text{ mm}$
- $N = 75 \text{ rpm}$
- $V = 59,14 \text{ m/min}$
- $f = 0,32 \text{ mm/rev}$
- $d = 3 \text{ mm}$

En el proceso de torneado se mecanizan canastas, las cuales son piezas cilíndricas formadas por planchas de acero antiabrasivo especial XAR 400, el cual es un acero de baja aleación suministrado con un tratamiento térmico ya realizado el cual es

templado, por ende tiene una elevada dureza que va entre 370 – 490 HB (70 – 73 HRA).

Figura 22. Dinámica del sistema tribológico del proceso de torneado en INAL [2].



En la tabla 1 se muestra la composición química de este acero [9]. El mecanizado de las canastas se realiza utilizando un inserto WC-Co recubierto de geometría triangular como herramienta de corte (figura 21a).

Tabla 1. Composición química (% masa) del acero XAR 400 [9].

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	B
$\leq 0,20$	$\leq 0,80$	$\leq 1,5$	$\leq 0,020$	$\leq 0,007$	$\leq 1,00$	$\leq 0,50$	$\leq 0,005$

El proceso de torneado de las canastas se divide en dos operaciones. En la primera operación se efectúa uno o más cortes de desbaste utilizando una alta velocidad y profundidad de corte; luego de los cortes de desbaste, se debe realizar la operación de acabado utilizando una velocidad y profundidad de corte menor para producir un buen acabado superficial. En la figura 23 se muestra la canasta sin mecanizar y ya mecanizada. El proceso de corte en el mecanizado de las canastas es interrumpido, es decir, no es continuo debido a que las planchas de acero XAR 400 no están totalmente juntas, tal como se observan en la figura 23. De acuerdo a la dinámica del sistema tribológico (figura 22) se pueden presentar los procesos o tipos de desgaste como: desgaste por deslizamiento y desgaste por impacto.

Figura 23. Canasta de acero XAR 400 sin mecanizar (a) y mecanizada (b).



El torneado se hace sin ningún lubricante, es decir, el mecanizado es en seco, puesto que debido a la alta tecnología de los insertos recubiertos no es necesario la acción de algún fluido de corte o lubricante [2]. Sin embargo, según la tabla de la figura 8, se pueden utilizar lubricantes tales como aceite mineral, emulsión o de compuestos químicos y sintéticos para el mecanizado de las canastas de acero XAR 400, lo que a su vez significaría un aumento de costos afectando la economía del proceso de torneado. No obstante, el hecho que no se aplique ningún lubricante no implica que no haya partículas de desgaste tanto de la herramienta de corte como de la viruta de la pieza de trabajo, actuando como elemento interfacial entre las superficies de las mismas. Lo anterior genera el mecanismo de desgaste abrasivo por tres cuerpos (figura 2b).

Condiciones de corte en el torneado en la empresa INAL

Las condiciones de corte del proceso de torneado recolectadas mediante las visitas y entrevistas a INAL tanto para la operación de desbaste como de acabado se muestran a continuación:

- Diámetro inicial de la canasta (D_o) = 251 mm
- Diámetro final de la canasta (D_f) = 245 mm
- Avance (f) = 0,32 mm/rev
- Longitud de corte (L) = 677 mm

En la tabla 2 se muestran los valores calculados de las condiciones de corte haciendo uso de los datos anteriores.

Tabla 2. Condiciones de corte en el torneado en INAL.

Operación	Velocidad de rotación (<i>rev/min</i>)	Velocidad de corte* (<i>m/min</i>)	Profundidad de corte* (<i>mm</i>)	Velocidad de avance* (<i>mm/min</i>)	Tiempo de corte* (1 pasada) (<i>min</i>)
Desbaste	75	59,14	3	24	28,20
Acabado	120	94,62	3	38,40	38,40

Nota: * Valores calculados a partir de las ecuaciones (1), (2), (3) y (4).

Las condiciones de corte recomendadas por Kalpakjian y Schmidt [2] según el (anexo A) para el torneado teniendo en cuenta los materiales de la herramienta de corte y de la pieza de trabajo se muestran en la tabla 3. La tabla 3 muestra los intervalos de las condiciones de corte para los cuales es posible realizar el proceso de torneado teniendo en cuenta los materiales tanto de la herramienta de corte como de la pieza de trabajo

Tabla 3. Condiciones de corte recomendadas según anexo A

Operación	Velocidad de rotación* (<i>rev/min</i>)	Velocidad de corte (<i>m/min</i>)	Profundidad de corte (<i>mm</i>)	Avance (<i>mm/rev</i>)	Tiempo de corte* (1 pasada) (<i>min</i>)
Desbaste	133-190	105-150	1,5-6,3	0,35	14,54-10,18
Acabado	76-291	60-230	0,5-7,6	0,15-1,1	59,38-2,11

Nota: * Valores calculados a partir de las ecuaciones (1) y (3).

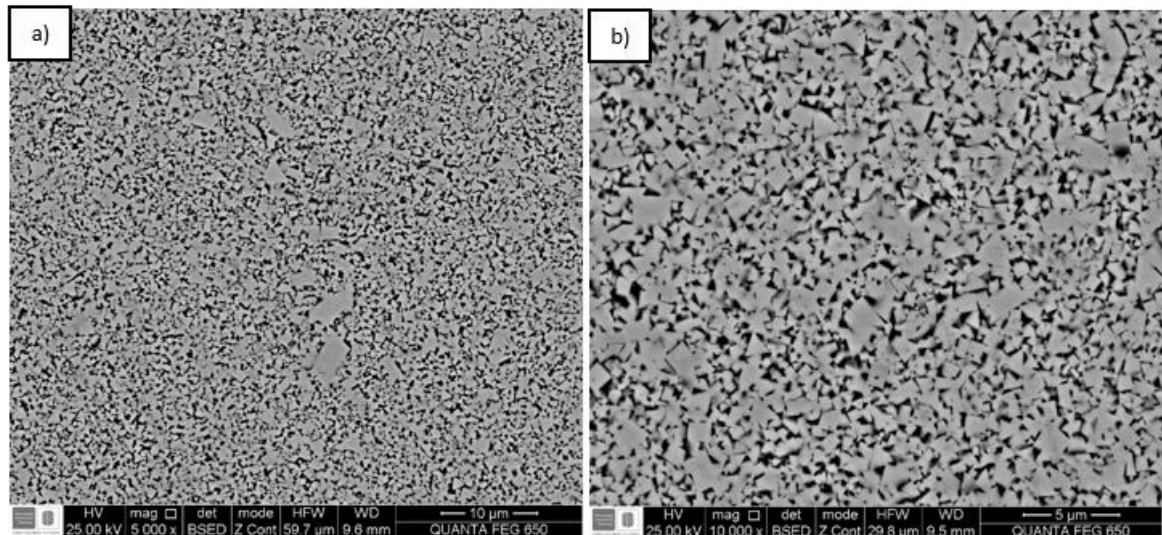
Según los resultados de la tabla 2, se puede observar que las condiciones de corte de INAL no son las adecuadas, debido a que la velocidad de corte es mayor en la operación de acabado que en la operación de desbaste [2]. Por otro lado, en la misma tabla se nota que el valor de la profundidad de corte y el avance son los mismos para ambas operaciones. Lo anterior teniendo en cuenta lo indicado por Kalpakjian y Schmidt [2], quien recomienda que la velocidad de corte para el proceso de desbaste debe ser mayor que para el proceso de acabado. La

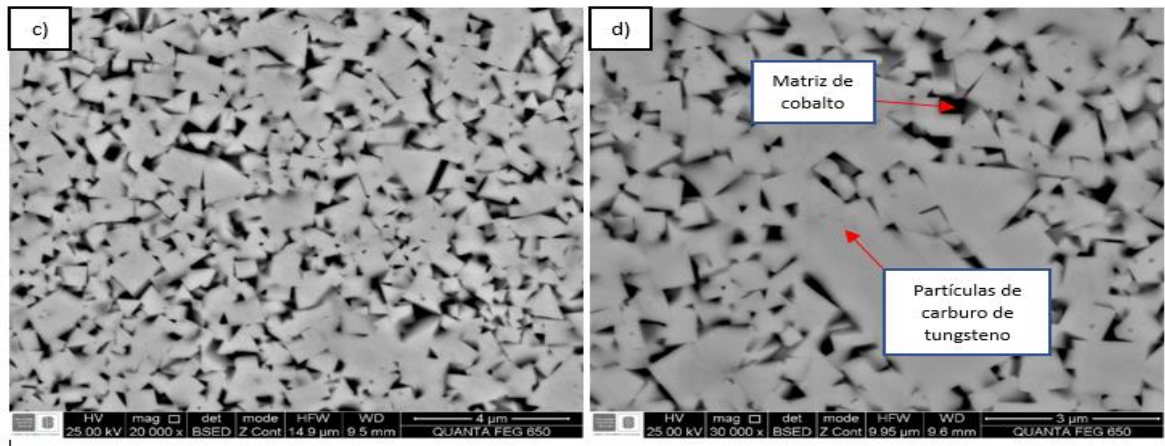
información de la tabla 3 comparada con la de la tabla 2, permite confirmar que el proceso de torneado realizado en INAL no se está llevando a cabo bajo las condiciones de corte recomendadas. Lo anterior es una de las causas por las cuales la vida útil del inserto WC-Co es muy baja.

4.2 CARACTERIZACIÓN DEL INSERTO WC-CO

En la figura 24 se muestra la microestructura obtenida del inserto WC-Co a diferentes aumentos. La microestructura observada es la característica de un material compuesto de WC-Co (figura 17), la cual está formada de una serie de partículas o granos aglomerados de carburo de tungsteno (fase gris) en una fase continua de material dúctil, en este caso una matriz de cobalto (fase oscura). Las partículas de carburo de tungsteno tienen geometría definida ya sean triángulos, cuadrados, rectángulos, entre otras.

Figura 24. Microestructura del inserto WC-Co por SEM a 5.000X (a), 10.000X (b), 20.000X (c) y 30.000X (d).





La figura 25 muestra algunas medidas del tamaño de las partículas de WC, estando la mayoría entre valores de 1 – 2 μm . No obstante, algunas de las partículas están tanto por encima como por debajo de dicho intervalo. El tamaño de grano del WC es fino y se puede clasificar como tipo 10-F, siendo “10” el contenido de cobalto y “F” el tamaño de grano fino, según lo indica la norma ASTM B390 – 92 [10]. Lo anterior se obtuvo comparando la microestructura del inserto WC-Co con las micrografías estándar de la norma [10]. Adicionalmente, con la información de la tabla 1 de la norma (tabla 4) y lo anterior, se determinó la clasificación del tamaño de grano del inserto WC-Co.

Figura 25. Medidas de las partículas WC del inserto WC-Co.

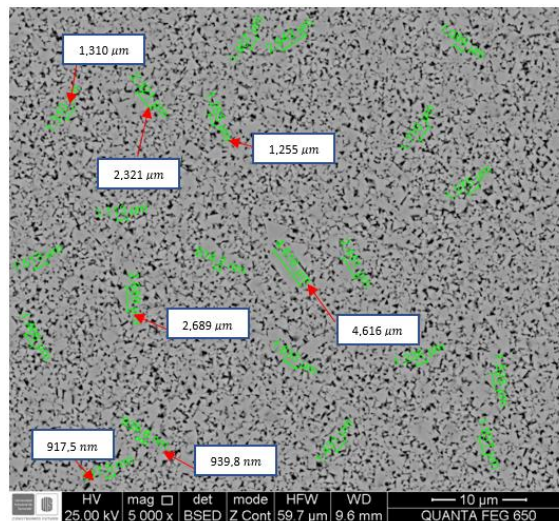
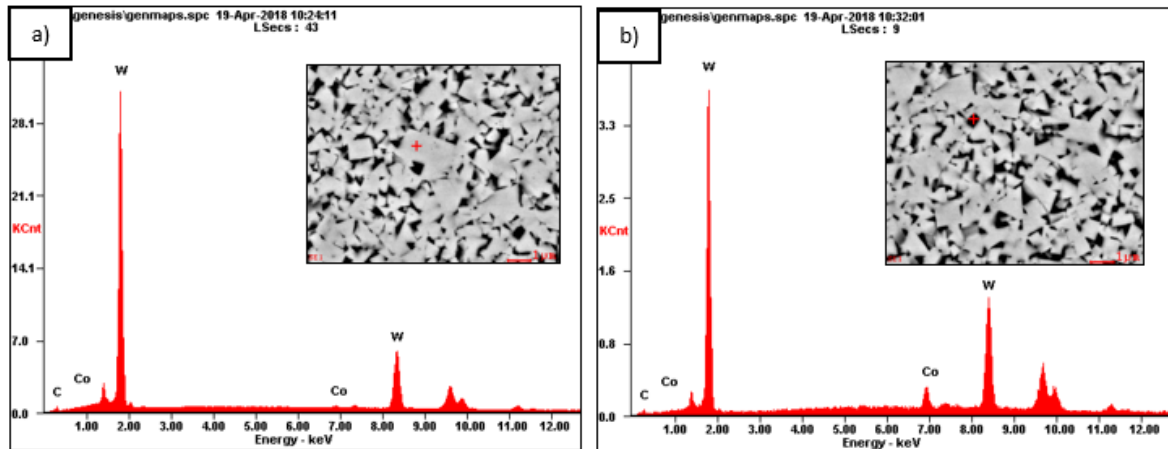


Tabla 4. Rango sugerido de valores para concentraciones de partículas de WC [10].

Número de la figura	Tamaño de grano	Alta concentración, μm	Baja concentración, μm	Clasificación
1 (a)	Fino	0.25 a 1.00	1.25 a 2.00	6-F
1 (b)	Mediano	2.00 a 5.00	0.75 a 1.00	6-M
1 (c)	Grueso	4.00 a 6.00	0.50 a 3.00	6-C
2 (a)	Fino	0.25 a 0.75	1.00 a 2.00	10-F
2 (b)	Mediano	2.00 a 4.00	0.50 a 1.00	10-M
2 (c)	Grueso	3.00 a 6.00	0.75 a 2.00	10-C
3 (a)	Fino	0.25 a 0.50	1.00 a 2.00	18-F
3 (b)	Mediano	1.50 a 4.00	0.50 a 1.00	18-M
3 (c)	grueso	3.00 a 6.00	0.75 a 2.00	18-C

En la figura 26 se muestran los espectros EDS de las fases de la microestructura del inserto WC-Co. La fase gris (figura 26a) muestra claramente un alto contenido de tungsteno y muy poca cantidad de cobalto lo que verifica que las partículas grises son de carburo de tungsteno. La fase oscura muestra mayor cantidad de cobalto con respecto a la fase gris, por lo cual se puede afirmar que la fase oscura corresponde a la matriz de cobalto.

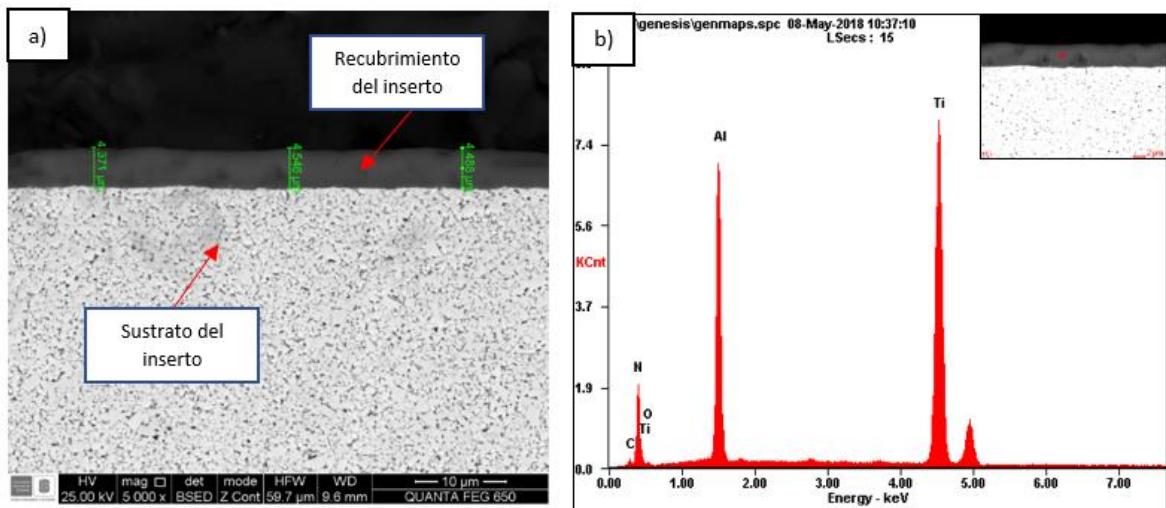
Figura 26. Espectros EDS de la fase gris (a) y de la fase oscura (b) de la microestructura del inserto WC-Co.



En la figura 27(a) se muestra una sección transversal de la microestructura del recubrimiento del inserto WC-Co donde es posible observar su recubrimiento. El espesor del recubrimiento tiene un valor aproximado de $4,3 \mu\text{m}$ lo cual es ideal,

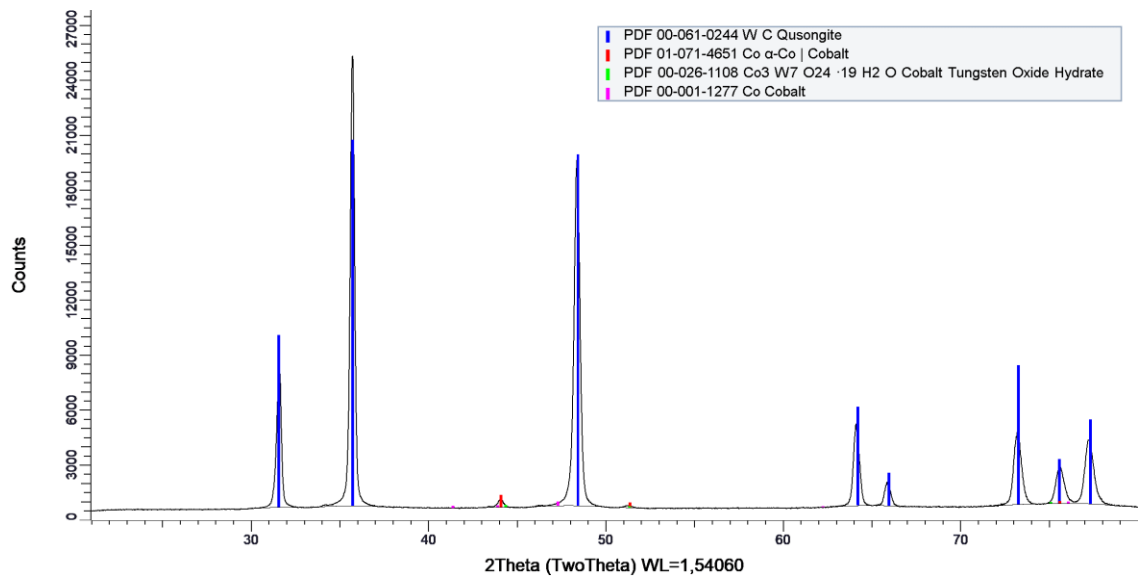
puesto que éstas herramientas de corte deben tener un espesor de recubrimiento entre 2 – 15 μm [2] para que su desempeño sea el apropiado en las operaciones de corte del torneado. Adicionalmente, en la figura 27 (b) se muestra es espectro EDS del recubrimiento. Los resultados muestran un alto contenido de titanio, aluminio y nitrógeno con lo cual se puede afirmar que es un recubrimiento de nitruro de titanio aluminio (TiAlN) y también de acuerdo a su color dorado lo cual es característico de este tipo de recubrimientos [2].

Figura 27. Espesor (a) y espectro EDS (b) del recubrimiento del inserto WC-Co.



En la figura 28 se muestra el difractograma de rayos X del inserto WC-Co. Los picos de difracción de mayor intensidad corresponden a la fase WC Qusongita (PDF 00-061-0244), la cual es una fase cristalina del WC con estructura cristalina dipiramidal ditrigonal hexagonal [11].

Figura 28. Difractograma de Rayos X del inserto WC-Co.



Por otra parte, los picos de difracción de menor intensidad corresponden a la fase α - Co (PDF 01-071-4651), la cual es una fase cristalina del Co, sin embargo, estos picos son de muy poca intensidad lo cual podría ser por el bajo contenido de Co.

En la tabla 5 se muestran los resultados de dureza del inserto WC-Co, los cuales corresponden a un valor promedio de 90 HRA, que concuerda con los valores de dureza de los carburos de tungsteno indicados en ASM Metals Handbook [12] (anexo B) para el carburo de tungsteno 90% de WC y 10% de Co. El valor de dureza de 90 HRA para el inserto WC-Co no es el adecuado para las operaciones de corte interrumpido en el proceso del torneado, ya que para éstas es recomendado un carburo de tungsteno con mayor contenido de cobalto, es decir, con menor dureza y mayor tenacidad [3].

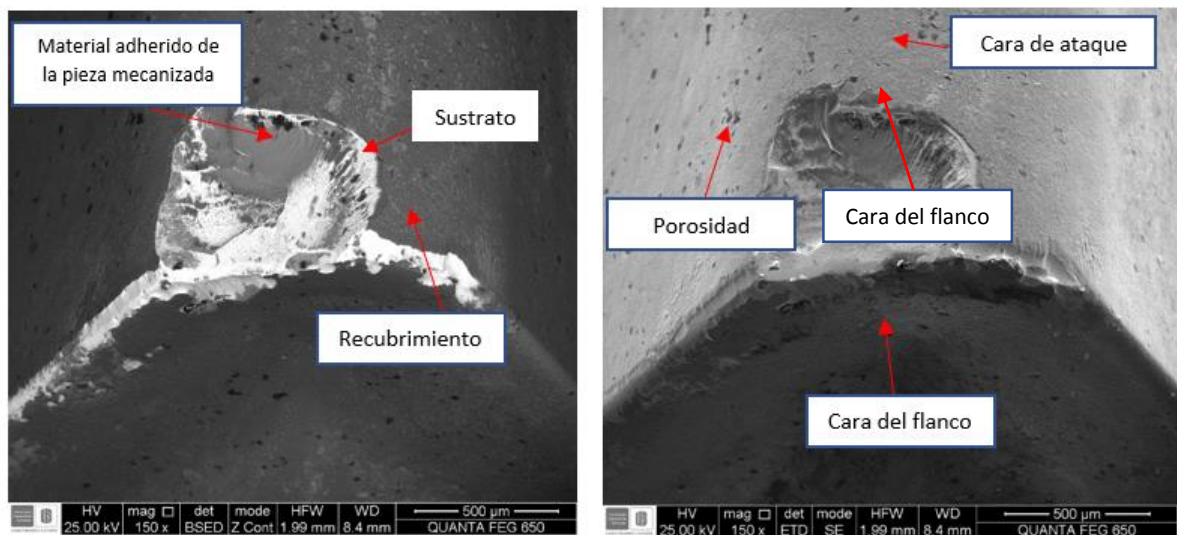
Tabla 5. Resultados de dureza del inserto WC-Co.

Medidas	Dureza
1	89 HRA
2	90 HRA
3	90 HRA
4	90 RA

4.3 CARACTERIZACIÓN DE LA SUPERFICIE DESGASTADA DEL INSERTO WC-CO

En la figura 29 se muestra la superficie desgastada de una punta de corte del inserto WC-Co con su cara de ataque y de flanco. En la figura 29 se observa material removido de la punta de corte del inserto de carburo de tungsteno debido a los mecanismos de desgaste que la afectaron durante el proceso de torneado. El recubrimiento se encuentra totalmente removido en las partes de la punta de corte donde hubo la remoción del material, es decir, el recubrimiento se desgastó por completo. Adicionalmente, se observa la presencia de porosidad en el recubrimiento, debido a una posible mala fabricación lo cual podría afectar el desempeño de la herramienta de corte.

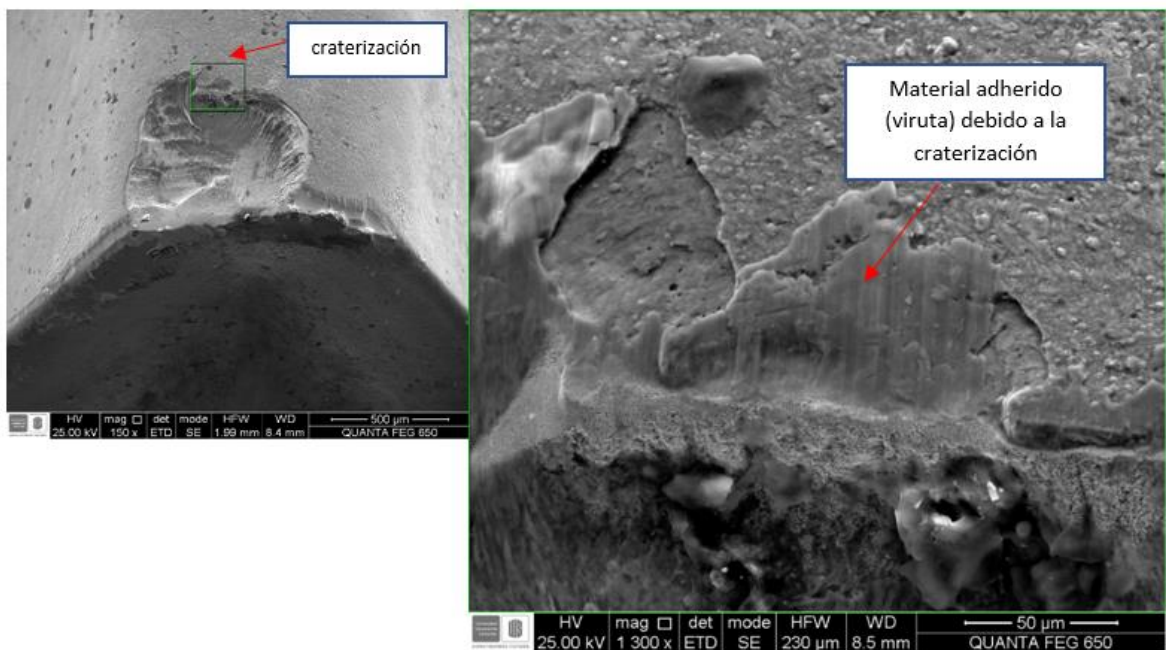
Figura 29. Superficie desgastada de la punta de corte del inserto a 150X mediante SEM.



Adicionalmente, en el sustrato del inserto se encontraron señales de material adherido de la pieza de trabajo, lo cual demuestra claramente la acción del mecanismo de desgaste adhesivo. El desgaste de la herramienta de corte ocurre en dos lugares: en la cara de ataque y en la cara del flanco [3].

En la figura 30 se muestra la superficie desgastada de la cara de ataque del inserto WC-Co. El desgaste de la cara de ataque de la herramienta muestra la adhesión de material de la pieza de trabajo por la acción del tipo de desgaste por deslizamiento, el cual actúa debido al contacto de movimiento relativo de las superficies del inserto y la pieza de trabajo y a los altos esfuerzos que contribuyen al desgaste. Adicionalmente, ocurre deslizamiento de la viruta a lo largo de la superficie de la herramienta, lo cual ocasiona que la craterización o el desgaste en la cara de ataque aumente debido al mecanismo de desgaste adhesivo y también al abrasivo, concordando así con la literatura [3].

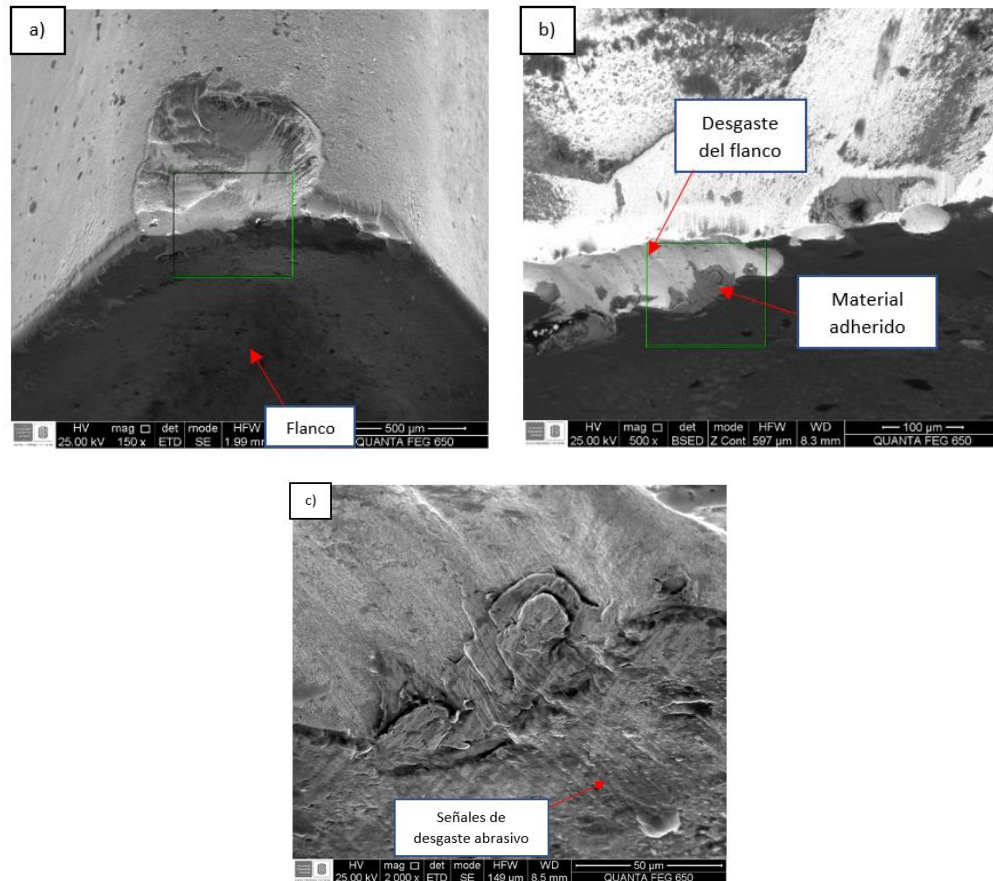
Figura 30. Superficie desgastada de la cara de ataque del inserto a 1.300X.



En la figura 31 se muestra el desgaste del flanco de la punta de la herramienta de corte. El desgaste del flanco de la punta de corte del inserto muestra que hubo desplazamiento de material debido al rozamiento o fricción causada por la presencia de partículas duras durante el contacto en movimiento relativo de las dos superficies. Esta remoción de material se debe al mecanismo de desgaste abrasivo

por dos cuerpos (figura 2a) por la acción de rugosidades duras pertenecientes a la superficie de la pieza de trabajo durante la operación de desbaste en el torneado tal como se observa en la figura 31c donde se muestran señales de desgaste abrasivo. Adicionalmente como el proceso de corte es interrumpido, no solo actúa el tipo de desgaste por deslizamiento sino también el tipo de desgaste por impacto.

Figura 31. Superficie desgastada del flanco del inserto.

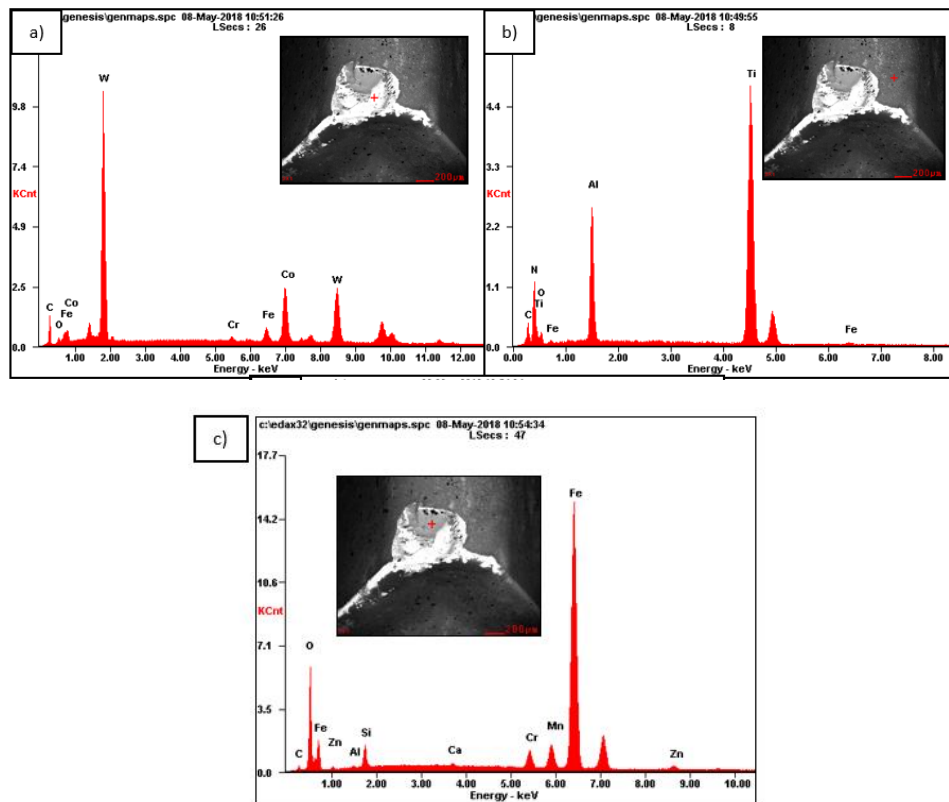


En la figura 32 se muestran los espectros EDS de la punta de corte desgastada del inserto WC-Co. Los resultados del sustrato de la herramienta de corte (figura 32a) muestran alto contenido de carburo de tungsteno y cobalto, lo cual confirma que el inserto es de WC-Co. Sin embargo, el espectro de análisis realizado muestra pequeñas cantidades de hierro y cromo provienen de material adherido de la pieza

de trabajo, es decir, no hacen parte del sustrato de la herramienta de corte. El espectro EDS recubrimiento del inserto (figura 32b) tiene un alto porcentaje de titanio, nitrógeno y aluminio lo cual confirma como se mencionó en la sección 5.2 que es de nitruro de titanio aluminio (TiAlN).

En la figura 32c se muestra el espectro EDS de la zona de la punta de corte donde hay señales de un posible material adherido de la pieza de trabajo, éstas contienen elementos como hierro (en gran cantidad), cromo, manganeso, zinc, silicio y carbono, por lo cual se puede afirmar que el material adherido es de la pieza de trabajo ya que éste contiene los mismos elementos en su composición química que los del material de las canastas como se muestra la tabla 1.

Figura 32. Espectros EDS del sustrato (a), del recubrimiento (b) y del material adherido (de la pieza de trabajo) (c) de la punta de corte desgastada.



5. DIAGNÓSTICO DEL COMPORTAMIENTO TRIBOLÓGICO DEL INSERTO WC-CO-TIALN

La caracterización de la punta de corte del inserto WC-Co mostró que el recubrimiento se encuentra removido en las zonas de la cara de ataque y de la cara del flanco debido al mal desempeño de la herramienta de corte en el proceso de torneado. Por otra parte, se observó adhesión de material de la pieza de trabajo en la superficie de la herramienta, lo cual es inadecuado porque con eso se demuestra la baja vida útil del inserto WC-Co, ya que su superficie de corte contiene otro material.

La caracterización del inserto permitió verificar que el material es uno de los mejores materiales disponibles en la actualidad (WC-Co-TiAlN). El espesor del recubrimiento es ideal, sin embargo, para el proceso de torneado con corte interrumpido es recomendado un inserto WC-Co no recubierto, debido a que el recubrimiento tiende a desgastarse más rápido cuando está bajo las condiciones de corte mencionadas [3]. Adicionalmente, como se observó en la sección 5.3, el recubrimiento TiAlN posee porosidad lo cual podría ser una causa por la cual éste se desgaste prematuramente ya que la porosidad puede afectar su adherencia al sustrato del inserto. Por otra parte, suponiendo el mecanizado con un inserto no recubierto, la dureza del sustrato de la herramienta de corte es inadecuada, puesto que para el óptimo desempeño de esta herramienta estando bajo condiciones de corte interrumpido, es recomendada una con menor dureza y mayor tenacidad.

Lo anterior es posible al utilizar un sustrato con mayor contenido de Co [3]. Por último, el análisis de las condiciones operativas del proceso de torneado de INAL evidenciaron valores inadecuados en los procesos de desbaste y acabado según lo indica la literatura. Lo anterior es otra de las causas probables por las cuales el inserto WC-Co se desgasta rápidamente, debido a que las condiciones operativas

de corte inadecuadas son un factor muy influyente para reducir la vida útil de la herramienta de corte según lo analizado en la sección 5.1.

6. CONCLUSIONES

El presente proyecto de grado permitió concluir lo siguiente:

1. El desgaste prematuro de la herramienta de corte puede tener dos causas de acuerdo al análisis realizado, como la selección del material de la herramienta para el mecanizado interrumpido y las condiciones operativas inadecuadas del proceso de torneado en INAL.
2. La selección de un material de una herramienta de corte para cumplir su función óptima en la industria no sólo depende de sus propiedades mecánicas sino de las condiciones operativas bajo las cuales será sometido.
3. El análisis tribológico de las herramientas de corte en los procesos de mecanizado en la industria es indispensable a la hora de encontrar alternativas de solución de problemas en cualquier ámbito, buscando así la optimización tanto en la producción como en la economía.
4. El presente proyecto de grado contribuyó a promover el vínculo de la UIS con las empresas de la región.

7. RECOMENDACIONES

1. La empresa INAL debe realizar un control de calidad de las herramientas de corte con el fin de verificar que los materiales no contengan defectos.
2. Se recomienda modificar las condiciones operativas de los procesos de mecanizado en INAL de acuerdo con lo recomendado por el proveedor. Adicionalmente, se recomienda solicitarle al proveedor de las herramientas de corte sus especificaciones técnicas.
3. Se recomienda utilizar un inserto WC-Co sin recubrimiento y con mayor contenido de Co para el proceso de mecanizado interrumpido.
4. Se recomienda realizar ensayos electroquímicos al inserto WC-Co-TiAlN tales como Voltamperometrías y Espectroscopía de Impedancia Electroquímica y ensayos de adhesión con el fin de analizar los posibles defectos en el recubrimiento.
5. Se recomienda realizar un estudio de mayor profundidad donde se comparen el desempeño de varias herramientas de corte (WC-Co con y sin recubrimiento con diferente %Co) e incorporando una optimización de las condiciones operativas en la empresa INAL.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] KARL-HEINZ ZUM GARH. Microestructure and wear of materials. New York. Elsevier Science Publishing Company Inc, 1987.
- [2] KALPAKJIAN S. y SCHMID S.R. Manufactura ingeniería y tecnología. México. PEARSON educación. Quinta edición, 2008.
- [3] GROOVER. M. P. Fundamentos de manufactura moderna. México. McGraw-Hill Interamericana. Tercera edición, 2007.
- [4] BHUSHAN B. Modern tribology handbook principles of tribology. Florida, USA. CRC Press LLC. Volume 2, 2001.
- [5] JIA, K. y FISHER, T.” Sliding wear of conventional and nano structured cemented carbides”, Wear 203-204 (1997) 310-3018. 34. ANAND, K. y CONRAD, H; “Microstructure effects”.
- [6] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS B 665 – 03 “Standard Guide for Metallographic Sample Preparation of Cemented Tungsten Carbides”, 2013.
- [7] Vander Voort. Metallography – Principles and Practice, 2000.
- [8] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS B 294 – 17 “Standard Test Method for Hardness Testing of Cemented Carbides”, 2017.
- [9] ThyssenKrupp Steel Europe. Acero estructural antiabrasivo especial [en línea], [revisado el 28 de julio de 2018]. Disponible en Internet:

https://www.thyssenkrupp.cl/media/media/aceros/aceros_antiabrasivos/aceros_antiabrasivos_xar/xar400/xar_400_es.pdf.

[10] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS B 390 – 92 “Standard Practice for Evaluating Apparent Grain Size and Distribution of Cemented Tungsten Carbides”, 2006.

[11] Hudson Institute of Mineralogy. Qusongite Mineral Data [Online], [05 october 2018]. Available on Internet: <http://webmineral.com/data/Qusongite.shtml#.W74mO2gzaUI>.

[12] ASM METALS HANDBOOK. Machining. ASM INTERNATIONAL. 9 edition, 1989.

BIBLIOGRAFIA

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS B 294 – 17 “Standard Test Method for Hardness Testing of Cemented Carbides”, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS B 390 – 92 “Standard Practice for Evaluating Apparent Grain Size and Distribution of Cemented Tungsten Carbides”, 2006.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS B 665 – 03 “Standard Guide for Metallographic Sample Preparation of Cemented Tungsten Carbides”, 2013.

ASM METALS HANDBOOK. Machining. ASM INTERNATIONAL. 9 edition, 1989.

BHUSHAN B. Modern tribology handbook principles of tribology. Florida, USA. CRC Press LLC. Volume 2, 2001.

GROOVER. M. P. Fundamentos de manufactura moderna. México. McGraw-Hill Interamericana. Tercera edición, 2007.

Hudson Institute of Mineralogy. Qusongite Mineral Data [Online], [05 october 2018]. Available on Internet: <http://webmineral.com/data/Qusongite.shtml#.W74mO2gzaUI>.

JIA, K. y FISHER, T.” Sliding wear of conventional and nano structured cemented carbides”, Wear 203-204 (1997) 310-3018. 34. ANAND, K. y CONRAD, H; “Microstructure effects”.

KALPAKJIAN S. y SCHMID S.R. Manufactura ingeniería y tecnología. México. PEARSON educación. Quinta edición, 2008.

KARL-HEINZ ZUM GARRH. Microestructure and wear of materials. New York. Elsevier Science Publishing Company Inc, 1987.

ThyssenKrupp Steel Europe. Acero estructural antiabrasivo especial [en línea], [revisado el 28 de julio de 2018]. Disponible en Internet: https://www.thyssenkrupp.cl/media/media/aceros/aceros_antiabrasivos/aceros_antiabrasivos_xar/xar400/xar_400_es.pdf.

Vander Voort. Metallography – Principles and Practice, 2000.

ANEXOS

Anexo A. Tabla de Recomendaciones Generales para Operaciones de Torneado

Tabla de recomendaciones generales para operaciones de torneado [2].

Recomendaciones generales para operaciones de torneado							
Material de la pieza de trabajo	Herramienta de corte	Condiciones iniciales de propósito general			Intervalo para rectificado y acabado		
		Profundidad de corte, mm (pulg)	Avance, mm/rev (pulgadas/rev)	Velocidad de corte, m/min (pies/min)	Profundidad de corte, mm (pulg)	Avance, mm/rev (pulgadas/rev)	Velocidad de corte, m/min (pies/min)
Aceros de bajo carbono y de libre maquinado	Carburo sin recubrimiento	1.5-6.3 (0.06-0.25)	0.35 (0.014)	90 (300)	0.5-7.6 (0.02-0.30)	0.15-1.1 (0.006-0.045)	60-135 (200-450)
	Carburo con recubrimiento de cerámico	"	"	245-275 (800-900)	"	"	120-425 (400-1400)
	Carburo con triple recubrimiento	"	"	185-200 (600-650)	"	"	90-245 (300-800)
	Carburo con recubrimiento de TiN	"	"	105-150 (350-500)	"	"	60-230 (200-750)
	Cerámico de Al ₂ O ₃	"	0.25 (0.010)	395-440 (1300-1450)	"	"	365-550 (1200-1800)
	Cermet	"	0.30 (0.012)	215-290 (700-950)	"	"	105-455 (350-1500)
Aceros de medio y alto carbono	Carburo sin recubrimiento	1.2-4.0 (0.05-0.20)	0.30 (0.012)	75 (250)	2.5-7.6 (0.10-0.30)	0.15-0.75 (0.006-0.03)	45-120 (150-400)
	Carburo con recubrimiento de cerámico	"	"	185-230 (600-750)	"	"	120-410 (400-1350)
	Carburo con triple recubrimiento	"	"	120-150 (400-500)	"	"	75-215 (250-700)
	Carburo con recubrimiento de TiN	"	"	90-200 (300-650)	"	"	45-215 (150-700)
	Cerámico de Al ₂ O ₃	"	0.25 (0.010)	335 (1100)	"	"	245-455 (800-1500)
	Cermet	"	0.25 (0.010)	170-245 (550-800)	"	"	105-305 (350-1000)
Fundición de hierro gris	Carburo sin recubrimiento	1.25-6.3 (0.05-0.25)	0.32 (0.013)	90 (300)	0.4-12.7 (0.015-0.5)	0.1-0.75 (0.004-0.03)	75-185 (250-600)
	Carburo con recubrimiento de cerámico	"	"	200 (650)	"	"	120-365 (400-1200)
	Carburo con recubrimiento de TiN	"	"	90-135 (300-450)	"	"	60-215 (200-700)
	Cerámico de Al ₂ O ₃	"	0.25 (0.010)	455-490 (1500-1600)	"	"	365-855 (1200-2800)
	Cerámico de SiN	"	0.32 (0.013)	730 (2400)	"	"	200-990 (650-3250)

Anexo B. Valores Numéricos de las Propiedades de los Carburos de Tungsteno

Valores numéricos de las propiedades de los carburos de tungsteno [12].

Composición nominal	Tamaño de grano	Dureza [HRA]	Esfuerzo transversal [MPa]	Esfuerzo de compresión [MPa]	Módulo de elasticidad [GPa]
97WC-3Co	Mediano	92.5-93.2	1590	5860	641
94WC-6Co	Fino	92.5-93.1	1790	5930	614
	Mediano	91.7-92.2	2000	5450	648
	Grueso	90.5-91.5	2210	5170	641
90WC-10Co	Fino	90.7-91.7	3100	5170	620
	Grueso	87.4-88.2	2760	4000	552
84WC-16Co	Fino	89	3380	4070	524
	Grueso	86.0-87.5	2900	3860	524
75WC-25Co	Mediano	83-85	2550	3100	483
71WC-12.5TiC-12TaC-4.5Co	Mediano	92.1-92.8	1380	5790	565
72WC-8TiC-11.5TaC-8.5Co	Mediano	90.7-91.5	1720	5170	558

Anexo C. Características Generales de Operación de los Materiales para las Herramientas de Corte

Características generales de operación de los materiales para las herramientas de corte [2].

Características generales de operación de los materiales para herramientas de corte			
Materiales para herramientas	Características generales	Modos de desgaste o falla de las herramientas	Limitaciones
Aceros de alta velocidad	Alta tenacidad, resistencia a la fractura, amplio intervalo de cortes de desbaste y acabado, buenos para cortes interrumpidos.	Desgaste del flanco, craterización.	Baja resistencia en caliente, capacidad limitada de endurecimiento y limitada resistencia al desgaste.
Carburos no recubiertos	Alta dureza para un amplio intervalo de temperaturas, tenacidad, resistencia al desgaste, variedad de aplicaciones amplia y versátil.	Desgaste del flanco, craterización.	No se puede usar a bajas velocidades debido al soldado en frío de las virutas y el microastillado.
Carburos recubiertos	Mejor resistencia al desgaste que los carburos no recubiertos, mejores propiedades térmicas y de fricción.	Desgaste del flanco, craterización.	No se puede usar a bajas velocidades debido al soldado en frío de las virutas y el microastillado.
Cerámicos	Alta dureza a temperaturas elevadas, alta resistencia al desgaste abrasivo.	Muescado de línea de profundidad de corte, microastillado, fractura gruesa.	Baja resistencia mecánica y baja resistencia a la fatiga termomecánica.
Nitruro de boro cúbico policristalino (cBN)	Alta resistencia en caliente, tenacidad, resistencia del filo de corte.	Muescado de línea de profundidad de corte, astillado, oxidación, grafitización.	Baja resistencia y baja estabilidad química a temperaturas altas.
Diamante	Alta dureza y tenacidad, resistencia al desgaste abrasivo.	Astillado, oxidación, grafitización.	Baja resistencia y baja estabilidad química a temperaturas altas.