

ANÁLISIS DE PROBLEMAS DE DESGASTE EN BURILES DE ACERO RÁPIDO
PARA MECANIZADO EN LA INDUSTRIA.

GERMÁN OSWALDO ROSAS LEAL

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

2018

ANÁLISIS DE PROBLEMAS DE DESGASTE EN BURILES DE ACERO RÁPIDO
PARA MECANIZADO EN LA INDUSTRIA.

GERMÁN OSWALDO ROSAS LEAL

Trabajo de grado (proyecto de investigación) para optar al título de
Ingeniero Metalúrgico

Director

DR. CRISTIAN CAMILO VIAFARA ARANGO

Profesor Asociado

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

2018

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, mi esposa, mi hijo y José Leonardo Cuervo Silva por el apoyo brindado en cada momento de mi vida académica, quienes me motivaron a ser mejor persona y mejor profesional.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	13
1. MARCO TEÓRICO.....	15
1.1. MAQUINADO	15
1.2. HERRAMIENTA DE CORTE.....	17
1.3. SISTEMA TRIBOLÓGICO Y MECANISMOS DE DESGASTE	19
2. OBJETIVOS	22
3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	23
3.1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	24
3.2. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN SOBRE LA OPERACIÓN DE LA HERRAMIENTA DE CORTE	25
3.3. CARACTERIZACIÓN DE LA SUPERFICIE DE DESGASTE Y DEL MATERIAL DE LA HERRAMIENTA.....	25
3.4. ELABORACIÓN DE PROTOCOLO DE MAQUINADO.....	26
3.5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	26
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	27
4.1. SISTEMA TRIBOLÓGICO BAJO ANÁLISIS	27
4.2. CARACTERIZACIÓN DE LA HERRAMIENTA DE CORTE	28
4.3. CARACTERIZACIÓN DE LA SUPERFICIE DESGASTADA DE LA HERRAMIENTA.....	30
4.4. PROTOCOLO DE MAQUINADO	32
5. CONCLUSIONES.....	33

6.	RECOMENDACIONES.....	34
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	35
	BIBLIOGRAFÍA.....	37
	ANEXOS	38

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1. Efectos de la velocidad de avance en un proceso de maquinado .</i>	<i>16</i>
<i>Tabla 2. Recomendación geométrica para herramientas de corte en un proceso de maquinado .</i>	<i>19</i>
<i>Tabla 3. Fluidos de corte para maquinado .</i>	<i>21</i>
<i>Tabla 4. Dureza promedio materiales de trabajo INAL .</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 5. Dureza herramienta de corte INAL. .</i>	<i>28</i>

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Valor agregado en materias primas en un proceso de maquinado	15
Figura 2. Condiciones de corte en un proceso de maquinado	16
Figura 3. Dureza vs Temperatura en materiales para herramientas	17
Figura 4. Geometría básica para una herramienta de corte.....	18
Figura 5. Elementos de un sistema tribológico	19
Figura 6. Formación de viruta: discontinua (a), continua (b), continua con acumulación en el borde (c) y dentada (d)	20
Figura 7. Representación del desgaste adhesivo (a), abrasivo (b), triboquímico (c) y por fatiga (d)	22
Figura 8. Etapas y secuencia de la metodología.....	24
Figura 9. Micrografía óptica de la microestructura del material de la herramienta de corte.....	29
Figura 10. Micrografía obtenida en SEM del material de la herramienta de corte.	29
Figura 11. Micrografía obtenida por SEM del filo de corte de la herramienta.	30
Figura 12. Micrografía SEM de la superficie desgastada.....	31
Figura 13. Resultado EDX en la zona 1 en la herramienta de corte.	31
Figura 14. Resultado EDX en la zona 2 en la herramienta de corte.	32
Figura 15. Ángulos de corte para las diferentes herramientas de corte	39
Figura 16. Tipos de distribución en un proceso de maquinado: Negativa (a) y Positiva (b).....	40
Figura 17. Salida superior de refrigerante en un proceso de maquinado.....	41

LISTA DE ANEXOS

<i>Anexo A. PROTOCOLO DE MAQUINADO.....</i>	<i>38</i>
<i>Anexo B. VARIABLES DE OPERACION EN PROCESOS DE MAQUINADO</i>	<i>43</i>

RESUMEN

TÍTULO: ANÁLISIS DE PROBLEMAS DE DESGASTE EN BURILES DE ACERO RÁPIDO PARA MECANIZADO EN LA INDUSTRIA*

AUTOR: Rosas Leal Germán Oswaldo**

PALABRAS CLAVES: Herramientas de corte, Maquinado, Desgaste, Acero AISI M2

DESCRIPCIÓN: El siguiente proyecto de investigación se realizó en colaboración al sector industrial de Bucaramanga en el área de la metalurgia mecánica, con el fin de identificar las posibles causas para el corto tiempo de vida media de la herramienta de corte usada por Industrias Acuña Limitada (INAL) en los procesos de maquinado para la fabricación de maquinaria para el sector agrícola, especializada en la extracción de aceite natural. El estudio se llevó a cabo mediante el uso de técnicas de caracterización para analizar una herramienta suministrada por la empresa. Se realizaron pruebas de composición química, ensayo de dureza Rockwell, análisis metalográfico, Microscopia Electrónica de Barrido (MEB) y Espectroscopia de Dispersión de Rayos X. Los resultados obtenidos indican que el material de la herramienta de corte cuenta con las características adecuadas para realizar correctamente el trabajo de maquinado. Sin embargo, la información suministrada por el personal de la empresa sugiere que para el proceso de maquinado se pueden presentar fallas en parámetros de corte recomendados en la literatura y los catálogos comerciales para la herramienta en cuestión. Se elaboró un protocolo de maquinado que proporciona los valores de los parámetros de corte, geometría de la herramienta de corte junto a recomendaciones para un maquinado correcto y seguro.

*Proyecto de grado (modalidad, proyecto de investigación.)

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales.

Director: Cristian Camilo Viafara Arango

ABSTRACT

TITLE: ANALYSIS OF WEARING PROBLEMS IN FAST STEEL BURILES FOR MACHINING IN THE INDUSTRY *

AUTHORS: Rosas Leal Germán Oswaldo**

KEYWORDS: Degree project, Machining, Cutting tools.

DESCRIPTION: The following research project was carried out in collaboration with the industrial sector of Bucaramanga in the air of mechanical metallurgy, in order to identify possible causes for the short half-life of the cutting tool used by Industrias Acuña Limitada (INAL) in the machining processes for the manufacture of machinery for the agricultural sector, specializing in the extraction of natural oil. The study was carried out through the use of characterization techniques to analyze a tool supplied by the company. Chemical composition tests, Rockwell hardness test, metallographic analysis, Scanning Electron Microscopy (SEM) and X-Ray Dispersion Spectroscopy were performed. The results obtained indicate that the material of the cutting tool has the proper characteristics to perform correctly the machining work. However, the information provided by the company's personnel suggests that for the machining process failures can occur in cutting parameters recommended in the literature and commercial catalogs for the tool in question. A machining protocol was developed that provides the values of the cutting parameters, geometry of the cutting tool together with recommendations for a correct and safe machining.

*Degree project (modality research project.)

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

INTRODUCCIÓN

En la industria de la manufactura se realizan diferentes procesos de fabricación, dentro de los cuales el maquinado ocupa un lugar destacado. El maquinado se lleva a cabo mediante el uso de herramientas de corte, las cuales se encargan de remover material superficial a una materia prima. En el proceso de maquinado se presentan problemas de desgaste en las herramientas de corte al entrar en contacto con el material a maquinar. Este desgaste puede generar paradas inesperadas, accidentes o deficiencias en el proceso, los cuales desembocan en un mayor gasto económico [1].

Se considera de vital importancia encontrar soluciones eficientes a la hora de reducir el desgaste, por lo cual se debe realizar un estudio del comportamiento de los materiales y sus condiciones de operación. Los factores a tener en cuenta al analizar el desgaste son: composición química y microestructura de la herramienta, lubricantes o elementos interfaciales, materiales a maquinar, medio ambiente y parámetros de maquinado [1, 5].

Industrias Acuña Limitada (INAL) es conocida en Bucaramanga y Colombia por la fabricación de maquinaria para el sector agrícola. La maquinaria fabricada requiere el uso de procesos de maquinado, en los cuales es fundamental contar con una elevada vida útil de la herramienta de corte. Los procesos de maquinado se realizan con herramientas de acero rápido M2 e insertos de tungsteno. Estas herramientas de corte son usadas para el maquinado de materiales como acero AISI 1040, acero AISI 4140 y aleaciones de aluminio.

Actualmente INAL ha encontrado que sus herramientas de corte de acero rápido AISI M2 presentan baja vida útil, ocasionando paradas inesperadas y retrasos en las entregas pactadas a sus clientes, generando un mayor gasto operacional. En este proyecto se realizará una caracterización del sistema tribológico del proceso de maquinado, con el fin de conocer las razones del pobre desempeño del material. Esta propuesta busca afianzar los vínculos entre la Universidad Industrial de

Santander y las empresas del área metropolitana, aportando conocimiento con el fin de reducir costos referentes a reposición de herramientas defectuosas.

Este proyecto se realizó en el ámbito de proyecto de investigación Análisis de problemas de desgaste de herramientas para la industria de la manufactura, con código 2303. Este proyecto fue dirigido por el profesor Cristian Viáfara y financiado por la Vicerrectoría de Investigación y Extensión (VIE) de la Universidad Industrial de Santander (UIS).

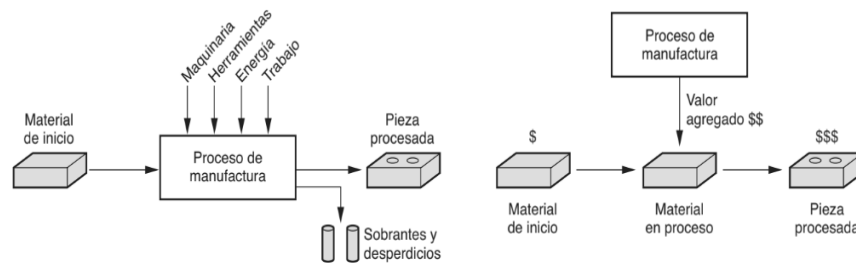
1. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se realizará una revisión de aspectos relacionados en el proceso de maquinado y su análisis tribológico. Esto se realiza con el fin de tener bases para realizar el diagnóstico de la herramienta de corte. Para esto se toma como principales referencias los libros de los autores Kalpajian y Schmid [2] y Groover [4].

1.1. MAQUINADO

Actualmente el maquinado se realiza para obtener un valor agregado de una materia prima como se puede ver en la figura 1, en la cual se observa como un material de inicio es transformado para obtener una pieza procesada con un valor agregado [2].

Figura 1. Valor agregado en materias primas en un proceso de maquinado [1].



El maquinado se basa en la remoción de masa en la materia prima por acción de una herramienta de corte, buscando obtener una forma deseada tras la remoción de la viruta. El proceso de maquinado posee varias ventajas, por ejemplo, todos los metales en estado sólido se pueden maquinar, se puede alcanzar diferentes formas geométricas con gran precisión dimensional y un excelente acabado superficial [4]. En el maquinado se tienen en cuenta factores como el acabado, la integridad de la pieza maquinada, la vida de la herramienta, la fuerza requerida, la potencia requerida y el control de la viruta, de los cuales la integridad de la herramienta y la

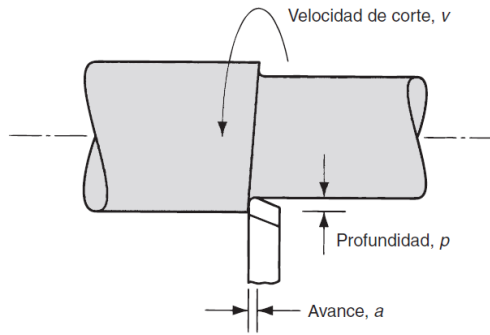
rugosidad superficial de la pieza maquinada son los factores más influyentes en los procesos de maquinado [2,4].

En los procesos de maquinado se tienen en cuenta aspectos esenciales como velocidad, profundidad y avance de corte. Se define como velocidad de corte la velocidad lineal de la periferia de la pieza que está en contacto con la herramienta, es decir, la cantidad de veces en el que punto de la circunferencia de la pieza de trabajo pasa por la herramienta de corte en un minuto. La velocidad de corte se expresa en metros por minuto (m/min) [2,4]. El avance o velocidad de avance en el torneado es la velocidad relativa entre la pieza y la herramienta, es decir, la velocidad con la que avanza el corte. Se debe tener en cuenta que cada herramienta puede cortar adecuadamente en un rango de velocidades de avance por cada revolución de la pieza. La velocidad de avance interfiere en varios aspectos del maquinado, en la tabla 1 se observan los efectos de las velocidades de avance [2]. La profundidad de corte depende de las especificaciones técnicas de la pieza a maquinar. En la figura 2 se observa la distribución de estos aspectos en un proceso de maquinado. Al conjunto de velocidad, avance y profundidad de corte se le llama condiciones de corte [2, 9].

Tabla 1. Efectos de la velocidad de avance en un proceso de maquinado [9].

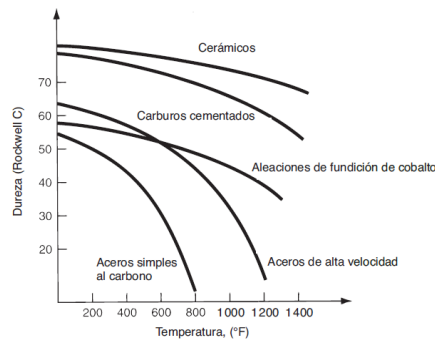
Velocidad de avance alta	Velocidad de avance baja
Viruta de mayor espesor	Viruta con menor espesor
Baja calidad superficial	Alta calidad superficial
Menor tiempo de corte	Mayor tiempo de corte
Menor desgaste de la herramienta	Mayor desgaste de la herramienta
Menor coste de maquinado	Mayor coste de maquinado

Figura 2. Condiciones de corte en un proceso de maquinado [4].



El proceso de maquinado se realiza con altas velocidades de corte, lo que implica una alta disipación de calor a causa de la fricción entre la superficie de la herramienta y la pieza de trabajo. En la figura 3 se observan los rangos de temperatura a los cuales son sometidas las herramientas de corte. Las altas temperaturas en este proceso generan un efecto negativo en la herramienta de corte. En la figura 3 se analiza el efecto de la temperatura sobre la herramienta de corte. Al incrementar la temperatura, disminuye la dureza de la herramienta [4].

Figura 3. Dureza vs Temperatura en materiales para herramientas [4].

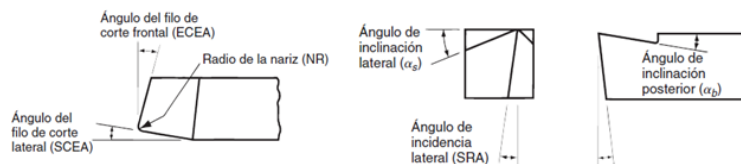


1.2. HERRAMIENTA DE CORTE

Una herramienta de corte se caracteriza por su capacidad para cortar metales a altas velocidades. Los aceros de herramienta poseen elementos aleantes como vanadio, tungsteno, molibdeno y cromo, los cuales mejoran las propiedades del acero como la dureza, la resistencia al impacto, la resistencia en caliente y la

resistencia a la abrasión [6]. La herramienta de corte debe tener ciertas características geométricas para realizar correctamente la remoción de material. En la figura 4 se observa la configuración geométrica usual de una herramienta de corte para maquinado. Esta configuración consta de cinco parámetros principales ángulo de corte lateral, radio de nariz, ángulo de corte frontal, ángulo de inclinación lateral y ángulo de inclinación posterior [2, 4]

Figura 4. Geometría básica para una herramienta de corte [4].



El ángulo de corte lateral establece la entrada de la herramienta en el material, además de reducir la fuerza que experimenta la herramienta al entrar en contacto con la pieza de trabajo. El radio de nariz determina la textura final de la superficie en el proceso de maquinado. Una herramienta con un radio de nariz pequeño produce marcas de avance muy pronunciadas en la superficie.

La herramienta de corte cuenta también con el ángulo de inclinación lateral y el ángulo de inclinación posterior los cuales se encargan de determinar el flujo de la viruta y la vida de la herramienta en un proceso de maquinado [4]. El ángulo de inclinación lateral controla la fricción entre la herramienta y la pieza de trabajo. Si el ángulo de inclinación lateral es muy grande puede astillar la punta de la herramienta. Por otro lado, si el ángulo de inclinación lateral es muy pequeño, puede generar un desgaste excesivo en la cara frontal de la herramienta. El ángulo de inclinación posterior se encarga de controlar la dirección del flujo de las virutas y la resistencia de la punta de la herramienta. Los ángulos de inclinación frontal positivos mejoran la operación de corte, reduciendo las fuerzas y temperaturas en el proceso de maquinado. Dependiendo del material de trabajo puede variar esta configuración geométrica. En la tabla 2 se observan los parámetros recomendados según sea el tipo de material a maquinar [2, 4].

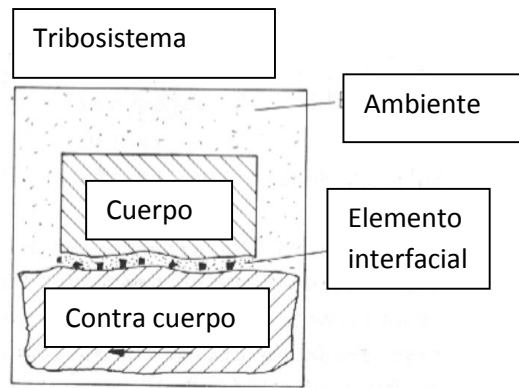
Tabla 2. Recomendación geométrica para herramientas de corte en un proceso de maquinado [2].

Acero de alta velocidad					
Material	Ataque posterior	Ataque lateral	Alivio de extremo	Alivio lateral	Filo de corte lateral y extremo
Aleaciones de aluminio y magnesio	20	15	12	10	5
Aleaciones de cobre	5	10	8	8	5
Aceros	10	12	5	5	15
Aceros inoxidables	5	8-10	5	5	15
Hierro fundido	5	10	5	5	15

1.3. SISTEMA TRIBOLÓGICO Y MECANISMOS DE DESGASTE

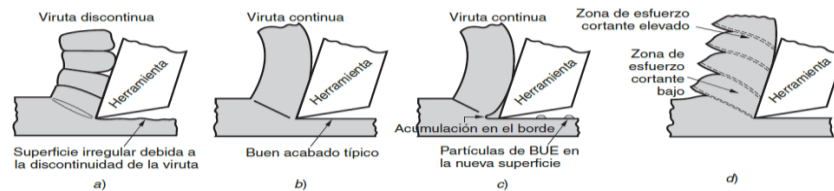
En los procesos de maquinado se debe tener en cuenta el sistema tribológico, el cual consta de todos los factores que intervienen en el proceso. En la figura 5 se observa los elementos que componen un sistema tribológico tales como cuerpo, contra cuerpo, elemento interfacial (lubricantes, partículas de material) y medio ambiente [5].

Figura 5.Elementos de un sistema tribológico [5].



Como se mencionó anteriormente, en el proceso de maquinado se genera una viruta como resultado del proceso. Esta viruta depende del material de trabajo y la operación de corte. En la figura 6 se aprecian cuatro tipos de viruta generada en este proceso, viruta discontinua (a), viruta continua (b), viruta continua con acumulación de borde (c) y viruta dentada (d).

Figura 6. Formación de viruta: discontinua (a), continua (b), continua con acumulación en el borde (c) y dentada (d) [4].



La viruta discontinua se genera en el maquinado de materiales frágiles con bajas velocidades de corte. Esta viruta genera un acabado superficial muy irregular además de generar alta fricción entre la superficie y la herramienta de corte. La viruta continua proporciona buenos acabados superficiales en la pieza maquinada. Esta viruta se genera en materiales dúctiles sometidos a grandes avances en el proceso de maquinado. La viruta continua con acumulación de borde "**built-up edge (BUE)**" se genera al aplicar bajas velocidades de corte, esta viruta generalmente se queda adherida a la cara inclinada de la herramienta. El BUE reduce la vida de la herramienta al desprender porciones de la cara inclinada de la herramienta, además de generar una superficie rugosa en el material de trabajo.

Finalmente, la viruta dentada se genera al maquinar materiales muy duros, sin embargo, se puede apreciar en el maquinado de aceros al carbono [4,5].

Como se indicó, en el proceso de maquinado se generan elevadas temperaturas por efecto de la fricción, lo cual disminuye la dureza de la herramienta. En los procesos de maquinado se lleva a cabo el uso de lubricantes. Estos lubricantes reducen la fricción y el desgaste en la herramienta, además de enfriar la zona de maquinado reduciendo la fuerza y potencia requerida en los procesos. En la tabla 3 se indican los lubricantes usados para diferentes materiales de trabajo.

Tabla 3. Fluidos de corte para maquinado [2].

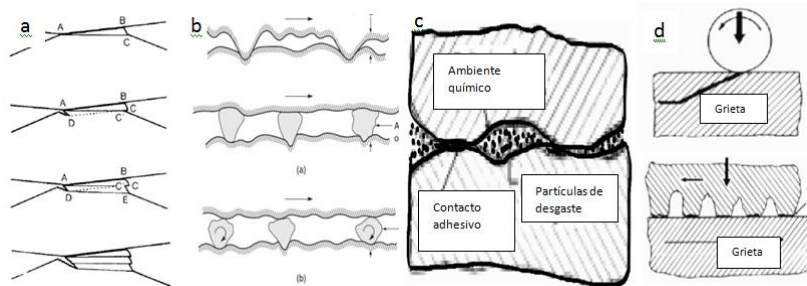
Material	Tipo de fluido
Aluminio	D, MO, E, MO+FO, CSN
Cobre	D, E, CSN, MO+FO
Acero al carbono y baja aleación	D, MO, E, CSN, EP
Acero inoxidable	D, MO, E, CSN
<i>Nota: CSN = químicos y sintéticos; D = seco; E = emulsión; EP = precisión extrema FO = aceite gaseoso y MO = aceite mineral.</i>	

El desgaste asociado a herramientas de corte puede ser abrasivo, adhesivo o químico, por tal razón, la selección del material de la herramienta es de vital importancia [1, 5]. El desgaste se define como la pérdida progresiva de material superficial en un cuerpo sólido. Este desprendimiento de material se puede generar por efectos mecánicos y químicos. El material removido puede ser expulsado, adherido a otro material o simplemente ser un nuevo agente dentro de un sistema tribológico. El autor Zum-Ghar define cuatro mecanismos: desgaste adhesivo, desgaste abrasivo, reacción triboquímica y desgaste por fatiga [5].

El desgaste adhesivo ocurre cuando dos superficies en contacto dinámico quedan adheridas fuertemente a causa de la fricción. En la figura 7(a) se observa este mecanismo de desgaste. En el desgaste adhesivo se genera un desprendimiento de material superficial en uno de los dos materiales, dejando material adherido a una de las dos superficies. El desgaste abrasivo ocurre al entrar en contacto dos

superficies con diferente dureza superficial. El desgaste abrasivo puede considerarse como desgaste de dos cuerpos o desgaste de tres cuerpos. En la figura 7(b) se observan los dos casos de desgaste abrasivo. El desgaste de dos cuerpos ocurre al entrar en contacto dinámico dos superficies con diferente dureza superficial, en donde el material más duro genera un desprendimiento superficial en el material más blando, mientras en el desgaste de tres cuerpos existe un material externo de mayor dureza el cual actúa como interfase entre las superficies. El desgaste abrasivo genera deformación plástica y fractura del material en contacto. Otro mecanismo de desgaste es la reacción triboquímica, la cual se genera en piezas sometidas a dos efectos, mecánico y químico. En la figura 7(c) se observa que la reacción triboquímica actúa como una combinación de procesos mecánicos y térmicos que ocurren en la interfase de las superficies en contacto y el ambiente. Este desgaste suele ser crítico ya que al tener 2 efectos (mecánico y químico) propicia un mayor deterioro en un menor lapso de tiempo. Existe a su vez el desgaste por fatiga, el cual ocurre por esfuerzos cíclicos y variables sobre un material. En la figura 7(d) se aprecia como los esfuerzos cíclicos pueden generar fracturas tanto superficiales como sub-superficiales, las cuales pueden llevar a la fractura total de la pieza.

Figura 7. Representación del desgaste adhesivo (a), abrasivo (b), triboquímico (c) y por fatiga (d) [3, 4].



2. OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

1. Realizar un diagnóstico de una herramienta de mecanizado usada para la fabricación de elementos de maquinaria de la empresa INAL.

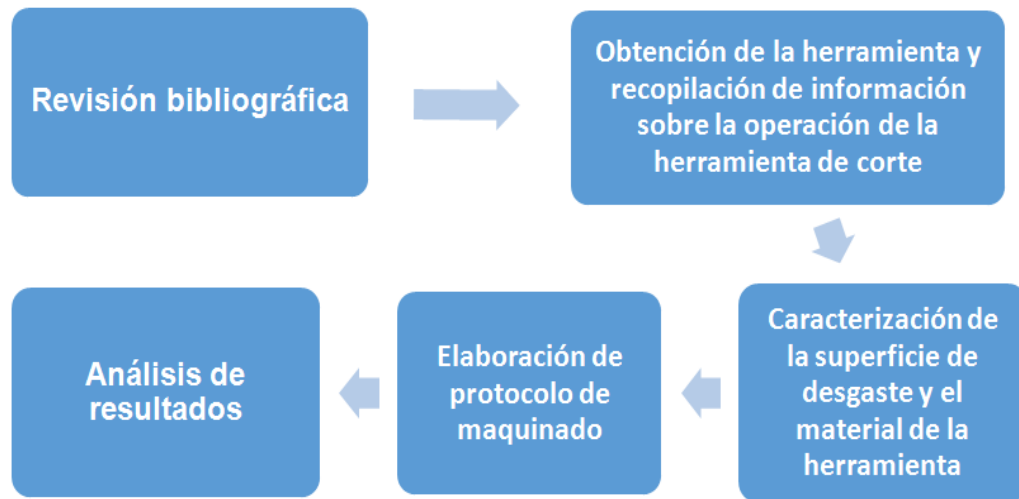
OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Realizar una caracterización del sistema tribológico del proceso de maquinado y la herramienta suministrada por la empresa INAL.
2. Establecer una relación entre las características del material de la herramienta en relación con su desempeño en desgaste.
3. Elaborar un protocolo de maquinado con el fin de mejorar el comportamiento tribológico de la herramienta de corte.

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En esta sección se presentan los detalles de las actividades realizadas con el fin de cumplir los objetivos propuestos. En la figura 8 se observa el diagrama de flujo de las actividades realizadas.

Figura 8. Etapas y secuencia de la metodología.



3.1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En este ítem se revisó información bibliográfica disponible sobre el proceso de maquinado y del desgaste en herramientas de corte. Se analizaron conceptos como: maquinado, herramienta de corte, sistema tribológico, lubricantes y mecanismos de desgaste. Esta información se obtuvo de libros especializados en materiales de autores como Hutchings y Shipway [1], Kalpajian y Schmid [2], Groover [4] y Zum Gahr [5]. Con la información obtenida se obtuvo un criterio técnico sobre las características esenciales de una herramienta de corte en un proceso de maquinado.

3.2. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN SOBRE LA OPERACIÓN DE LA HERRAMIENTA DE CORTE

En esta actividad se procedió a recopilar la información pertinente sobre el sistema tribológico y la herramienta a estudiar, la cual fue proporcionada por parte de la empresa INAL. Información como la ficha técnica de la herramienta utilizada, el historial operacional, los materiales maquinados, los lubricantes usados, el proveedor, el tipo de material usado como herramienta de corte, entre otros factores para realizar un correcto análisis. Se buscó con esta actividad identificar factores críticos relevantes para el bajo rendimiento de la herramienta de corte suministrada.

3.3. CARACTERIZACIÓN DE LA SUPERFICIE DE DESGASTE Y DEL MATERIAL DE LA HERRAMIENTA

Se realizó el análisis de la superficie desgastada de la herramienta de corte suministrada por INAL mediante el uso de microscopia electrónica de barrido (MEB) y Espectroscopia de Dispersión de Rayos X (EDX) en el Microscopio Electrónico de Barrido en el Laboratorio de Microscopia en instalaciones de UIS Guatiguará. Se realizó la toma de dureza en el Laboratorio de Metalografía perteneciente a la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales (EIMCM) de la UIS. Se procedió a realizar toma de dureza en 5 puntos aleatorios de la herramienta de corte. El procedimiento se realizó bajo la norma ASTM E18 en el durómetro Wilson con una carga de 150 kg y un cono de diamante como penetrador.

Se obtuvo la composición química de la herramienta en el Espectrofotómetro de Emisión Óptica por Chispa marca Bruker Maguellan en el Laboratorio de Espectroscopía perteneciente a la EIMCM de la UIS, se realizaron tres quemas al material obteniendo una composición promedio.

Se realizó el corte de la herramienta mediante el uso de disco de diamante, esto con el fin de obtener una probeta como muestra de la herramienta.

Se realizó el desbaste de la probeta a analizar mediante el uso de papel abrasivo número 80 hasta 1200. El pulido se llevó a cabo mediante el uso de paños y pasta de diamante marca Presi con una granulometría de 3 μm y 1 μm . En este proceso se usó lubricante marca Presi base agua y alcohol.

Se procedió a usar Nital al 2% como reactivo para revelar la microestructura de la muestra. El ataque se realizó mediante la inmersión de la probeta en el reactivo durante 30 segundos. Una vez pasado este tiempo se aplicó alcohol para detener la reacción y se secó mediante el uso de aire caliente.

Se obtuvo la micrografía de la probeta mediante el uso del Microscopio Óptico Olympus GX71 ubicado en el Laboratorio de Metalografía, además de obtener micrografías a mayores aumentos mediante el uso de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) y Espectroscopia de Dispersión de Rayos X (EDX), esto con el fin de observar la morfología y elementos aleantes en el acero de herramienta suministrada por la empresa INAL.

3.4. ELABORACIÓN DE PROTOCOLO DE MAQUINADO

En esta actividad se buscó enfatizar los aspectos más importantes en el proceso de maquinado. Se especificaron las velocidades, los avances y las profundidades de corte para el proceso empleando una herramienta de corte de acero AISI M2 y un inserto de carburo de tungsteno y cobalto (WC-Co) con recubrimiento y sin recubrimiento, teniendo en cuenta que estos parámetros son los únicos que se afectan al cambiar de herramienta. Se indica recomendaciones adicionales para un correcto uso del lubricante.

3.5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Esta actividad se efectuó una vez obtenidos los resultados de caracterización del material de la herramienta de corte suministrada por INAL. Se verificaron aspectos como composición química, microestructura y dureza con el fin de verificar si eran

acordes para el óptimo funcionamiento de la herramienta de corte suministrada por INAL. Este análisis se realizó con base en la bibliografía consultada.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos que se expondrán a continuación constan de la caracterización del sistema tribológico del proceso de maquinado y la caracterización de la herramienta de corte.

4.1. SISTEMA TRIBOLÓGICO BAJO ANÁLISIS

De acuerdo con la información suministrada por parte de INAL se identifican los factores más influyentes que intervienen en el proceso de maquinado.

- Medio (Medio ambiente de INAL)
- Cuerpo (Acero AISI M2)
- Contra cuerpo (Acero AISI 4140, acero AISI 1040 y aleaciones de aluminio)
- Elemento interfacial (Viruta, material desgastado de la herramienta, lubricante tipo emulsión)

El ambiente que rodea el proceso de maquinado en INAL consta de factores ambientales como humedad relativa, temperatura y material particulado (polución y arena) proveniente de las inmediaciones del recinto. El cuerpo del sistema tribológico es la herramienta de corte según INAL (acero AISI M2), la cual se encuentra en un estado de temple y revenido. Los materiales a maquinar son acero AISI 4140, acero AISI 1040 y aleaciones de aluminio actúan como contra cuerpo del sistema. En la tabla 2 se observan las durezas de los materiales de trabajo usados por INAL, los cuales presentan menor dureza respecto a la herramienta de corte (ver tabla 3). Los contra cuerpos poseen una geometría circular con un diámetro

promedio de 23 cm. El proceso de maquinado se lleva a cabo mediante el uso de lubricante tipo emulsión 6% taladrina y 94% agua, el cual actúa como uno de los elementos interfaciales.

Tabla 4. Dureza promedio materiales de trabajo INAL [6].

Material de trabajo	Dureza promedio
AISI 1040	140-220 HB
AISI 4140 (Bonificado)	28-34 HRC
AISI 2030	100-120 HB

4.2. CARACTERIZACIÓN DE LA HERRAMIENTA DE CORTE

El análisis de composición química realizado a la herramienta arrojó resultados erróneos, esto debido a que la herramienta de corte no contaba con las medidas mínimas requeridas por el Espectrofotómetro de Emisión por Chispa. Se realizó la toma de dureza a la herramienta suministrada. En la tabla 4 se presentan los resultados de dureza obtenidos. El valor de dureza obtenido es acorde para una herramienta de corte tipo acero rápido en estado de bonificado [6].

Tabla 5. Dureza herramienta de corte INAL.

Toma	1	2	3	4	5	Promedio	Desviación estándar
(HRC)	62	63	62	62	62	62.2	0.39

Se procedió a realizar microscopía óptica y electrónica a la probeta. En la figura 9 se observa la microestructura de la herramienta de corte, donde se observó la presencia de carburos distribuidos homogéneamente a lo largo de la matriz de martensita revenida.

En la figura 10 se observa la microestructura del acero de herramienta denotando los carburos primarios ubicados en los límites de grano austenítico previo al tratamiento térmico de temple y los carburos secundarios repartidos en la matriz martensítica revenida como resultado del tratamiento térmico de revenido del acero de herramienta. Además, se encontró la presencia de pequeñas regiones con austenita retenida [12].

Figura 9. Micrografía óptica de la microestructura del material de la herramienta de corte.

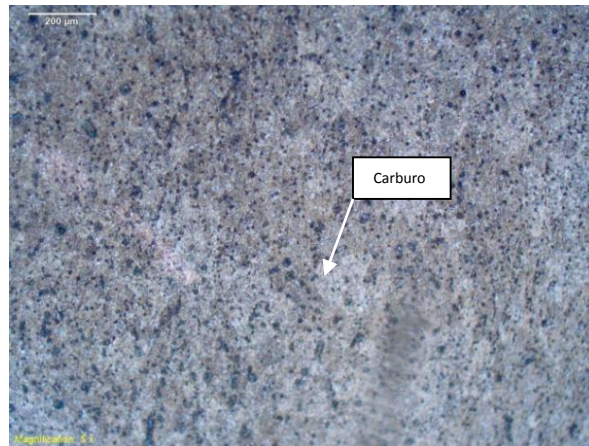
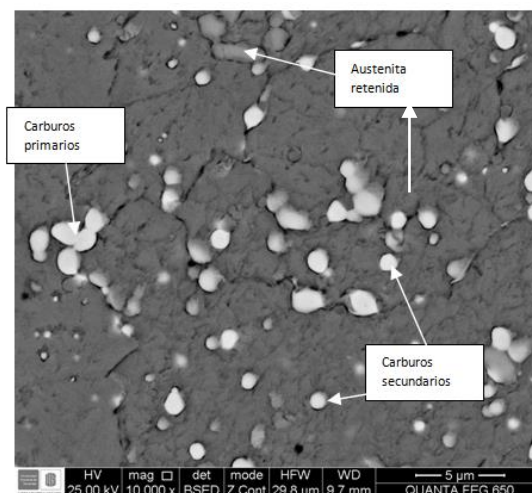


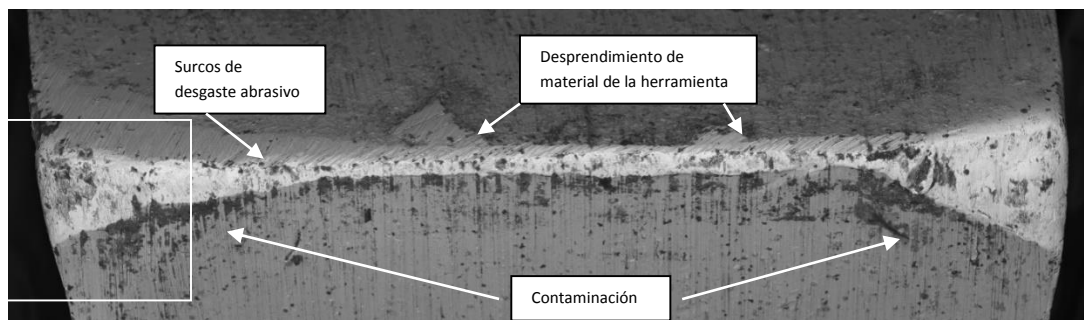
Figura 10. Micrografía obtenida en SEM del material de la herramienta de corte.



4.3. CARACTERIZACIÓN DE LA SUPERFICIE DESGASTADA DE LA HERRAMIENTA

Se llevó a cabo el análisis de la superficie desgastada de la herramienta de corte. En la figura 11 se observa el filo de corte de la herramienta, en donde se observan zonas desgastadas evidenciando desprendimiento de material en la cara inclinada de la herramienta. Además se encontraron zonas con diferente coloración. Se procedió a realizar un análisis en el área indicada con el fin de determinar la existencia de un segundo tipo de desgaste y la composición química de las zonas oscuras.

Figura 11. Micrografía obtenida por SEM del filo de corte de la herramienta.



En la figura 11 se aprecian los surcos generados en el proceso de maquinado. Estos surcos indican un evidente desgaste abrasivo en la superficie de la herramienta además del desprendimiento de material en la cara frontal de la herramienta. Se procedió a realizar el análisis semicuantitativo de composición química en la zona indicada en la figura 12 con el fin de observar la composición de las diferentes tonalidades. Los resultados de composición obtenidos se observan en las figuras 13 y 14, donde se puede observar que la zona 1 corresponde a material adherido de algún proceso de maquinado anterior y la zona 2 a contaminantes, los resultados de la zona 2 pueden ser suciedad debido al largo tiempo entre la recepción de la pieza y la realización de las pruebas o por la presencia de contaminantes en el lubricante usado por INAL [11].

Figura 12. Micrografía SEM de la superficie desgastada.

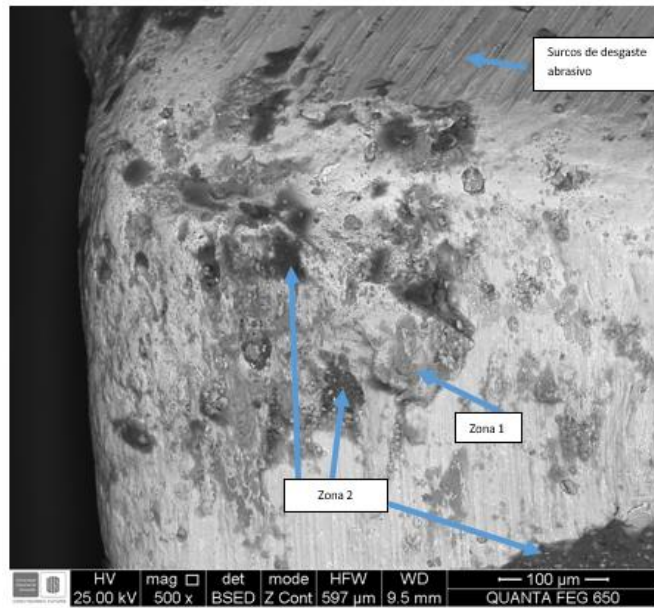


Figura 13. Resultado EDX en la zona 1 en la herramienta de corte.

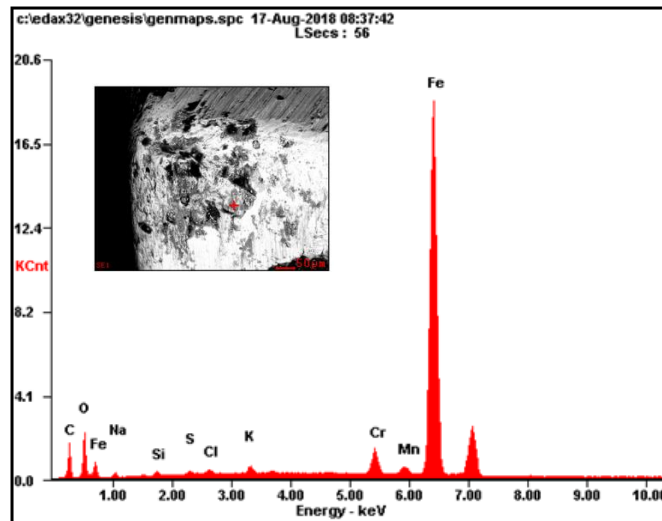
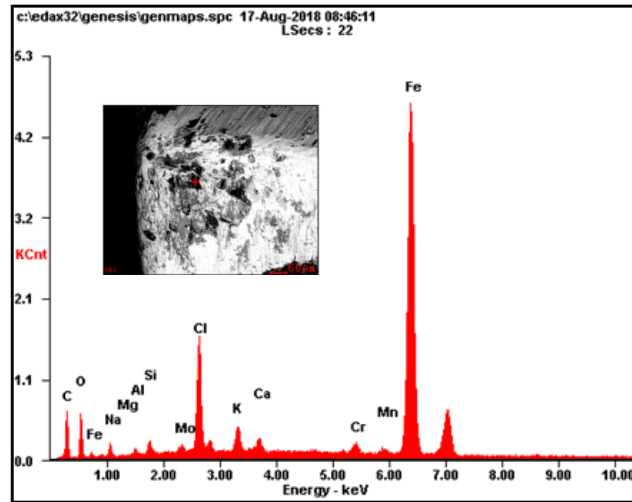


Figura 14. Resultado EDX en la zona 2 en la herramienta de corte.



La herramienta de corte cuenta con las características necesarias para realizar el proceso de maquinado. Sin embargo se sospecha de un mal uso en los parámetros de corte establecidos para la herramienta y un aparente mala aplicación del lubricante genera un desgaste en la cara inclinada de la herramienta de corte (BUE), además de un desgaste abrasivo en el radio de nariz de la herramienta, lo cual puede generar un desgaste por tres cuerpos en el sistema tribológico, generando bajo desempeño de la herramienta e imperfecciones en las piezas maquinadas por la pérdida de tolerancia geométrica de la herramienta.

4.4. PROTOCOLO DE MAQUINADO

Ver anexo A

5. CONCLUSIONES

El material suministrado por la empresa INAL cumple con las características mínimas para desarrollar un buen desempeño en procesos de maquinado, por lo cual, el bajo tiempo de ida útil se sospecha obedece al uso de las condiciones de corte inadecuadas en los procesos de maquinado, generando desgaste adhesivo en la herramienta de corte por la acumulación de material maquinado en la herramienta.

Se elaboró un protocolo de maquinado indicando las recomendaciones mínimas en el proceso de maquinado. Se tuvo en cuenta velocidades, avances y profundidades de corte para herramientas de acero rápido (AISI M2) e inserto de WC-Co recubierto y sin recubrir.

Se logró con este trabajo de grado promover el vínculo entre el sector industrial del área metropolitana de Bucaramanga y la Universidad Industrial de Santander.

6. RECOMENDACIONES

Se recomienda a la empresa INAL solicitar la ficha técnica de la herramienta de corte al proveedor, la cual le permita conocer las condiciones de corte recomendadas.

Se recomienda realizar un estudio más detallado usando diferentes tipos de herramienta de corte con sus respectivas variables operacionales para identificar cual genera una mejor relación costo beneficio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] HUTCHINGS Ian & SHIPWAY Philip, friction and wear of engineering materials, United Kingdom, Elsevier Science Publishing Company INC, 2017. ISBN 978-034-05-6184-3
- [2] KALPAKJIAN, Serope, SCHMID, Steven. Manufactura, Ingeniería y Tecnología. 5 ed. México: Pearson Education.2008. ISBN 978-970-26-1026-7.
- [3] HEIREMANS E, directorio de la asociación chilena de seguridad, Normas de Trabajo en Tornos, Santiago- Chile, 2016.
- [4] GROOVER, Mikell P. Fundamentos de manufactura moderna. 3 ed. México D.F.: McGraw-Hill. 2007. ISBN 978-970-10-6240-1.
- [5] ZUM GAHR K, microstructure and wear of materials. Siegen, Elsevier Science Publishing Company INC, 1987. ISBN 978-008-08-7574-3
- [6] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, volume 16 machining, United States of America, ASM Handbook Committee, 1989.
- [7] POSTIGLIONI R., ALAMINO A. & VUROBi Jr, Refining the microstructure of an AISI M2 tool steel by High-Energy Milling, *Seventh International Latin American Conference on Powder Technology, November 08-10, Atibaia, SP, Brazil, 2005.*
- [8] ARIAS J. , CABEZA M., CSATRO G., FEIJOO I., MERINO P. & PENA G., modificación de los aceros rápidos de herramientas aisi m2 por fusión superficial con láser bajo diferentes condiciones de operación, revista de metalurgia issn: 0034-8570, 2010.

[9] SANDVIK COROMANT, *guía técnica de mecanizado*. ab sandvik coromant, 2018.

[10] ROBERTO L. Ministerio de trabajo y asuntos sociales de España, Fluidos de corte: criterios de control de riesgos higiénicos, 2017.

[11] PERNAS F. Recomendaciones para el buen uso de taladrinas, *experto en procesos de fabricación por la Universidad Politécnica de Madrid (UPM)*, 2013.

BIBLIOGRAFÍA

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, volume 16 machining, United States of America, ASM Handbook Committee, 1989.

GROOVER, Mikell P. Fundamentos de manufactura moderna. 3 ed. México D.F.: McGraw-Hill. 2007. ISBN 978-970-10-6240-1.

HUTCHINGS Ian & SHIPWAY Philip, friction and wear of engineering materials, United Kingdom, Elsevier Science Publishing Company INC, 2017. ISBN 978-034-05-6184-3.

KALPAKJIAN, Serope, SCHMID, Steven. Manufactura, Ingeniería y Tecnología. 5 ed. México: Pearson Education.2008. ISBN 978-970-26-1026-7.

ZUM GAHR K, microstructure and wear of materials. Siegen, Elsevier Science Publishing Company INC, 1987. ISBN 978-008-08-7574-3

ANEXOS

Anexo A. PROTOCOLO DE MAQUINADO

A continuación se presentan una serie de recomendaciones y variables operacionales adecuadas para el proceso de maquinado, de los cuales las condiciones de corte (velocidad, avance y profundidad) varían dependiendo del tipo de material a maquinar y del tipo de herramienta de corte seleccionada [3, 9, 10, 11].

Vestimenta del operario

- Los operarios deben llevar ropa cómoda pero ajustada al cuerpo (overol) abotonada, gafas de protección y zapato cerrado de un material resistente.
- En ningún caso mangas sueltas, chalecos demasiado grandes, sin abotonar, etc.
- No se debe usar corbatas o prendas similares que puedan ser atrapadas por la pieza que se está mecanizando.

Para evitar sujeciones de la maquinaria al operario se recomienda no usar:

- Anillos
- Relojes de pulsera
- Brazaletes
- Guantes

Recomendaciones para el operario antes de poner en marcha el torno

- Se debe limpiar correctamente el área de trabajo retirando todo elemento que pueda generar un accidente al operario.
- Verificar que todas las protecciones de engranajes y correas se encuentren correctamente ajustadas, además de acoplar efectivamente la herramienta

de corte al portaherramientas. Constatar que la pieza de trabajo no se encuentre desajustada.

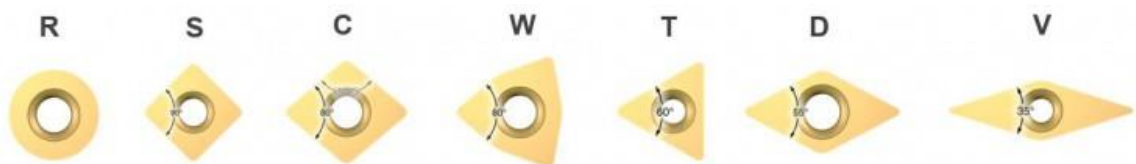
Recomendaciones para el operario después de poner en marcha el torno

- Si se llegan a percibir sonidos extraños en el proceso de maquinado, detener inmediatamente la máquina.
- Cuando machine piezas largas que puedan curvarse o flectarse debido a los esfuerzos generados por el corte, se debe utilizar soportes fijos o móviles.

Distribución de la herramienta de corte

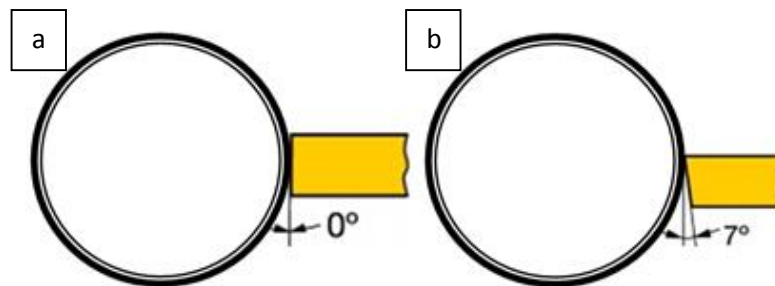
Para el proceso inicial de desbaste, se recomienda usar herramientas con un ángulo de corte mayor a 80° (Tipo C) y una distribución negativa (ángulo de incidencia 0°) de la herramienta de corte de WC-Co. Para realizar un correcto acabado superficial de la pieza maquinada, se recomienda usar herramientas con un ángulo de corte menor a 60° (Tipo T, Tipo D o Tipo V) y una distribución positiva (ángulo de incidencia entre 2° y 7°) de la herramienta de corte de WC-Co. En la figura 15 se observan la geometría para cada radio de nariz, por otro lado, en la figura 16 se aprecia la distribución negativa (a) y la distribución positiva (b) en un proceso de maquinado [9]. En el caso de un acero AISI M2 se deben tomar en cuenta las geometrías establecidas en la figura 7.

Figura 15. Ángulos de corte para las diferentes herramientas de corte [9].



El tamaño de la herramienta de corte se elige según sea la profundidad del proceso de maquinado, esto con el fin de evitar fuerzas radiales al entrar en contacto la herramienta de corte y la pieza a maquinar.

Figura 16. Tipos de distribución en un proceso de maquinado: Negativa (a) y Positiva (b) [9].



Parámetros de corte

La velocidad, avance y profundidad de corte dependen del material a maquinar y el tipo de herramienta de corte usada. Estos parámetros se encuentran en el anexo B. Se debe tener en cuenta que para una herramienta de acero rápido los valores de velocidad, avance y profundidad de corte son la mitad de los estipulados para un inserto de WC-Co sin recubrimiento [5].

Lubricante

La aplicación del lubricante se debe realizar con salida superior y salida inferior, buscando un mejor control de viruta evitando atascamientos, además de prolongar la vida de la herramienta de corte. En caso de no contar con ambas salidas de lubricante, se recomienda el uso de lubricante superior. En la figura 17 se observa la aplicación del lubricante con salida superior y su efecto en la viruta durante el proceso de maquinado [9].

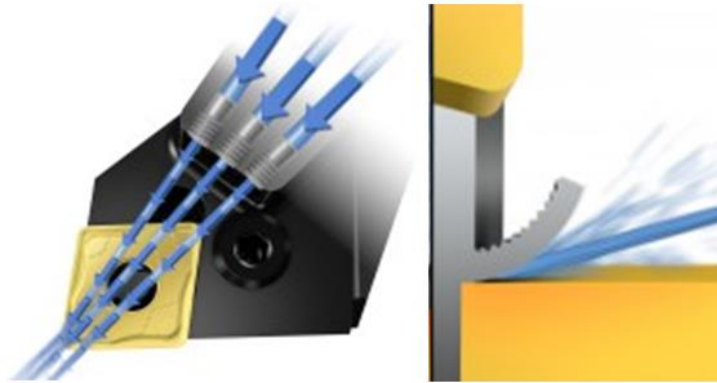


Figura 17. Salida superior de refrigerante en un proceso de maquinado [9].

La presión del lubricante depende del material de trabajo a maquinar, por lo cual se recomienda usar lubricante con una presión de 100-150 psi en materiales de baja dureza y alta maquinabilidad, con esta presión se controla la evacuación de la viruta y se prolonga la vida de la herramienta. Si se requiere un maquinado con geometrías complejas se recomienda una presión de 1000-1200 psi. Para un material como un acero inoxidable o las superaleaciones termorresistentes se necesita una presión del lubricante mucho mayor, para estos materiales se recomienda una presión de 2200-2900 psi [4, 9].

Recomendaciones para el uso de taladrina

En el proceso de maquinado desarrollado por INAL se informa el uso de taladrinas. Estas taladrinas funcionan como lubricante pero deben ser usadas correctamente para evitar daños en la herramienta de corte, la pieza a maquinar, la maquinaria o afecciones físicas del operario [10]. Para un buen uso de la taladrina se deben tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

- **Selección del producto**

La emulsión debe contener una concentración de la taladrina entre el 4% y el 6%, además de garantizar un pH básico entre 8 y 9 en solución. Se recomienda no usar aguas con altas concentraciones de sulfatos (< 50 ppm), cloruros (< 30 ppm), nitratos (<50 ppm) o nitritos (<20 ppm), ya que ellos promueven el crecimiento bacteriano en la emulsión. Es indispensable usar la concentración indicada de taladrina. Estos parámetros mencionados buscan no afectar la estabilidad, la calidad y el rendimiento de la emulsión. Se debe confirmar la compatibilidad del lubricante con cada máquina empleada en el mecanizado. Esto se debe realizar para evitar el deterioro de las juntas de goma de la maquinaria y la afectación de la pintura durante el proceso ya que los restos de plásticos, nylon y pintura en los baños de mecanizado favorecen el crecimiento de hongos en la emulsión. Se debe tener en cuenta el impacto en la salud del operario, por lo cual se recomienda el uso de taladrinas con la menor cantidad de elementos nocivos para el operario [11].

- **Problemas típicos con el uso de taladrinas**

Malos olores

Este problema se puede solucionar manteniendo las concentraciones adecuadas de taladrina en la emulsión además de una adecuada limpieza del área de trabajo. Se hace esta recomendación para evitar la presencia de hongos, que además de provocar obstrucciones de los filtros y los conductos de taladrina, pueden provocar micosis sistémica por inhalación o cutánea (candidiasis) en los operarios [10, 11].

Corrosión en máquina o en piezas

La principal causa de la corrosión es una baja concentración de taladrina en la emulsión, aunque no se debe descartar la presencia de cloruros y sulfatos en el agua desembocando un en un bajo pH de la emulsión. Este problema se evita con un control diario de concentración de taladrina y pH de la emulsión [10].

Afecciones cutáneas en el operario

Como se mencionó anteriormente el uso de taladrina puede generar afecciones físicas en el operario. Esto se puede solucionar mediante correcto uso de elementos de protección personal y un test de alergia del operario. Una vez realizado el test y al no tener reacción alérgica se procede a implementar el uso de los elementos de seguridad [3, 11].

Anexo B. VARIABLES DE OPERACION EN PROCESOS DE MAQUINADO

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)

Acero inoxidable, austenítico	Carburo con triple recubrimiento	1.5-4.4 (0.06-0.175)	0.35 (0.014)	150 (500)	0.5-12.7 (0.02-0.5)	0.08-0.75 (0.003-0.03)	75-230 (250-750)
	Carburo con recubri- miento de TiN	"	"	85-160 (275-525)	"	"	55-200 (175-650)
	Cermet	"	0.30 (0.012)	185-215 (600-700)	"	"	105-290 (350-950)
Aleaciones para alta temperatura, base níquel	Carburo sin recubrimiento	2.5 (0.10)	0.15 (0.006)	25-45 (75-150)	0.25-6.3 (0.01-0.25)	0.1-0.3 (0.004-0.012)	15-30 (50-100)
	Carburo con recubri- miento de cerámico	"	"	45 (150)	"	"	20-60 (65-200)
	Carburo con recu- brimiento de TiN	"	"	30-55 (95-175)	"	"	20-85 (60-275)
	Cerámico de Al ₂ O ₃	"	"	260 (850)	"	"	185-395 (600-1300)
	Cerámico de SiN	"	"	215 (700)	"	"	90-215 (300-700)
cBN policristalino	"	"	150 (500)	"	"	120-185 (400-600)	
Aleaciones de titanio	Carburo sin recu- brimiento	1.0-3.8 (0.04-0.15)	0.15 (0.006)	35-60 (120-200)	0.25-6.3 (0.01-0.25)	0.1-0.4 (0.004-0.015)	10-75 (30-250)
	Carburo con recu- brimiento de TiN	"	"	30-60 (100-200)	"	"	10-100 (30-325)
Aleaciones de aluminio Libre maquinado	Carburo sin recubrimiento	1.5-5.0 (0.06-0.20)	0.45 (0.018)	490 (1600)	0.25-8.8 (0.01-0.35)	0.08-0.62 (0.003-0.025)	200-670 (650-2000)
	Carburo con recu- brimiento de TiN	"	"	550 (1800)	"	"	60-915 (200-3000)
	Cermet	"	"	490 (1600)	"	"	215-795 (700-2600)
	Diamante policristalino	"	"	760 (2500)	"	"	305-3050 (1000-10,000)
	Diamante policristalino	"	"	530 (1700)	"	"	365-915 (1200-3000)

Recomendaciones generales para operaciones de torneado

Material de la pieza de trabajo	Herramienta de corte	Condiciones iniciales de propósito general			Intervalo para rectificando y acabado		
		Profundidad de corte, mm (pulgadas)	Avance, mm/rev (pulg/rev)	Velocidad de corte, m/min (pies/min)	Profundidad de corte, mm (pulg)	Avance, mm/rev (pulg/rev)	Velocidad de corte, m/min (pies/min)
Aleaciones de cobre	Carburo sin recubrimiento	1.5-5.0 (0.06-0.20)	0.25 (0.010)	260 (850)	0.4-7.51 (0.015-0.3)	0.15-0.75 (0.006-0.03)	105-535 (350-1750)
	Carburo con recubrimiento de cerámico	"	"	365 (1200)	"	"	215-670 (700-2200)
	Carburo con triple recubrimiento	"	"	215 (700)	"	"	90-305 (300-1000)
	Carburo con recubrimiento de TiN	"	"	90-275 (300-900)	"	"	45-455 (150-1500)
	Cermet	"	"	245-425 (800-1400)	"	"	200-610 (650-2000)
	Diamante policristalino	"	"	520 (1700)	"	"	275-915 (900-3000)
Aleaciones de tungsteno	Carburo sin recubrimiento	2.5 (0.10)	0.2 (0.008)	75 (250)	0.25-5.0 (0.01-0.2)	0.12-0.45 (0.005-0.018)	55-120 (175-400)
	Carburo con recubrimiento de TiN	"	"	85 (275)	"	"	60-150 (200-500)
Termoplásticos y termofijos	Carburo con recubrimiento de TiN	1.2 (0.05)	0.12 (0.005)	170 (550)	0.12-5.0 (0.005-0.20)	0.08-0.35 (0.003-0.015)	90-230 (300-750)
	Diamante policristalino	"	"	395 (1300)	"	"	150-730 (500-2400)
Compósitos, grafito reforzado	Carburo con recubrimiento de TiN	1.9 (0.075)	0.2 (0.008)	200 (650)	0.12-6.3 (0.005-0.25)	0.12-1.5 (0.005-0.06)	105-290 (350-950)
	Diamante policristalino	"	"	760 (2500)	"	"	550-1310 (1800-4300)

