



Desarrollo de un ensayo de laboratorio para estudiar la maquinabilidad de aceros de corte libre

Azqueta Mozzi, Julia - Banegas, Sabina

2023

Universidad Nacional de Rosario

Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura

Escuela de Ingeniería Mecánica

Rosario, Argentina

Desarrollo de un ensayo de laboratorio para estudiar la maquinabilidad de aceros de corte libre

AZQUETA MOZZI, Julia
BANEGAS, Sabina

Proyecto Final de Ingeniería Mecánica presentado como requisito parcial para optar al

título de:

Ingeniero/a Mecánico/a

Director/a:

Ing. Pedro Sismondi

Universidad Nacional de Rosario

Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura

Escuela de Ingeniería Mecánica

Rosario, Argentina

Resumen

En el presente trabajo se desarrolla una metodología de ensayo para el estudio de la maquinabilidad en condiciones de laboratorio con cantidades limitadas de material, específicamente al desarrollar un nuevo material y capacidades de mecanizado menores a las disponibles industrialmente.

La problemática que da origen a la necesidad de generar este procedimiento se enmarca en el requerimiento de desarrollar aceros '*verdes*' o sostenibles tal que se reduzca el impacto ambiental asociado con la producción y comercialización de aceros que contienen elementos tóxicos como plomo o selenio.

Para lograr esto, es crucial comparar las propiedades de maquinabilidad entre una aleación alternativa y el acero de corte libre convencional, con el fin de reemplazarlos de manera efectiva.

Para definir el procedimiento se utiliza como base la norma ISO 3685 para torneado y se lleva a cabo una prueba experimental en las instalaciones de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Nacional de Rosario.

En la prueba experimental realizada se analiza el desgaste de flanco de la herramienta de corte luego de una operación de cilindrado de una barra cilíndrica de acero SAE12L14, siguiendo el procedimiento previamente descrito.

Palabras clave: acero de corte libre, torneado, maquinabilidad, ISO 3685, acero verde, industria del acero

Abstract

The present work describes a testing methodology for studying machinability under laboratory conditions with limited quantities of material, specifically when developing a new material and having machining capabilities lower than those available industrially.

The problem that prompts the need for this procedure is rooted in the requirement to develop "green" or sustainable steels that reduce the environmental impact associated with the production and commercialization of steels containing toxic elements such as lead or selenium.

To achieve this goal, it is crucial to compare the machinability properties between an alternative alloy and the conventional free-cutting steel in order to effectively replace them.

To define the procedure, the ISO 3685 standard for turning is used as the foundation, and an experimental test is conducted at the facilities of the School of Mechanical Engineering at the National University of Rosario.

In the conducted experimental test, the flank wear of the cutting tool is analyzed after a cylindrical turning operation on a SAE12L14 steel bar, following the previously described procedure.

Keywords: free-cutting steel, turning, machinability, ISO 3685, green steel, steel industry

Agradecimientos

A la familia, a los amigos y a todos los seres queridos por su compañía, motivación y aliento a lo largo de todo este proceso.

A los compañeros y profesores cuyos valiosos conocimientos y enseñanzas sentaron las bases de nuestra formación académica.

A todas aquellas personas que, de una forma u otra, han contribuido en la realización de este proyecto.

A la universidad pública que nos brindó una educación y formación de excelencia y de calidad.

Índice

Resumen	3
Abstract	4
Agradecimientos	5
Índice	6
Índice de figuras	8
Introducción	10
1. Capítulo 1: Marco Teórico	12
1.1. Mecanizado	12
1.1.1. Variables del proceso de mecanizado	12
1.2. Maquinabilidad	13
1.2.1. Mecanismos de desgaste	14
1.2.2. Material de la pieza y desgaste	15
1.2.3. Criterios y tipos de desgaste	16
1.3. Dinámica del Corte	17
1.4. Formación de Viruta	20
1.5. Condiciones de Corte	23
1.6. Cálculo de la Potencia de Torneado	25
1.7. Norma ISO 3685:1993 (E): Tool-life testing with single-point turning tools	28
1.8. Aceros de Corte Libre	29
1.8.1. Efecto de los elementos aleantes en los Aceros de Corte Libre . .	30
1.8.2. Clasificación de los Aceros de Corte Libre	33
2. Capítulo 2: Procedimiento de ensayo de laboratorio para estudiar la ma-	
quinabilidad de aceros de corte libre	36
2.1. Introducción	36
2.2. Objetivo	37
2.3. Alcance	37
2.4. Definiciones	37
2.5. Pieza de trabajo	38
2.6. Herramienta	39
2.7. Equipamiento	39
2.8. Condiciones de corte	39
2.9. Medición del desgaste de la herramienta y definición del criterio de vida	
útil de la misma	40
2.9.1. Medición del desgaste mediante Image J	41
2.10. Metodología de ensayo	42
2.11. Condiciones de seguridad	46

2.12. Procedimientos	47
2.12.1. Procedimiento de ensayo	47
2.12.2. Selección de la pieza de trabajo	48
2.12.3. Selección del equipamiento	49
2.12.4. Selección de la herramienta	50
2.12.5. Metodología de prueba	51
2.12.6. Evaluación del desgaste	52
2.12.7. Preparación para la evaluación del desgaste	53
3. Capítulo 3: Prueba experimental	54
3.1. Caracterización de los materiales a ensayar	55
3.1.1. Primera etapa de caracterización	55
3.1.2. Segunda etapa de caracterización	71
3.2. Características del torno utilizado	73
3.3. Selección de la herramienta de mecanizado	74
3.4. Medición del desgaste de las herramientas	76
3.4.1. Dispositivo de sujeción de la herramienta	78
3.5. Puesta a punto del ensayo	79
3.5.1. Características de la pieza de trabajo	83
3.5.2. Ajuste de la herramienta y verificaciones antes del torneado	85
3.6. Prueba experimental	87
3.7. Resultados	91
4. Capítulo 4: Conclusiones y Recomendaciones	99
Referencias	101

Índice de figuras

1.	Influencia de mecanismos de desgaste en función de la temperatura [1]	15
2.	Zona de deformación plástica durante el proceso de arranque de viruta	16
3.	Superficies de desgaste típicas	17
4.	Sistema de Fuerzas en el corte [2]	18
5.	Proceso de formación de viruta [3]	21
6.	Tipos de viruta según norma ISO 3685:1993 (E)	22
7.	Tipos de viruta	22
8.	Condiciones de corte	25
9.	Variables que influyen en el consumo de potencia	27
10.	Transmisión de potencia en el torno [3]	28
11.	Porcentaje de carbono vs. índice de maquinabilidad [4]	30
12.	Plomo rodeando una inclusión de MnS [5]	33
13.	Propiedades mecánicas de los aceros de corte libre de [6]	35
14.	Medición del desgaste de flanco [7]	41
15.	Comportamiento del desgaste de flanco para una velocidad de corte, adaptada de [7]	43
16.	Comportamiento del desgaste de flanco para diferentes velocidades de corte [7]	44
17.	Velocidad de corte vs. Tiempo de vida útil basado en la Figura 16 [7]	44
18.	Colada 14433 Material 12L14	55
19.	Colada 78639 Material 1212	56
20.	Colada 19379 Material 1212	56
21.	Colada 19365 Material 12L14	56
22.	Probetas	57
23.	Microscopio Óptico	58
24.	Micrografías Probeta 1	59
25.	Micrografías Probeta 2	59
26.	Micrografías Probeta 3	60
27.	Micrografías Probeta 4	60
28.	Micrografías Probeta 5	61
29.	Micrografías Probeta 6	62
30.	Micrografías Probeta 7	63
31.	Micrografías Probeta 8	63
32.	Imagen y microanálisis químico obtenidos del SEM de la Probeta 2- Punto 1	65
33.	Imagen y microanálisis químico obtenidos del SEM de la Probeta 2 - Punto 3	66
34.	Imagen y microanálisis químico obtenidos del SEM de la Probeta 2 - Punto 4	67
35.	Imagen y microanálisis químico obtenidos del SEM de la Probeta 3 - Punto 1	68
36.	Imagen y microanálisis químico obtenidos del SEM de la Probeta 3 - Punto 6	69

37.	Imagen y microanálisis químico obtenidos del SEM de la Probeta 6 - Zona 1	70
38.	Imagen y microanálisis químico obtenidos del SEM de la Muestra 6 - Zona 3	71
39.	Mirografías obtenidas en la segunda etapa de caracterización	72
40.	Mirografías obtenidas en la segunda etapa de caracterización	72
41.	Plomo envolviendo una inclusión de MnS. Fuente: [5]	73
42.	Torno CONCEPT TURN 60	74
43.	Dimensiones del portaherramientas STGCR 1212 F11	75
44.	Herramienta TCMT2-1-19 IC20	75
45.	Imagen de ejemplo para medir el desgaste	77
46.	Medición del desgaste de la herramienta mediante Image J	77
47.	Dispositivo de sujeción de la herramienta	78
48.	Barra de 25,4mm de diámetro y 150mm de largo	79
49.	Pieza de trabajo para la prueba experimental	80
50.	Torneado de la probeta en el torno paralelo del EIM	80
51.	Croquis de la pieza de trabajo para la prueba experimental	81
52.	Montaje de la barra en el torno CONCEPT TURN 60	81
53.	Dimensiones finales de la pieza	81
54.	Viruta producto del desbaste grueso	82
55.	Software del Torno CONCEPT TURN 60	83
56.	Identificación de la barra utilizada en la prueba	84
57.	Dimensiones iniciales de la pieza de trabajo	85
58.	Prueba en vacío	86
59.	Configuración de la herramienta	87
60.	Dimensiones de la probeta antes y después del mecanizado	89
61.	Especificaciones de dimensiones, coordenadas y condiciones de corte en el programa del torno CNC	90
62.	Cilindrado en el torno CNC	90
63.	Pieza de trabajo luego del mecanizado	90
64.	Vista superior de la herramienta utilizada	91
65.	Imágenes superiores de la herramienta tomadas con la lupa	92
66.	Imágenes de frente de la herramienta tomadas con la lupa	92
67.	Imágenes de la herramienta tomadas con el microscopio	93
68.	Imágenes del flanco de la herramienta tomadas con el microscopio	94
69.	Medición del desgaste mediante Image J de la prueba experimental	95
70.	Viruta obtenida del cilindrado	96
71.	Indentación producto del ensayo de dureza en la pieza de trabajo	97
72.	Tabla de referencia para realizar el ensayo de dureza	98

Introducción

Los aceros de corte libre se caracterizan por tener una alta capacidad de ser mecanizados con herramientas de corte convencionales, como tornos, fresas, taladros, entre otros, sin que se produzca un desgaste excesivo de la herramienta y sin que se genere un sobrecalentamiento del material. Así permiten lograr un mejor rendimiento respecto del mecanizado, es decir, alcanzar menores tiempos respecto del proceso productivo, menor consumo de potencia y de herramientas de corte. Todo lo anterior genera una reducción en los costos de producción.

Estas propiedades se deben a que los aceros de corte libre contienen una cantidad relativamente alta de elementos de aleación, como manganeso, fósforo, azufre, selenio o plomo. Estos aleantes generan inclusiones que por un lado disminuyen la potencia requerida y algunos como el plomo pueden actuar como lubricantes durante el proceso de mecanizado, reduciendo la fricción y la adhesión entre la herramienta y el material.

Por lo tanto, su empleo permite obtener una elevada productividad, debido al bajo desgaste de las herramientas de corte, ya sean las tradicionales de acero rápido o las más modernas de insertos de carburo de Tungsteno sinterizados.

Los aceros anteriormente mencionados se utilizan ampliamente en la fabricación de piezas de alta precisión, como componentes para la industria automotriz, aeroespacial y médica, así como en la fabricación de tornillos, tuercas y otros elementos de fijación.

Sin embargo, estos aceros tienen algunas desventajas. Al utilizar plomo como aleante son una preocupación en términos de polución y salud pública, ya que es un metal tóxico que puede causar daños irreparables en el sistema nervioso, el cerebro y otros órganos del cuerpo humano. Además, este elemento es un contaminante ambiental que puede acumularse en el suelo, el agua y la cadena alimentaria, afectando a la vida silvestre y a los seres humanos que los consumen.

En la actualidad, existe una creciente demanda por parte de los consumidores y la sociedad en general hacia la producción de bienes y servicios más sostenibles y respetuosos con el medio ambiente. En este sentido, la industria del acero no es ajena a esta tendencia y ha ido evolucionando hacia una producción más sostenible y responsable.

En el caso de los aceros de corte libre, se están desarrollando nuevas tecnologías y procesos que permiten obtener aceros con una mayor eficiencia energética y un menor impacto ambiental. Por ejemplo, se están implementando técnicas de reciclaje de chatarra para reducir la cantidad de residuos generados durante la producción de acero.

Además, también se están investigando nuevas aleaciones y aditivos que permitan obtener una maquinabilidad similar a la de los aceros de corte libre pero sin necesidad de utilizar elementos tóxicos o contaminantes, como el plomo o el selenio.

En el estudio, desarrollo y análisis de los aceros "verdes" resulta crucial comparar la maquinabilidad de estos respecto los aceros de corte libre convencionales. Es decir, la evaluación de la maquinabilidad está directamente relacionada con el desarrollo de los aceros sostenibles o amigables con el medio ambiente.

En este aspecto, la Norma ISO 3685:1993 (E) denominada Tool-life testing with single-point turning tools.^{establece} pautas y directrices estandarizadas para llevar a

cabo evaluaciones de la vida útil de herramientas monocortantes en el torneado de aceros y fundiciones. Su propósito es proporcionar un marco normativo que permita determinar las propiedades de maquinabilidad de los materiales, comparar herramientas y fluidos de corte, así como establecer las condiciones óptimas de corte. Si bien no es de cumplimiento obligatorio, la norma establece algunos parámetros para lograr la comparabilidad y la reproducibilidad de los resultados obtenidos en los ensayos.

Al examinar el estándar y algunos estudios citados en la literatura ([8, 9]), se considera significativo el valor de la velocidad de corte necesaria para alcanzar el punto de fin de vida útil de la herramienta a los 15 y 30 minutos de torneado continuo del material. Esta velocidad se emplea como punto de referencia para la comparación de la capacidad de mecanizado de diversos materiales.

Así mismo, abordar el desarrollo de aceros sostenibles, es común que se realice la preparación de nuevos materiales en cantidades reducidas tanto en peso como en dimensiones. Esto se debe a que la disponibilidad de material es limitada y, en ocasiones, costosa. Por lo tanto, es crucial maximizar la información obtenida a partir de esta cantidad limitada de material. Debido a esta limitación, resulta de gran dificultad obtener una muestra de trabajo lo suficientemente grande como para permitir un proceso de mecanizado continuo de 15 o 30 minutos.

Por consiguiente, surge la necesidad de elaborar un procedimiento basado en la Norma ISO 3685:1993 (E), pero adaptado a las condiciones de desarrollo de nuevos materiales en un entorno de laboratorio donde los recursos tanto de disponibilidad de material como de potencia de mecanizado son escasos. Al seguir este procedimiento, se busca poder analizar comparativamente la maquinabilidad de los aceros con plomo utilizados actualmente en la industria y las nuevas aleaciones que buscan reemplazarlos.

Este desarrollo resulta esencial para promover una industria del acero más sostenible y responsable, al tiempo que ofrece soluciones más eficientes y seguras para los procesos de mecanizado.

1. Capítulo 1: Marco Teórico

1.1. Mecanizado

El mecanizado se refiere a un conjunto de procesos productivos que, mediante el arranque de viruta o desbaste, llevan las piezas a su forma y tamaño final. Para analizar este fenómeno es importante tener en cuenta que el mecanismo involucrado en la sustracción del material es la deformación plástica.

Estos procedimientos son fundamentales en la industria, pero su análisis es complejo debido a la gran cantidad de variables involucradas. Durante el proceso interactúan variables tanto dependientes como independientes, lo que hace difícil evaluar las interacciones entre ellas. Esto genera que a menudo se utilice el método de "prueba y error" para establecer los parámetros óptimos para cada proceso de mecanizado.

Actualmente es usual realizar pruebas de mecanizado y desgaste de herramientas, y si bien existen datos experimentales, muchas veces los resultados obtenidos para determinadas condiciones son difícilmente transferibles a situaciones similares. Por otro lado, este tipo de ensayos son costosos debido a la gran cantidad de materiales y tiempo que requieren.

En este trabajo buscamos generar un procedimiento que permita evaluar la maquinabilidad de forma comparativa respecto del material utilizado. Nos enfocamos particularmente en el estudio del proceso de torneado, ya que es uno de los más amplios y comúnmente utilizados en la industria.

1.1.1. Variables del proceso de mecanizado

Como se indicó anteriormente los procedimientos de mecanizado involucran un gran número de variables. Es necesario identificarlas para luego establecer los criterios que permitan evaluar los resultados de cada proceso.

Las mismas pueden separarse en dos grupos: las independientes o de entrada, que son controladas externamente generando cambios en las variables dependientes, o de salida del proceso de corte.

Variables independientes:

- Material de la pieza a trabajar
- Geometría inicial de la pieza a trabajar
- Proceso o procesos de maquinado a realizar
- Material de la herramienta de corte
- Parámetros de corte
- Geometría de la herramienta de corte
- Fluido de corte

Variables dependientes:

- Medidas finales de la pieza
- Acabado superficial
- Propiedades mecánicas finales de la pieza
- Desgaste de la herramienta de corte
- Formación de viruta
- Potencia y fuerzas involucradas en el proceso de mecanizado

Para analizar la influencia de cada uno de estos factores se busca realizar repetidamente el proceso de mecanizado manteniendo el resto de las entradas constantes y observando los cambios generados en las variables de salida. En nuestro caso se desea estudiar la influencia de cambios en el material de trabajo, es decir, todas las otras variables deben mantenerse constantes para poder observar los efectos de utilizar aceros de similar composición con o sin presencia de plomo.

En particular, observamos el desgaste de la herramienta de corte, ya que como se detalla en las siguientes secciones, consideramos que es la variable más representativa de la maquinabilidad del material en nuestras condiciones.

1.2. Maquinabilidad

La maquinabilidad se refiere a la facilidad o dificultad que presenta un material o la respuesta del mismo a ser mecanizado en determinadas condiciones de operación [10]. Esta propiedad se mide de forma indirecta analizando algunas variables de salida como el desgaste de la herramienta de corte, la terminación superficial, la formación de viruta y las fuerzas y potencias involucradas.

Es necesario destacar que los criterios para establecer esta característica son variados, por ejemplo, si se hace énfasis en la producción tendrán mayor peso el número de piezas respecto del tiempo y el costo del proceso. Puede darse el caso en el cual lo que se requiera sea obtener la mejor terminación superficial y tolerancia geométrica dejando la productividad en segundo plano, siendo necesario modificar los parámetros que establecen que material y en que condiciones de proceso se obtiene el mejor comportamiento.

En general para evaluar la maquinabilidad de un material se requiere establecer un criterio adaptado al caso de estudio. Esto significa analizar cuales de los factores nombrados anteriormente son relevantes para las condiciones de operación determinadas.

En particular en este trabajo nos centramos en analizar comparativamente la maquinabilidad de dos aleaciones a partir del desgaste de la herramienta de corte, es decir utilizando la vida útil de la herramienta como criterio.

1.2.1. Mecanismos de desgaste

El desgaste de las herramientas se produce por el efecto combinado de las fuerzas de corte involucradas y las altas temperaturas generadas, principalmente, por la fricción. Estas condiciones de trabajo en conjunto con las propiedades del material a mecanizar y el de la herramienta dan a lugar a 4 mecanismos de desgaste: abrasión, adhesión, difusión y oxidación [1]. Estos se combinan, variando su incidencia a distintas velocidades de corte, tiempos de mecanizado y temperaturas.

- Desgaste por abrasión: Se genera por fricción entre el material de la herramienta y partículas de mayor dureza, generalmente de la viruta endurecida por la deformación plástica durante el proceso de corte o de la misma herramienta, desgastando el filo y generando desgaste de flanco y de cráter.
- Desgaste por adhesión: Se dice que es del tipo termomecánico. Las elevadas temperaturas y esfuerzos que se ponen en juego en el proceso de corte dan lugar a la aparición de microsoldaduras entre el material de la pieza y el de la herramienta, en la zona de contacto entre ambas [1] generando el filo de adhesión. Al desprenderse puede producir desprendimiento de partes del filo así como aportar al desgaste por abrasión.
- Desgaste por fatiga, corrosión y difusión: Estos desgastes tienen una relación directa con el aumento de la temperatura ya que genera un aumento de la difusión. En paralelo reduce las propiedades mecánicas de la herramienta favoreciendo el desgaste por fatiga y aumenta la velocidad de las reacciones de oxidación.

Estos desgastes están íntimamente vinculados con la velocidad de corte. A medida que aumenta la velocidad también lo hace la temperatura, tanto en la herramienta y como en la pieza. En esta situación el desgaste abrasivo pierde preponderancia respecto de los procesos de difusión y oxidación.

En la Figura 1 extraída de [1] se puede observar la prevalencia de los distintos tipos de desgaste según la temperatura.

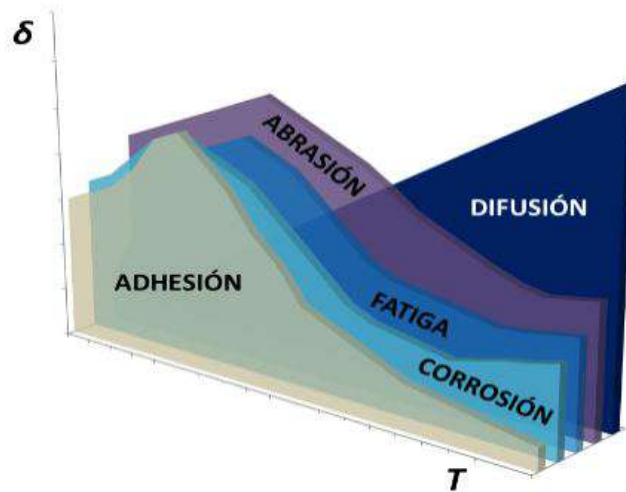


Figura 1: Influencia de mecanismos de desgaste en función de la temperatura [1]

1.2.2. Material de la pieza y desgaste

En general en la bibliografía consultada, y particularmente, según un trabajo realizado por Schulteiss [11] se establece que existen 5 características principales del material que afectan la maquinabilidad de un material, la ductilidad, su endurecimiento ante la deformación plástica, la conductividad térmica, la dureza y la abrasividad.

Un material dúctil suele ser considerado de fácil maquinado ya que consume menor potencia, sin embargo a medida que aumenta el valor de ductilidad también se incrementa la probabilidad de que se genere adhesión del mismo sobre el filo de corte de la herramienta, también llamado filo recrecido o *Built Up Edge*. Este es un fenómeno que genera desgaste del filo ya que por las fuerzas presentes durante el mecanizado se desprende este material adherido arrastrando consigo parte de la herramienta de corte, generando un deterioro aleatorio.

Respecto del endurecimiento por deformación plástica, es necesario recordar que el proceso de arranque de viruta es en sí la separación de parte de material a partir de la deformación plástica del mismo generada por el filo de la herramienta de corte. Dicho esto, a mayor endurecimiento, la superficie remanente luego de la primer pasada requerirá mayor energía para continuar con el proceso de arranque de viruta, incrementando la tensión unitaria de corte y por lo tanto las fuerzas de corte.

En la imagen siguiente se puede observar la zona deformada plásticamente durante el mecanizado de latón.

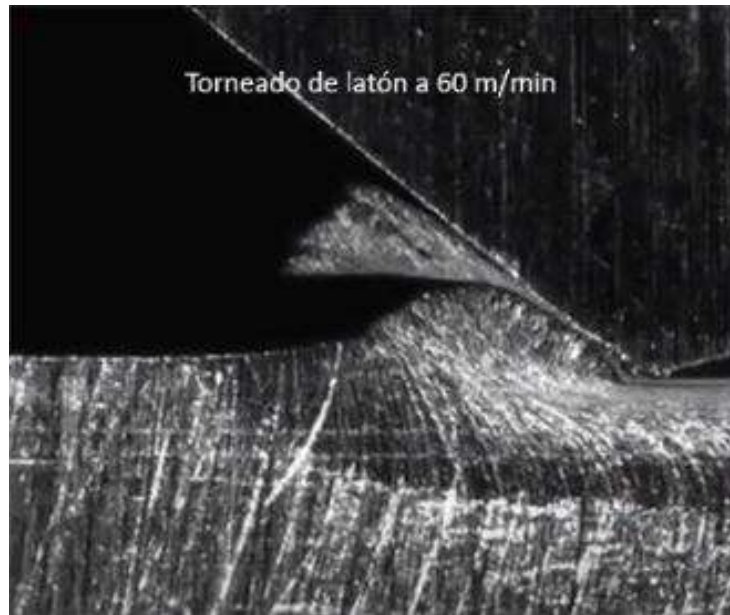


Figura 2: Zona de deformación plástica durante el proceso de arranque de viruta

Respecto de la conductividad térmica, a mayor conductividad la temperatura generada durante el proceso de mecanizado se disipará más rápidamente, reduciendo la incidencia de los mecanismos de desgaste relacionados. Así mismo, al alcanzarse mayores temperaturas debe tenerse en cuenta como se modifica el comportamiento del material de la herramienta ya que deben mantener su dureza y resistencia mecánica.

1.2.3. Criterios y tipos de desgaste

Los criterios para determinar que una herramienta de corte llegó al fin de su vida útil son varios y se vinculan estrechamente al proceso.

Algunos de estos criterios pueden ser:

- Falla catastrófica o deterioro total
- Desgaste de la herramienta
- Aumento de las fuerzas y potencia involucradas
- Pérdida de capacidad para lograr las tolerancias geométricas y terminación superficial requeridas

Según sean los mecanismos de desgaste predominantes se pueden establecer valores límites que requieren que la herramienta sea cambiada.

El primero es repentino y no es fácilmente predecible. El segundo es uno de los más adoptados ya que permite pronosticar y por lo tanto prevenir que se den los dos últimos puntos. Esto se debe a que en un proceso de mecanizado, si los parámetros del mismo se establecieron correctamente, la herramienta de corte se va a desgastar progresivamente permitiendo interpolar el momento en el cual la herramienta debe ser descartada, tanto sea porque la pieza deje de cumplir los requerimientos en cuanto a

tolerancias geométricas y terminación superficial o por ser inminente el deterioro total de la misma.

Los distintos tipos de desgaste se dan principalmente en 3 superficies:

- Desgaste de flanco → El desgaste más usual y deseado ya que es el más predecible. Se genera por la fricción entre la herramienta y el material de la pieza. Suele comenzar en la línea del filo y avanzar en sentido descendente de forma gradual.
- Desgaste de cráter → Se da como consecuencia del impacto, en general a altas velocidades, de la viruta con la cara de desprendimiento.
- Desgaste de radio → Se genera una reducción en el radio de la herramienta.

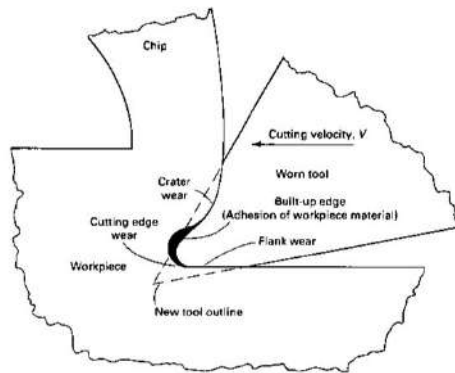


Fig. 2 Typical wear surfaces

Figura 3: Superficies de desgaste típicas

Todos estos desgastes generan una modificación en la geometría de la plaquita modificando las fuerzas y tensiones de la zona de corte. Por otro lado también puede resultar en piezas que no cumplan las tolerancias geométricas o el acabado superficial requeridos.

1.3. Dinámica del Corte

En la mayoría de los procesos de mecanizado, el sistema de fuerzas actuantes sobre la herramienta es tridimensional debido a que el corte se realiza de forma oblicua. Por lo tanto, la fuerza resultante sobre la herramienta posee tres componentes. Sin embargo, en algunas formas de mecanizado y específicamente en el torneado, se puede utilizar el modelo de corte ortogonal. En dicho modelo, la fuerza resultante posee 2 componentes básicas debido a que se asume que la herramienta de corte tiene una forma de cuña y el borde cortante es perpendicular a la velocidad de corte. Esto simplifica el sistema de fuerzas y, por lo tanto, facilita la comprensión de la dinámica del corte y del proceso de formación de viruta.

Al producirse el corte, es necesario el desprendimiento de viruta y, como consecuencia de este, la rotura de parte del material. Dicho material opone una cierta resistencia a la rotura que es necesario vencer para poder realizar el mecanizado. Por lo tanto, se plantea el sistema de fuerzas mostrado en Figura 4 [2, 10].

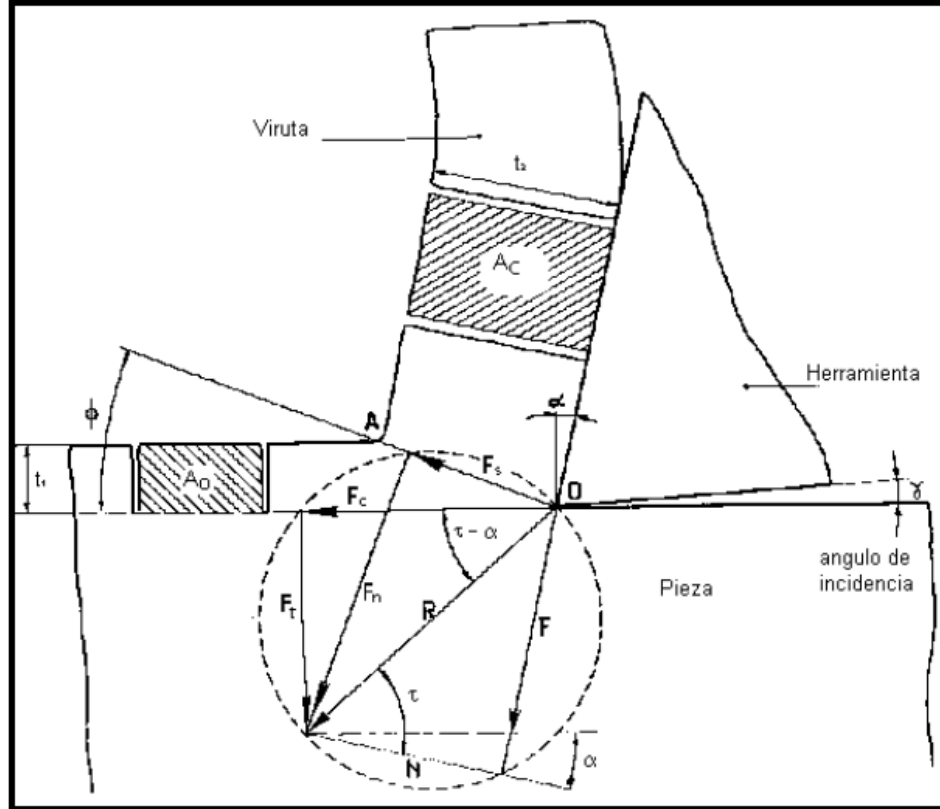


Figura 4: Sistema de Fuerzas en el corte [2]

Como primera observación, se destaca que el sistema de fuerzas observado en la Figura 4 se alcanza al suponer que la viruta es un cuerpo en equilibrio mecánico estable bajo la acción de las fuerzas ejercidas sobre ella en la cara de ataque de la herramienta y en plano de cizallamiento.

El cálculo de las fuerzas involucra dos ángulos importantes en la dinámica del corte observados en Figura 4. Estos son, el ángulo de cizallamiento ϕ y el ángulo de ataque α . En particular, ϕ es el ángulo que forma el plano de cizallamiento con la dirección de movimiento de la herramienta. Al incrementar este ángulo, el camino de corte se reduce, la viruta se torna más delgada y, por lo tanto, la fuerza requerida para remover la misma capa de metal será más pequeña. α es una variable importante en el proceso de mecanizado ya que influye sobre el ángulo de cizallamiento [12].

ϕ se calcula como sigue [10]:

$$\phi = \tan^{-1} \left[\frac{(t/t_c) \cos \alpha}{1 - (t/t_c) \sin \alpha} \right] \quad (1)$$

donde:

- t : Profundidad de corte
- t_c : Espesor de viruta.

Las componentes F y N cuya ecuación se muestra en Ecuación 2 [10], se desarrollan en la cara de ataque de la herramienta y actúan sobre la viruta. F es la fuerza de rozamiento y representa la resistencia friccional encontrada por la viruta al deslizarse sobre la cara de ataque. En cambio N es la fuerza normal a la fricción, perpendicular a la cara de ataque de la herramienta. La relación entre ambas es el coeficiente de rozamiento entre viruta y herramienta [2].

$$\begin{aligned} F &= F_c \sin \alpha + F_t \cos \alpha \\ N &= F_c \cos \alpha + F_t \sin \alpha \end{aligned} \quad (2)$$

Por otro lado, las componentes F_s y F_n cuya ecuación se observa en Ecuación 3 [10], se desarrolla en el plano de cizallamiento y, al igual que las anteriores, también actúan sobre la viruta. F_s es la fuerza de cizallamiento o fuerza cortante propiamente dicha y representa la fuerza que se debe realizar para cizallar el material en tal plano. Por otro lado, F_n es la fuerza normal al plano de cizallamiento que provoca una tensión de compresión aplicada en dicho plano [2].

$$\begin{aligned} F_s &= F_c \cos \phi - F_t \sin \phi \\ F_n &= F_t \cos \phi + F_c \sin \phi \end{aligned} \quad (3)$$

Las fuerzas que actúan sobre la herramienta y que pueden ser medidas son las dos componentes F_c y F_t . F_c actúa en la dirección del movimiento de corte y determina la cantidad de trabajo requerido para desplazar la herramienta una distancia dada. Por su parte, F_t es la fuerza de empuje que actúa perpendicular a la superficie generada y no produce trabajo. Ambas fuerzas producen flexiones de la herramienta con relación a la pieza [2].

Por lo tanto, la fuerza resultante que actúa sobre la viruta puede escribirse como la suma de las fuerzas medibles que actúan sobre la herramienta, las actuantes en el plano de cizallamiento o las que actúan sobre la cara de ataque de la herramienta. Esto último puede observarse matemáticamente en la Ecuación 4 [10].

$$\begin{aligned} R &= \sqrt{F^2 + N^2} \\ R' &= \sqrt{F_s^2 + F_n^2} \\ R'' &= \sqrt{F_c^2 + F_t^2} \\ R &= R' = R'' \end{aligned} \quad (4)$$

El trabajo total realizado por la herramienta para cortar el material se determina en base a la fuerza de corte F_c . Dicho trabajo es la suma del trabajo para vencer la fricción y para cizallar el material [2].

1.4. Formación de Viruta

En el proceso de mecanizado, la viruta es una de las variables de salida más importantes [13]. Tanto la forma como las dimensiones de las virutas obtenidas en el proceso de corte arrojan información valiosa sobre las características del mecanizado, como la calidad del corte, la vida útil de la herramienta, la velocidad de avance y la selección de los parámetros de corte adecuados. Por esto los operadores y programadores de máquinas suelen tener en cuenta el aspecto de la viruta para optimizar el rendimiento y la eficiencia del proceso de mecanizado[14, 1].

La morfología de la viruta refleja aspectos como el acabado superficial, precisión dimensional, vida útil de la herramienta y la continuidad del proceso. Es deseable obtener una tipología de viruta que se evacue de manera fácil y segura, sin afectar el acabado superficial de la pieza ni la herramienta de corte, y sin alterar la estabilidad del proceso. Una segmentación inadecuada puede generar vibraciones indeseables que causan fluctuaciones en la fuerza de corte y en la calidad superficial, así como un desgaste prematuro de la herramienta debido a vibraciones de alta frecuencia[1]. Por otro lado, el impacto de la viruta con la herramienta de corte también puede generar desgaste en la misma disminuyendo su vida útil.

Durante el proceso de mecanizado, en un corte ortogonal las fuerzas aplicadas son perpendiculares y la viruta se genera a través del cizallamiento del material trabajado desde el borde de la herramienta hasta el punto donde la superficie de la viruta se separa de la superficie de trabajo [13]. Esta deformación ocurre a lo largo de un plano de cizallamiento que forma un ángulo φ con la dirección del corte. Dicho plano divide la región deformada de la no deformada [3]. En la Figura 5 se observa la descripción del proceso de formación de viruta.

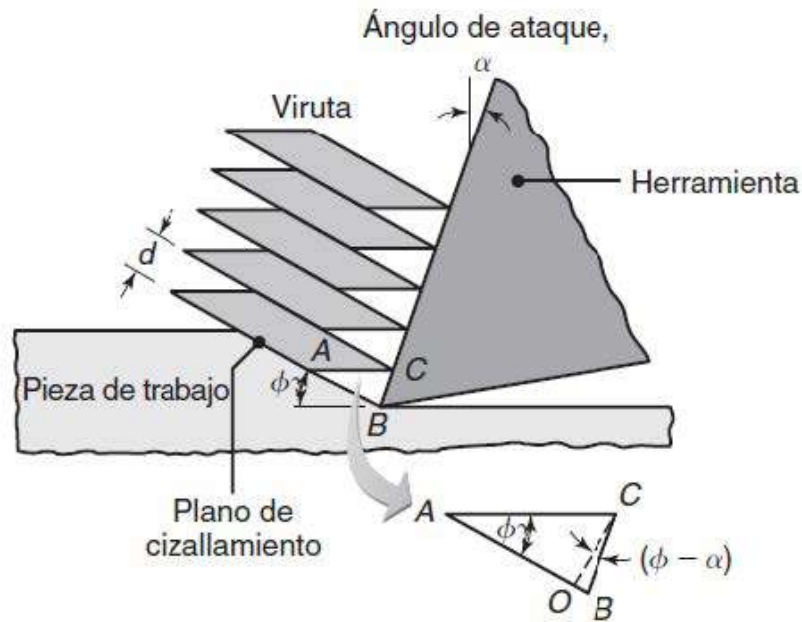
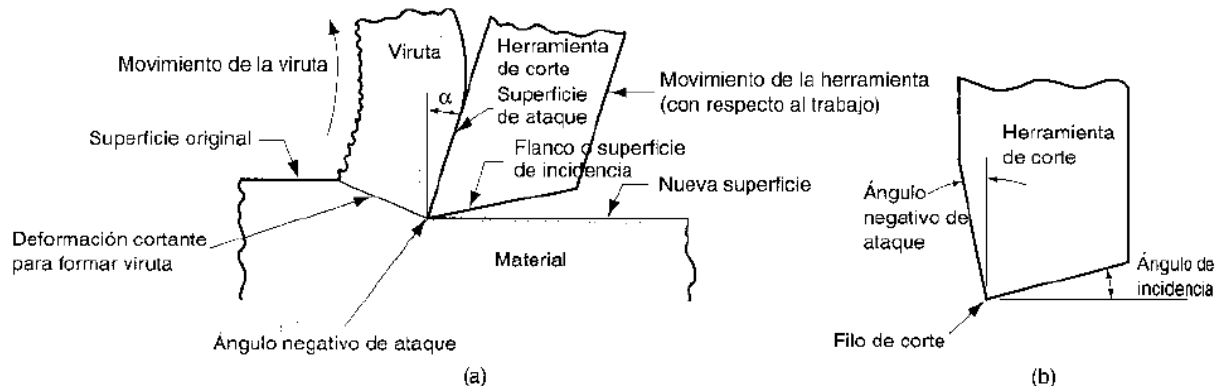


Figura 5: Proceso de formación de viruta [3]

Un criterio de clasificación más extendidos es el que establece la norma ISO 3685:1993 (E) [7] donde se la clasifica por su tamaño y forma, según la Figura 6. En ella se clasifican las virutas en ocho grupos, diferenciandolas por su morfología. Cada uno de esos grupos se subdivide a su vez en subgrupos en función del tamaño y sus características físicas.

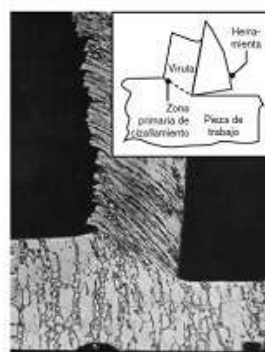
En líneas generales, independientemente del tipo de operación de mecanizado, se presentan comúnmente tres tipos:

- Viruta continua
- Viruta segmentada
- Viruta discontinua o fragmentada

Estos tres tipos de viruta se muestran en la Figura 7.

1	2	3	4	5	6	7	8
RIBBON CHIPS	TUBULAR CHIPS	CORK SCREW CHIPS	HELICAL CHIPS	SPIRAL CHIPS	ARC CHIPS	ELEMENTAL CHIPS	NEEDLE CHIPS
Short	Short	Short	Short	Flat	Loose		
Long	Long	Long	Long	Conical	Connected		
Snarled	Snarled	Snarled	Snarled	Short			

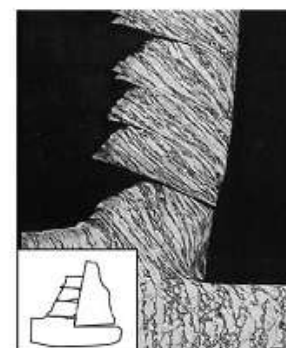
Figura 6: Tipos de viruta según norma ISO 3685:1993 (E)



Viruta continua



Viruta segmentada



Viruta discontinua

Figura 7: Tipos de viruta

La viruta continua se forma cuando el material se corta en una sola pieza mediante cizalladura pura al deslizarse por la cara de desprendimiento. Se produce por la deformación continua del metal delante de la herramienta sin fractura, seguida por un flujo

uniforme de viruta sobre la cara de la herramienta. Este tipo está asociado con baja fricción entre la viruta y la herramienta [14].

La formación de la misma se observa en mecanizados de materiales dúctiles, con velocidades de corte moderadas o altas, y avances y profundidades de corte moderadas. Esto ocurre en materiales como acero suave, cobre, aluminio, entre otros. La viruta continua es la más deseable en términos de acabado superficial, consumo de potencia y vida útil de la herramienta. Sin embargo, existe la posibilidad de que esta viruta se enrede en el portaherramientas, la pieza o el cabezal de la máquina, interrumpiendo el proceso de corte y afectando la calidad superficial de la pieza mecanizada [1].

La viruta segmentada consiste en virutas semicontinuas con forma de diente de sierra y suelen aparecer al mecanizar materiales de baja conductividad térmica, cuya resistencia disminuye rápidamente con la temperatura. Este tipo de viruta es típico en el mecanizado de aleaciones de titanio. Las virutas segmentadas provocan variaciones periódicas en las fuerzas de corte, lo que tiene un impacto negativo en el acabado superficial y el desgaste de la herramienta [1].

La viruta discontinua o fragmentada se produce cuando se aplica una fuerza que excede el límite de rotura del material. Se producen virutas discontinuas siempre que se mecanicen materiales tales como fundiciones o bronce fundido, pero también pueden originarse cuando se mecanizan materiales dúctiles a muy baja velocidad con grandes avances y profundidades de corte, y cuando se da una alta fricción entre la viruta y herramienta [13, 1].

Debido a su discontinuidad generan fluctuaciones en las fuerzas de corte y tienden a provocar vibraciones. La superficie mecanizada suele presentar un aspecto irregular, lo que se traduce en acabados superficiales pobres. Sin embargo, este tipo de viruta se evacua fácilmente de la zona de corte y puede recolectarse y almacenarse para su posterior reciclaje [1].

En síntesis, la forma y el tipo de viruta pueden depender de varios factores, como la velocidad de corte, la geometría de la herramienta, el material de trabajo y las condiciones de refrigeración y lubricación. La elección adecuada de parámetros de corte y herramientas puede ayudar a obtener el tipo de viruta deseado para garantizar un proceso de mecanizado eficiente y de alta calidad.

1.5. Condiciones de Corte

Cuando se trata de mecanizado, elegir las condiciones de corte adecuadas es de suma importancia para lograr resultados óptimos en términos de calidad, precisión y eficiencia. Las condiciones de corte incluyen parámetros como la velocidad de corte, el avance por revolución y la profundidad de corte, y su elección correcta puede marcar la diferencia entre una operación de mecanizado exitosa y una que falle. En la Figura 8 pueden observarse algunos de los parámetros que forman parte de las condiciones de corte que se deben definir al momento de mecanizar una pieza.

La velocidad de corte $V_c[m/min]$ es el factor principal que determina la duración de la herramienta. La misma es la velocidad lineal de la periferia de la pieza que está en contacto con la herramienta. Debe seleccionarse cuidadosamente para evitar proble-

mas como el sobrecalentamiento o el desgaste excesivo de la herramienta.

Una velocidad de corte demasiado alta puede generar un calentamiento excesivo, deformación plástica del filo o un desgaste muy rápido del mismo, afectando a la vida útil de la herramienta y causando una pérdida de calidad y tolerancia del mecanizado. Si bien, una alta velocidad de corte permitirá realizar el mecanizado en menos tiempo, el desgaste de la herramienta sera mayor. Por otro lado, una velocidad de corte demasiado baja puede provocar una eliminación de material ineficiente, la formación de filo de aportación en la herramienta y prolongar el tiempo de mecanizado, elevando los costos.

La velocidad de avance por revolución $f_n [mm/rev]$ se refiere a la velocidad a la que la herramienta de corte avanza en relación con la pieza de trabajo, es decir, la velocidad relativa entre la pieza y la herramienta y la velocidad a la que progresa el corte. La velocidad de avance es el producto del avance por revolución por la velocidad de rotación de la pieza. Cada herramienta puede cortar adecuadamente en un rango de velocidades de avance por cada revolución de la pieza, denominado avance por revolución (fz). Este rango depende fundamentalmente del diámetro de la pieza, de la profundidad de pasada, y de la calidad de la herramienta. Este rango de velocidades se determina experimentalmente y se encuentra en los catálogos de los fabricantes de herramientas. Además esta velocidad está limitada por las rigideces de las sujeciones de la pieza y de la herramienta y por la potencia del motor de avance de la máquina.

La velocidad de avance es decisiva para el proceso de formación de viruta y afecta al consumo de potencia ya que contribuye a la tensión mecánica y térmica. Por lo tanto, un avance inadecuado puede afectar la calidad superficial de la pieza de trabajo, la vida útil de la herramienta y la eficiencia del mecanizado. Una elevada velocidad de avance puede provocar vibraciones, desgaste prematuro de la herramienta y una mala calidad superficial. Por el contrario, un avance demasiado bajo puede resultar en una eliminación de material lenta pero con una mejora en la calidad aunque con una baja productividad, lo que incrementa el tiempo y, por lo tanto, el costo del mecanizado.

La profundidad de corte $a_p [mm]$ se refiere a la cantidad de material que se elimina en cada pasada de la herramienta de corte. Debe determinarse cuidadosamente para evitar cargas excesivas en la herramienta y posibles deformaciones o daños en la pieza de trabajo. Una profundidad de corte demasiado grande puede generar una carga excesiva en la herramienta, lo que puede provocar un desgaste acelerado o incluso la fractura de la herramienta. Por otro lado, una profundidad de corte demasiado pequeña puede resultar en una eliminación de material lenta y un mayor tiempo de mecanizado.

Otra condición de corte fundamental a definir es la utilización o no de un fluido de corte. Dicho fluido de corte, como un lubricante o refrigerante, desempeña un papel crucial en la optimización del rendimiento de la herramienta de corte y la calidad de la pieza mecanizada. La elección adecuada del fluido de corte puede ayudar a reducir la fricción, disminuir la temperatura generada durante el mecanizado, mejorar la evacuación de virutas y prolongar la vida útil de la herramienta. Sin embargo, en algunos casos, dependiendo del material de trabajo, la operación de mecanizado y las condiciones específicas, puede ser viable prescindir del uso de un fluido de corte. Esta decisión debe considerar factores como el costo, la viabilidad ambiental y las limitaciones técnicas para lograr un equilibrio óptimo entre rendimiento, eficiencia y sostenibilidad en el proceso de mecanizado.

Además al elegir las condiciones de corte, es esencial considerar las características del material de la pieza de trabajo, la geometría de la herramienta de corte, las capacidades de la máquina y los requisitos específicos de la operación de mecanizado. Además, es recomendable realizar pruebas y ajustes iterativos para optimizar las condiciones de corte y lograr los mejores resultados posibles.

En resumen, elegir las condiciones de corte adecuadas en el mecanizado es fundamental para obtener resultados exitosos. La velocidad de corte, el avance y la profundidad de corte deben seleccionarse cuidadosamente para garantizar una alta calidad, precisión y eficiencia en el proceso de mecanizado.

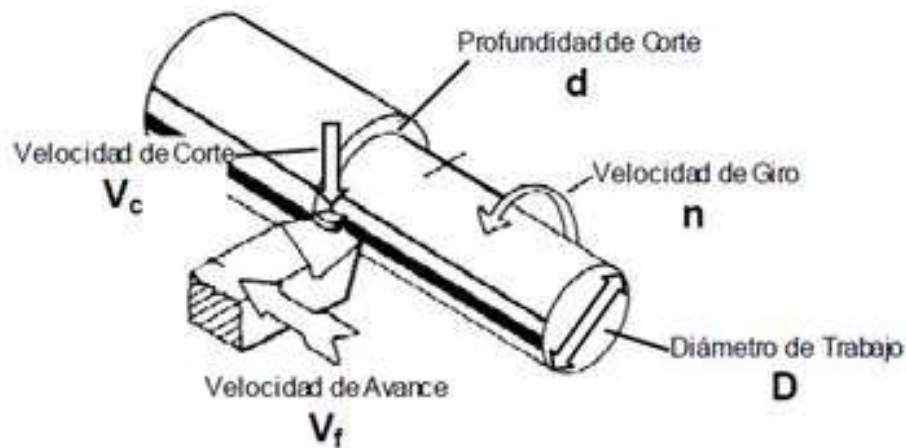


Figura 8: Condiciones de corte

1.6. Cálculo de la Potencia de Torneado

Considerando lo mencionado en la sección 1.3, al realizar el corte, se efectúa un trabajo determinado. Por lo tanto, hay una cierta energía involucrada en el mismo, la cual debe estar disponible para ser entregada en la máquina-herramienta a utilizar.

En primer lugar, se procede al cálculo de la Velocidad de Corte en un proceso de torneado. Dicha velocidad puede determinarse gracias al dato de las revoluciones por minutos del husillo y la siguiente Ecuación 5 [12]:

$$V_c = \frac{n \times \pi \times D_c}{10^3} \quad (5)$$

donde:

- $V_c[m/min]$: Velocidad de corte
- $n[rev/min]$: Velocidad del husillo
- $D_c[mm]$: Diámetro de la pieza

Por esta ecuación, puede observarse que la velocidad de rotación de la husillo es directamente proporcional a la velocidad de corte e inversamente proporcional al diámetro de la pieza.

Como segundo paso, se calcula la Velocidad de Arranque de Viruta Q , la cual será útil para el cálculo de la Potencia Neta de Corte. Dicha variable se calcula con la siguiente Ecuación 6 [12] :

$$Q = V_c \times a_p \times f_n \quad (6)$$

donde:

- $Q[cm^3/min]$: Velocidad de arranque de viruta
- $V_c[m/min]$: Velocidad de corte
- $a_p[mm]$: Profundidad de corte
- $f_n[mm/rev]$: Avance por revolución

De esta forma, la Potencia Neta de Corte (P_c) para un torneado se calcula según la Ecuación 7 y con las variables que se observan en la Figura 9 :

$$\begin{aligned} P_c &= \frac{Q \times k_c}{60 \times 10^3} \\ &= \frac{V_c \times a_p \times f_n \times k_c}{60 \times 10^3} \end{aligned} \quad (7)$$

donde:

- $P_c[kW]$: Potencia neta de corte
- $Q[cm^3/min]$: Velocidad de arranque de viruta
- $V_c[m/min]$: Velocidad de corte
- $a_p[mm]$: Profundidad de corte
- $f_n[mm/rev]$: Avance por revolución
- $k_c[N/mm^2]$: Fuerza de corte específica (Es una constante que depende del material de la pieza, . Representa la fuerza tangencial necesaria para cortar una sección transversal de $A_0=1mm^2$ y se determina de forma experimental, por lo tanto, se puede encontrar en tablas)

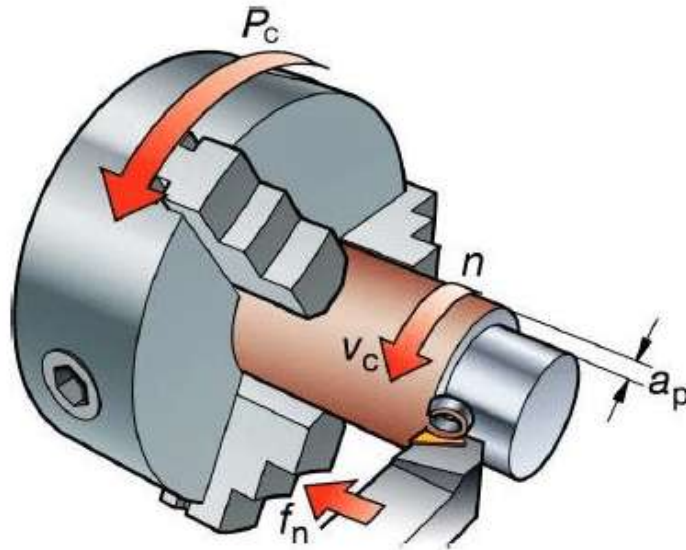


Figura 9: Variables que influyen en el consumo de potencia

Al igual que cualquier máquina, las mismas no son ideales y, por lo tanto, no poseen un rendimiento del 100 %. Es por ello que se debe tener en cuenta la diferencia entre la potencia entregada por la máquina-herramienta y la que la misma absorbe durante su funcionamiento que será: la potencia que se necesite para el corte, para el suministro de fluidos de corte, las pérdidas que pueda llegar a haber, etc. Por lo tanto, la potencia disponible del torno debe ser mayor que la necesaria para el corte [3]. Por lo tanto, el rendimiento se calculará según la Ecuación 8 :

$$\eta = \frac{P_c}{P_{abs}} = \frac{P_c}{P_c + P_0} \quad (8)$$

donde:

- Potencia neta, útil o al husillo P_c : Potencia suministrada para el corte del material
- Potencia absorbida P_{abs} : Potencia consumida por el motor cuando la máquina-herramienta esta cortando.
- Potencia de pérdidas o de vacío P_0 : Potencia por pérdidas eléctricas, magnéticas, mecánicas, entre otros.

Considerando las potencias mencionadas, la transmisión de potencia en el torno se desarrollo como se observa en la Figura 10

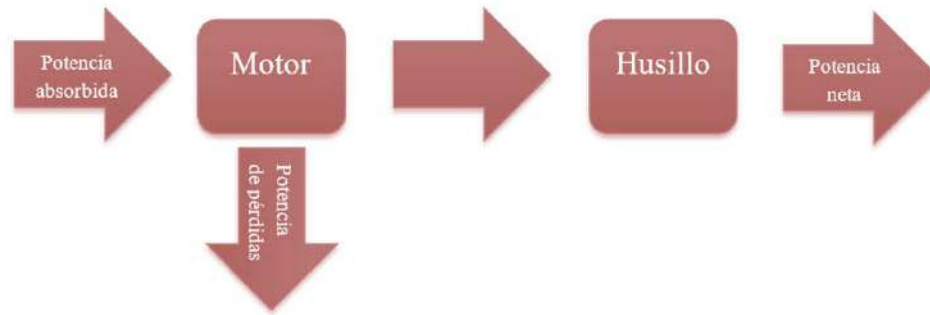


Figura 10: Transmisión de potencia en el torno [3]

1.7. Norma ISO 3685:1993 (E): Tool-life testing with single-point turning tools

La norma ISO 3685:1993 (E), titulada "Tool-life testing with single-point turning tools", establece procedimientos estandarizados y condiciones para llevar a cabo pruebas de vida útil de herramientas monocortantes durante el torneado de piezas de acero o fundiciones. Dependiendo del objetivo del ensayo, se mantienen constantes ciertas variables mientras otras se modifican.

Entre los objetivos más comunes de estas pruebas se incluyen la evaluación de las propiedades de maquinabilidad de un material, la comparación de herramientas (por ejemplo, en términos de material o geometría), la comparación de fluidos de corte o la determinación de parámetros de corte.

La norma ISO 3685:1993 (en) describe los métodos de prueba y los criterios de evaluación de la vida útil de las herramientas de torneado, así como establece directrices para la selección de las condiciones de corte y el control de las variables del proceso. También se proporcionan pautas para la presentación y análisis de los resultados obtenidos en las pruebas. Esta norma es esencial para garantizar la calidad y eficiencia del mecanizado de metales, y es ampliamente utilizada por fabricantes de herramientas, proveedores de servicios de mecanizado y otros expertos en la industria.

En las diferentes secciones de la norma se recomiendan las condiciones estándar que debe presentar el material, la geometría, el material y el recubrimiento de la herramienta, el fluido de corte, las condiciones de corte, etc. En cuanto a la herramienta, la misma no debe poseer recubrimiento y debe seleccionarse un criterio de fin de vida útil según el material del que esta fabricada. Como primera instancia, suponiendo que el desgaste predominante en tal operación es el desgaste de flanco, se mencionan dos criterios para el fin de la vida útil de la herramienta de acero rápido:

1. El ancho máximo del desgaste de flanco alcanza los 0,6mm, es decir, $VB_{Bmax}=0,6\text{mm}$, si dicho desgaste no se desarrolla únicamente en la zona B. Observar Figura 14 donde se determina cual es VB_{Bmax} .
2. El ancho promedio del desgaste de flanco alcanza los 0,3mm, es decir, $VB_B=0,3\text{mm}$ si dicho desgaste se da principalmente en la zona B. Observar Figura 14 donde se determina cual es VB_B .

3. Falla catastrófica

Generalmente se seleccionan uno de los dos primeros criterios debido a que la falla catastrófica es poco deseada y muy perjudicial para un proceso de producción.

En cuanto al ensayo en sí, consiste en realizar cilindrados sucesivos de barras cilíndricas donde, por lo menos, se registren cuatro velocidades de corte específicas para cada condición de corte. La mayor velocidad de corte debe ser tal que la vida útil de la herramienta no sea menor a cinco minutos y la pieza no debe alcanzar una relación longitud/diámetro mayor a diez para evitar que aparezcan vibraciones.

Torneando con una de las velocidades de corte elegidas, se deben ir tomando sucesivas mediciones del desgaste de flanco a intervalos adecuados para construir una curva como la observada en la Figura 15. Dicha gráfica muestra la relación entre el desgaste de flanco y el tiempo de vida útil de la herramienta para cierta velocidad de corte.

Una vez realizados los ensayos con cada velocidad de corte, se obtiene una gráfica como la mostrada en la Figura 16. En ella puede observarse que, al aumentar la velocidad de corte, el tiempo de corte disminuye. Luego, se debe trazar una gráfica bilogarítmica de la velocidad de corte en función de la vida útil de la herramienta como la observada en Figura 17. Los puntos mostrados en la misma se obtienen mediante aproximación con una función potencial que corresponde a la Ecuación de Taylor (Ecuación 12)

Por último, la norma recomienda ciertas formas de presentar los resultados obtenidos, algunas de ellas incluidas en los anexos.

En los ensayos referenciados ([8, 9]), se toma como relevante la velocidad de corte en la cual se alcanza el criterio de vida útil de la herramienta a los 15 minutos y a los 30 minutos del torneado continuo del material. Dicha velocidad se utiliza como referencia para comparar la maquinabilidad de distintos materiales. Cabe resaltar que en dichos ensayos se utiliza una velocidad de corte aproximada de 180mm/min a 260mm/min, que corresponde a las velocidades de corte utilizadas en la producción de las piezas fabricadas con dichos materiales.

1.8. Aceros de Corte Libre

Los aceros de corte libre se caracterizan por su excelente maquinabilidad. Más allá de ser un concepto difícil de definir podría resumirse en que el proceso de arranque de viruta es más eficiente que para otro tipo de aleaciones. Estos aceros están diseñados especialmente para aplicaciones donde la facilidad para ser mecanizados es la propiedad más importante, mientras que otras propiedades mecánicas, como la resistencia mecánica, la resistencia a la fatiga, el deformado en frío, la soldabilidad y la forjabilidad, tienen menor importancia.

Para obtener estas características, estos aceros contienen aleantes como el manganeso, el fósforo, el azufre, el selenio o el plomo. Esto permite trabajar a mayores velocidades de corte con una considerable vida útil de la herramienta, lo que se traduce en un aumento de la tasa de producción y, por lo tanto, se pueden cubrir de mejor forma los costos de mecanizado.

Estas aleaciones se utilizan comúnmente para fabricar piezas pequeñas o medianas en masa, que requieren un acabado fino y buenas condiciones de maquinabilidad, y cuyos requisitos mecánicos son bajos. Por lo general, se utilizan barras trefiladas con un diámetro igual o menor a 50 mm y las velocidades de corte rara vez superan los 200 m/min. Algunas aplicaciones típicas incluyen bujes, bulones, tornillería, conexiones y acoples para la industria hidráulica [4].

En resumen, los aceros de corte libre son una opción popular para aplicaciones donde la facilidad de mecanizado es la prioridad, y son ideales para la producción en masa de piezas pequeñas o medianas con un acabado fino. Aunque no son los más fuertes o resistentes, son extremadamente útiles para ciertas aplicaciones.

1.8.1. Efecto de los elementos aleantes en los Aceros de Corte Libre

Los aceros de Corte Libre son aleaciones que contienen un bajo a medio porcentaje de carbono y ciertos aditivos, como azufre (S), plomo (Pb), telurio (Te) y bismuto (Bi), los cuales mejoran su capacidad para ser maquinados.

Aunque se utilizan principalmente aceros con bajo contenido de carbono (0,13 %), algunos aceros con un mayor porcentaje de carbono también pueden proporcionar una respuesta mejorada a los tratamientos térmicos, además de las características de maquinabilidad. Según la Figura 11, que muestra el contenido de carbono frente al índice de maquinabilidad, se observa que el mayor índice se obtiene alrededor del 0,1 % de carbono, y tanto por encima como por debajo de este valor, la maquinabilidad disminuye.

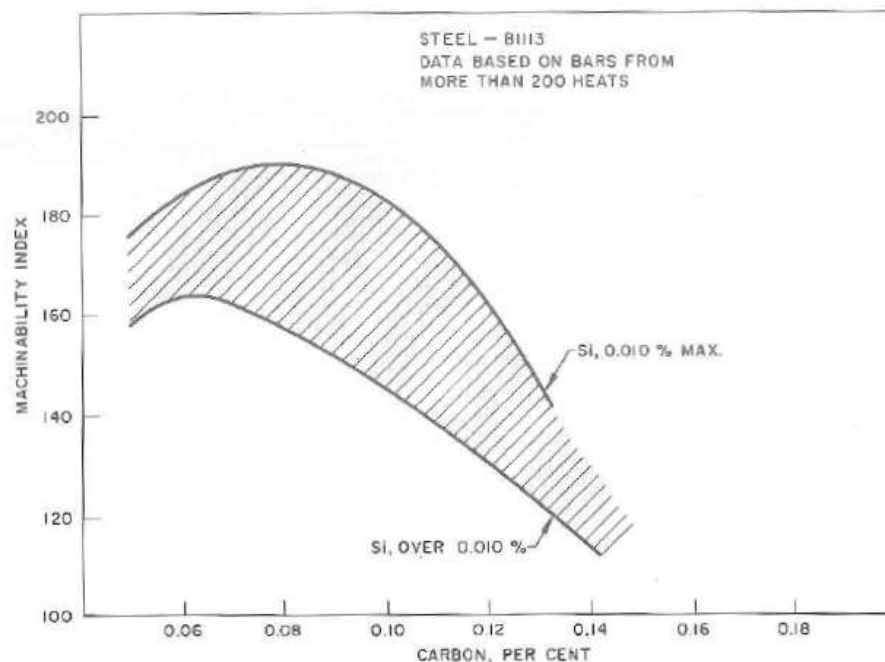


Figura 11: Porcentaje de carbono vs. índice de maquinabilidad [4]

El azufre por si solo tiende a reaccionar con el hierro presente en el acero formando

sulfuros de hierro (FeS). Este compuesto tiene un bajo punto de fusión (940°C) y se forma en bordes de grano de la austenita. En operaciones donde las temperaturas son altas, como la laminación y la forja, el mismo se encuentra en estado líquido y puede ocasionar fisuras transgranulares que lleven a la falla frágil del material. Este fenómeno se conoce como Hot-Shortness.

Para evitarlo, se agrega una suficiente cantidad de manganeso a la aleación. De esta forma, el manganeso reacciona con el azufre para formar sulfuros de manganeso (MnS). Este compuesto tiene una mayor temperatura de fusión (1610°C) y no se forma en bordes de grano. Por lo tanto, el azufre se presenta en el acero como inclusiones de sulfuros de manganeso y la cantidad, distribución y morfología de los mismos son los encargados de modificar las condiciones de mecanizado y otras propiedades como la conformabilidad en frío y la resistencia a la fatiga.

En su estudio [15] menciona que la cantidad de MnS depende de la cantidad de azufre en el acero y su morfología depende del grado de desoxidación y la tasa de enfriamiento del acero durante la cristalización. Por lo tanto, la morfología de los sulfuros puede ser clasificada como:

- Tipo 1: Sulfuros globulares distribuidos aleatoriamente. Se encuentran cuando la desoxidación es pobre donde el porcentaje de oxígeno en el acero alto (mayor a 0,01 %). Estos sulfuros tienen una alta ductilidad.
- Tipo 2: Sulfuros delgados precipitados en cadena que se forman en las últimas etapas de la cristalización de forma interdendrítica y en los bordes de grano. Se dan cuando la desoxidación es completa y, por lo tanto, el porcentaje de oxígeno es menor a 0,01 %.
- Tipo 3: Sulfuros con una estructura cristalina definida, de forma irregular, distribuidos aleatoriamente que precipitan en borde de grano. Estos se dan cuando la desoxidación es excesiva.

El oxígeno presente en el acero se controla mediante ciertos elementos desoxidantes como el Zirconio, Titanio, Calcio y Vanadio pero el elemento con mayor influencia en la desoxidación es el Aluminio.

En los aceros de Corte Libre generalmente se encuentran sulfuros del tipo 1 y 2. Las inclusiones del tipo 1 son las deseadas para incrementar las condiciones de maquinabilidad por su espesor y forma alargada en el caso de que sean laminados. En cuanto a los sulfuros del tipo 2, se encuentran en mayor cantidad y, en comparación con los primeros, pueden disminuir las propiedades mecánicas y de procesamiento del acero.

Los sulfuros de manganeso incrementan la maquinabilidad debido al efecto que generan en el proceso de formación de la viruta. La influencia de los sulfuros se listan a continuación [5]:

- Tienen propiedades diferentes de la matriz metálica, por lo tanto, actúan como discontinuidades o vacancias, promoviendo la fragmentación de la viruta. Debido a su forma alargada, forman una entalla que incrementa localmente el esfuerzo cortante y reduce la tensión de rotura en la zona de formación de la viruta.

- Poseen gran plasticidad, por lo tanto forman una capa protectora en la cara de desprendimiento de la herramienta que reduce la fricción entre viruta y herramienta, actuando entonces como lubricantes. La reducción de la fuerza de fricción produce un ángulo de corte mayor y mayor cantidad de viruta cortada
- Al aumentar la cantidad de sulfuros, disminuye la adhesividad entre el material a mecanizar y el material de la herramienta, decreciendo las dimensiones del filo recrecido.

Por lo tanto, facilitan el mecanizado incrementando la vida útil de la herramienta ya que disminuyen las fuerzas de corte, lo que se condice con un menor aumento de temperatura, se incrementa la calidad del acabado superficial y permite que las velocidades de corte sean mayores. Si bien lo anteriormente mencionado promueve una disminución de los costos, se sacrifican ciertas propiedades como el deformado en frío, soldabilidad y forjabilidad debido a su bajo punto de fusión.

En cuanto al plomo, este elemento es inerte en los aceros mencionados y no forma compuestos con ningún elemento. La solubilidad del plomo a temperatura ambiente es prácticamente nula y, por lo tanto, precipita aislado o rodeando inclusiones no metálicas como los sulfuros de manganeso. En la Figura 12 adquirida de la bibliografía consultada, puede observarse gracias que el plomo se encuentra rodeando al sulfuro de manganeso dándole una forma más alargada. Esta imagen fue obtenida mediante una microscopio óptico de barrido (SEM).

La influencia del plomo en la maquinabilidad tiene que ver con [5]:

- Su acción como lubricante ya que en el proceso de corte, la temperatura se incrementa localizadamente llevando al plomo a un punto cercano al de fusión. Por lo tanto, forma una interfase entre la cara de desprendimiento de la herramienta y la viruta que disminuye la fricción entre ambas.
- Además, por la misma razón que el anterior ítem, cuando se encuentran en estado líquido, producen la fragilización del material, lo que produce microfisuras que reducen la tensión de cizallamiento
- Al presentar propiedades diferentes a la matriz metálica concentra tensiones, con lo cual es similar a una discontinuidad, produciendo un efecto de entalla que disminuye la tensión de cizallamiento del acero.

Los efectos mencionados en los dos últimos ítems producen que la viruta se fragmente más fácilmente, con una consecuente disminución en la energía utilizada para el proceso de maquinado.

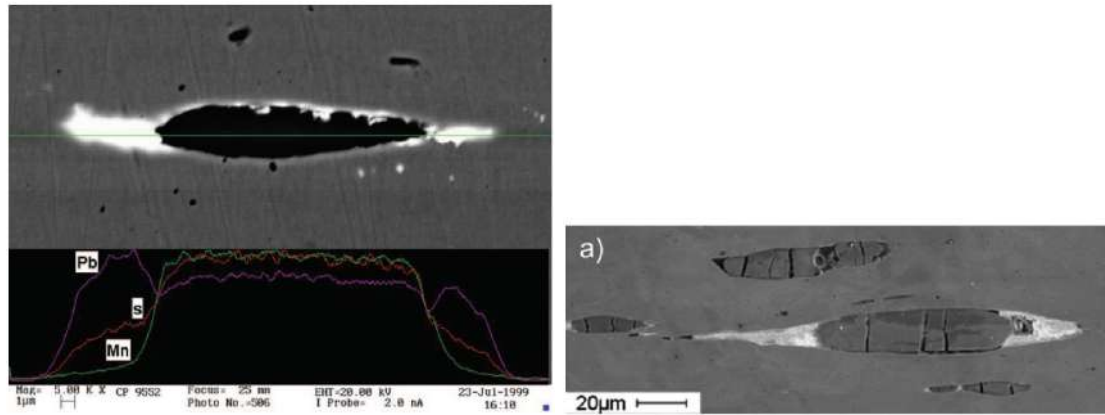


Figura 12: Plomo rodeando una inclusión de MnS [5]

1.8.2. Clasificación de los Aceros de Corte Libre

Según SAE - AISI (Society of Automotive Engineers - American Iron and Steel Institute) los aceros de corte libre son aquellos designados como [16]:

1. 11xx: 0,08 a 0,13 %S - Aceros resulturados
2. 12xx: 0,24 a 0,33 %S, incorporan fósforo (P) - Aceros resulturados y refosforizados

donde xx es porcentaje de carbono del acero.

Estos aceros pueden clasificarse en tres grupos distintivos en función de sus características.

El Grupo I está compuesto por aceros efervescentes de bajo porcentaje de carbono que tienen excelentes condiciones de maquinado. Estos aceros tienen el mayor contenido de azufre y a aquellos a los que se les agrega plomo (Pb) se les designa con la letra "L" en su nombre, seguida del porcentaje de carbono del acero. Algunos de los aceros incluidos en este grupo son SAE 1110, 1111, 1112, 1113, 12L13, 12L14 y 1215.

El Grupo II está compuesto por aceros de bajo porcentaje de carbono que poseen una buena combinación de maquinabilidad y respuesta a tratamientos térmicos. Por ello, tienen un menor contenido de fósforo y algunos de azufre, pero un aumento en la cantidad de manganeso (Mn) para mejorar su templabilidad. Algunos de los aceros incluidos en este grupo son SAE 1108, 1109, 1116, 1117, 1118 y 1119.

El Grupo III está compuesto por aceros de medio porcentaje de carbono que combinan buena maquinabilidad y respuesta al temple en aceite. Algunos de ellos son SAE 1132, 1137, 1139, 1140, 1141, 1144, 1145, 1146 y 1151.

Según el catálogo de uno de los fabricantes de aceros de corte libre en forma de barras en Argentina, ArcelorMittal Acindar, las barras de tales aceros tienen las propiedades mecánicas detalladas en la Figura 13 [6].

A través de dicha figura, es posible realizar una comparación entre los dos aceros disponibles para la prueba que se evaluarán en este trabajo. Estos son el acero SAE 12L14 y SAE 1212. Ambos materiales presentan características similares en cuanto

a resistencia a la tracción, límite de fluencia, zona de estricción y dureza. La principal diferencia se encuentra en el parámetro de maquinabilidad, donde el acero SAE 12L14, debido a la presencia de plomo en su estructura, exhibe una mayor maquinabilidad en comparación con el acero SAE 1212.

Además, se puede apreciar una clara diferencia en las propiedades entre un producto laminado en caliente y aquel que ha pasado por un proceso adicional de trefilado. El trefilado consiste en una reducción del diámetro y del enderezado de la barra en frío, lo que resulta en una deformación plástica que incrementa las propiedades de resistencia y dureza, pero reduce la ductilidad del material. Durante el proceso, el material se somete a una fuerza de tracción que produce una reducción en su diámetro y una elongación longitudinal, así como también un enderezado de la misma.

. Este proceso tiene varios efectos en el material. En primer lugar aumenta la resistencia del material debido a la deformación plástica intensa y la alineación de su estructura cristalina. Además, mejora la dureza del material gracias al endurecimiento por deformación, así como también incrementa la rectitud de la misma de forma permitiendo el empleo de mayores revoluciones por minutos con menos vibraciones al torneear. No obstante, el trefilado afecta a la ductilidad del material como se observa en el cambio de valores de alargamiento y elongación en la Figura 13.

En particular, el acero AISI 12L14 se clasifica como un acero de bajo contenido de carbono con excelentes características de maquinabilidad debido a la presencia de plomo en su composición química. Además, presenta una buena ductilidad, lo que lo hace apto para procesos de doblado y remachado, aunque no es adecuado para soldaduras. Su punto de fusión se encuentra aproximadamente en los 1540 °C.

Este tipo de acero se emplea principalmente en la fabricación de piezas que requieren precisión dimensional y un acabado superficial óptimo, sin necesidad de propiedades mecánicas sobresalientes. Algunos ejemplos de aplicaciones incluyen engranajes, ejes, pernos, piezas para procedimientos quirúrgicos y dentales, así como componentes para la industria automotriz [17].

Según norma SAE J1397

SAE / AISI	Estado	Resistencia a la tracción (MPa)	Límite de fluencia (MPa)	Alargamiento A (2") (%)	Estrucción Z (%)	Dureza Brinell (HB)	Maquinabilidad (1212=100%)
Aceros de corte libre (resulfurados y refosforados; resulfurados)							
1108	Laminado	340	190	30	50	101	80
	Trefilado	390	320	20	40	121	
1117	Laminado	430	230	23	47	121	90
	Trefilado	480	400	15	40	137	
1132	Laminado	570	310	16	40	167	75
	Trefilado	630	530	12	35	183	
1137	Laminado	610	330	15	35	179	70
	Trefilado	680	570	10	30	197	
1140	Laminado	540	300	16	40	156	70
	Trefilado	610	510	12	35	170	
1141	Laminado	650	360	15	35	187	70
	Trefilado	720	610	10	30	212	
1144	Laminado	670	370	15	35	197	80
	Trefilado	740	620	10	30	217	
1146	Laminado	590	320	15	40	170	70
	Trefilado	650	550	12	35	187	
1151	Laminado	630	340	15	35	187	65
	Trefilado	700	590	10	30	207	
1211	Laminado	380	230	25	45	121	95
	Trefilado	520	400	10	35	163	
1212	Laminado	390	230	25	45	121	100
	Trefilado	540	410	10	35	167	
1213	Laminado	390	230	25	45	121	135
	Trefilado	540	410	10	35	167	
12L14	Laminado	390	230	22	45	121	160
	Trefilado	540	410	10	35	163	

Figura 13: Propiedades mecánicas de los aceros de corte libre de [6]

La Figura 13 hace referencia a la norma SAE J1397, titulada "Estimated Mechanical Properties and Machinability of Steel Bars" (Propiedades Mecánicas Estimadas y Maquinabilidad de Barras de Acero), la cual fue desarrollada por la Sociedad de Ingenieros Automotrices (SAE). Esta norma aborda las propiedades mecánicas y la maquinabilidad de las barras de acero.

La norma SAE J1397 proporciona información y recomendaciones sobre las propiedades mecánicas de diversos grados de acero utilizados en la fabricación de barras. Estas propiedades incluyen la resistencia a la tracción, el límite de fluencia, la elongación, la dureza, e incluso la maquinabilidad.

Es importante tener en cuenta que esta norma sirve como una referencia o guía, brindando estimaciones y recomendaciones para las propiedades mecánicas y la maquinabilidad. Es comúnmente utilizada por fabricantes, ingenieros y profesionales de la industria para evaluar y seleccionar los materiales adecuados para aplicaciones específicas en el campo automotriz y otros sectores relacionados.

2. Capítulo 2: Procedimiento de ensayo de laboratorio para estudiar la maquinabilidad de aceros de corte libre

En el contexto de este proyecto, resulta complejo aplicar la norma ISO 3685:1993(E) debido a la limitada cantidad de material disponible para las piezas de trabajo y la falta de disponibilidad de un torno CNC que permita alcanzar los niveles de potencia y velocidad utilizados en la industria para procesar este tipo de aceros. Por ello no resulta posible cumplir con los requisitos establecidos por la norma, tales como un desgaste de flanco de 0,3mm, o un tiempo de torneado de aproximadamente 30 minutos, como se describen en los ensayos de la bibliografía [8].

Luego de una investigación exhaustiva de la bibliografía, no se halló información sobre adaptaciones o procedimientos comparables a la norma en condiciones limitadas de material. En consecuencia, el objetivo principal del proyecto es desarrollar un procedimiento de ensayo de maquinabilidad de un acero de corte libre en condiciones de laboratorio, teniendo en cuenta la limitada cantidad de material y potencia de máquina disponibles. Es importante tener en cuenta que, en la investigación y el desarrollo de nuevos materiales, se suelen realizar fundiciones en pequeñas cantidades, lo que resulta en productos con dimensiones reducidas. Por esta razón, resulta valioso elaborar un procedimiento para evaluar la maquinabilidad de un nuevo material en estas condiciones, obteniendo resultados comparables entre experimentos.

2.1. Introducción

El siguiente documento especificará una técnica recomendada para evaluar la maquinabilidad de un acero de corte libre en condiciones de laboratorio cuando se dispone de una cantidad limitada de material o este es de pequeñas dimensiones. Este procedimiento también puede aplicarse a otros materiales mediante la modificación y definición de las variables que correspondan.

La especificación del procedimiento de ensayo se encuentra detallada en la Sección 2.12. Las secciones que siguen brindarán apoyo adicional y ofrecerán recomendaciones importantes a tener en cuenta.

La característica de maquinabilidad del material se determinará mediante la evaluación del desgaste de flanco de la herramienta sin recubrimiento en un proceso de cilindrado en el torno. Al fijar todas las variables, excepto el material, se puede comparar el desgaste de la herramienta entre diferentes materiales, y así determinar su propiedad de maquinabilidad.

Es importante mencionar que este procedimiento se basa en la norma ISO 3685:1993 (E): Tool-life testing with single-point turning tools. En caso de requerir información más detallada, se recomienda consultar la norma, teniendo en cuenta siempre su aplicabilidad a las condiciones de laboratorio.

Además, se recomienda adaptar la norma a las condiciones industriales en las que va a trabajar el material, de forma que los resultados sean más confiables, extrapolables y comparables.

2.2. Objetivo

El objetivo del procedimiento es listar las etapas del ensayo para evaluar la característica de maquinabilidad de un acero de corte libre mediante la evaluación del desgaste de una herramienta sin recubrimiento en un proceso de cilindrado en el torno.

2.3. Alcance

El alcance de este procedimiento se aplica a los aceros de corte libre cuando se dispone de una cantidad limitada de material o cuando este es de pequeñas dimensiones. Además, este procedimiento puede ser adaptado para evaluar la maquinabilidad de otros materiales al modificar y definir las variables correspondientes.

2.4. Definiciones

- Desgaste de la herramienta: Se refiere a la alteración en la geometría de la herramienta durante el corte, como resultado de la pérdida gradual de material de la herramienta o la deformación.
- Medida del desgaste de la herramienta: Se trata de la dimensión que será medida para indicar cuantitativamente el grado de desgaste de la herramienta.
- Criterio de vida útil de la herramienta: Establece un valor límite para la medida del desgaste de la herramienta o para la ocurrencia de un fenómeno.
- Vida útil de la herramienta: Hace referencia al tiempo de corte necesario para alcanzar el criterio de vida útil de la herramienta.
- Condiciones corte: Parámetros y variables que determinan la forma en que una herramienta de corte interactúa con la pieza de trabajo durante el proceso de mecanizado.
- Velocidad de corte: $V_c[m/min]$ Velocidad lineal de la periferia de la pieza que esta en contacto con la herramienta. Se calcula según 9.

$$V_c = \frac{n \times \pi \times D_c}{10^3} \quad (9)$$

donde:

- $V_c[m/min]$: Velocidad de corte
- $n[rev/min]$: Velocidad del husillo
- $D_c[mm]$: Diámetro de la pieza
- Velocidad del husillo: Velocidad máxima del husillo del torno en revoluciones por minuto. Se calcula según 10.

$$n = \frac{V_c \times 10^3}{\pi \times D_c} \quad (10)$$

donde:

- n [rev/min]: Velocidad del husillo
- V_c [m/min]: Velocidad de corte
- D_c [mm]: Diámetro final de la pieza
- Profundidad de corte: a_p [mm] se Refiere a la cantidad de material que se elimina en cada pasada de la herramienta de corte
- Avance por revolución: f_n [mm/rev] Velocidad relativa entre la pieza y la herramienta.
- Potencia de torneado: Potencia neta de torneado en kW. Se calcula según 11

$$P_c = \frac{V_c \times a_p \times f_n \times k_c}{60 \times 10^3} \quad (11)$$

donde:

- P_c [kW]: Potencia neta de corte
- Q [cm³/min]: Velocidad de arranque de viruta
- V_c [m/min]: Velocidad de corte
- a_p [mm] : Profundidad de corte
- f_n [mm/rev]: Avance por revolución
- k_c [N/mm²] : Fuerza de corte específica.

2.5. Pieza de trabajo

Se recomienda utilizar barras laminadas de sección circular con una relación longitud y diámetro adecuados para evitar vibraciones que puedan afectar al mecanizado, así como fenómenos de flexión o desequilibrio de la pieza en el torno.

Es crucial incluir información relevante sobre el material de trabajo en el informe y en la hoja de reporte, como su grado, composición química, propiedades mecánicas, características de la microestructura, dureza, detalles completos de la ruta de procesamiento del material y cualquier tratamiento térmico que se haya realizado. Esta información es fundamental para comprender las características y propiedades del material, lo que facilitará la interpretación de los resultados de las pruebas. Por lo tanto, se sugiere prestar especial atención a este punto y garantizar que se proporcione información completa y precisa en el informe.

Es importante que el acabado superficial del material de trabajo sea adecuado para no afectar los resultados de las pruebas. En consecuencia, se debe retirar cualquier capa que se haya formado durante las etapas de procesamiento del material. Se recomienda prestar especial atención a este punto para garantizar la calidad de los resultados obtenidos.

La dureza del material de trabajo se deberá determinar en toda la sección transversal de uno de los extremos de cada barra utilizada como pieza de trabajo. Se deben

listar en el informe pertinente los puntos donde se medirá esta propiedad y los valores obtenidos.

2.6. Herramienta

La herramienta utilizada para las pruebas no debe tener ningún recubrimiento para que el desgaste sea más pronunciado y se pueda medir fácil y rápidamente el cambio en la geometría de la herramienta de corte. Adicionalmente el uso de una herramienta con recubrimiento generaría variaciones en el avance del desgaste según se encuentre en contacto con el recubrimiento o con el material base.

Por estas razones se recomienda seleccionar una herramienta comercial sin recubrimiento que cumpla con las normas en cuanto a geometría, grado de material, condiciones de acabado superficial, tolerancias, etc.

2.7. Equipamiento

Para garantizar la constancia de la velocidad de corte durante el ensayo, es esencial contar con un torno automático con una variación de velocidad continua que abarque el rango de velocidades necesario para imitar las condiciones en las que comúnmente se mecaniza el material ensayado. De esta manera, la velocidad de corte se mantendrá constante aunque el diámetro de la pieza se reduzca debido a los sucesivos cortes. Además, es recomendable que el torno esté en buenas condiciones y sea estable para evitar vibraciones o deflexiones anormales durante el ensayo.

Asimismo, se requerirá un equipo o dispositivo que permita medir con precisión el desgaste de la herramienta. Esto puede realizarse mediante un microscopio portátil digital con aumento de al menos 800X o con un microscopio óptico que permita digitalizar las imágenes tomadas para poder realizar las mediciones y registrar el avance del desgaste.

Además, se requerirán otros equipos para llevar a cabo el ensayo, tales como un cronómetro para registrar el tiempo de corte, un microscopio y el equipo necesario para realizar las micrografías, un durómetro y cualquier otra maquinaria que sea útil para el mismo.

Es recomendable que se registre en el informe del ensayo el equipamiento utilizado y las características de los mismos.

2.8. Condiciones de corte

Para llevar a cabo el ensayo es necesario seleccionar al menos 3 velocidades de corte distintas que se mantendrán constantes durante toda la operación, y serán ejecutadas con una única herramienta de corte cada una.

Se aconseja que las variables de velocidad de corte, avance por revolución y profundidad de pasada, es decir, las condiciones de corte, sean elegidas considerando las características particulares de cada material y la potencia del torno utilizado. Asimismo, es conveniente que los valores seleccionados estén en línea con los que se utilizan

normalmente en la industria, a fin de que los resultados del ensayo se desarrollen en un entorno similar al de trabajo.

2.9. Medición del desgaste de la herramienta y definición del criterio de vida útil de la misma

Uno de los criterios más adoptados para determinar la vida útil de una herramienta es mediante el desgaste flanco ya que es el desgaste más favorable y esperable bajo condiciones adecuadas de mecanizado. De darse otro tipo de desgaste es necesario modificar los parámetros del proceso.

Por lo tanto, para garantizar la comparabilidad y fiabilidad de los resultados, es fundamental definir el final de la vida útil de una herramienta como el tiempo total de corte en el que su desgaste alcanza un valor específico o límite máximo. Esta definición permite establecer un criterio claro a diferencia del utilizado comúnmente a nivel industrial que considera que la herramienta ha llegado al final de su vida útil cuando deja de producir piezas del tamaño y calidad superficial deseadas.

Es recomendable realizar pruebas previas para identificar el tipo de desgaste predominante en la herramienta. De esta forma, se podrá seleccionar un criterio de vida útil adecuado o modificar las condiciones del mecanizado en caso de no ser el desgaste de flanco. Se recomienda incluir los resultados de las pruebas y el criterio específico en el informe del ensayo.

En el caso de los Aceros de Corte Libre, el desgaste de flanco es el más relevante y el que puede tomarse como indicador del final de la vida útil de la herramienta. Por lo tanto, la medición del desgaste deberá realizarse perpendicular al filo principal y en la zona B observada en la Figura 14. Dividiendo el filo de corte principal en cuatro zonas, la zona B es la menos afectada por otros tipos de desgaste o fenómenos, por lo que es la más adecuada para la medición.

La medida de desgaste de la herramienta se obtendrá midiendo la distancia entre la posición original del filo y su nueva posición, determinado como VB_B en la imagen. Una vez que se obtenga una cota de desgaste igual al límite máximo admitido dentro de la zona B, indicado como VB_B max en la Figura 14, se sabrá que la herramienta ha alcanzado el fin de su vida útil.

En cuanto a la medición del desgaste, se recomienda utilizar una máquina de medición capaz de registrar y digitalizar imágenes que muestren la medida del desgaste. Alternativamente, se puede emplear un microscopio óptico para tomar una imagen digital y utilizar software especializado de procesamiento y análisis de imágenes, como Image J (un software de código abierto), para realizar la medición. Es importante tener en cuenta que la precisión de las mediciones dependerá de la calidad de la imagen y de la selección realizada. Se recomienda utilizar una imagen con buena resolución y contrastes claros entre el desgaste y el fondo.

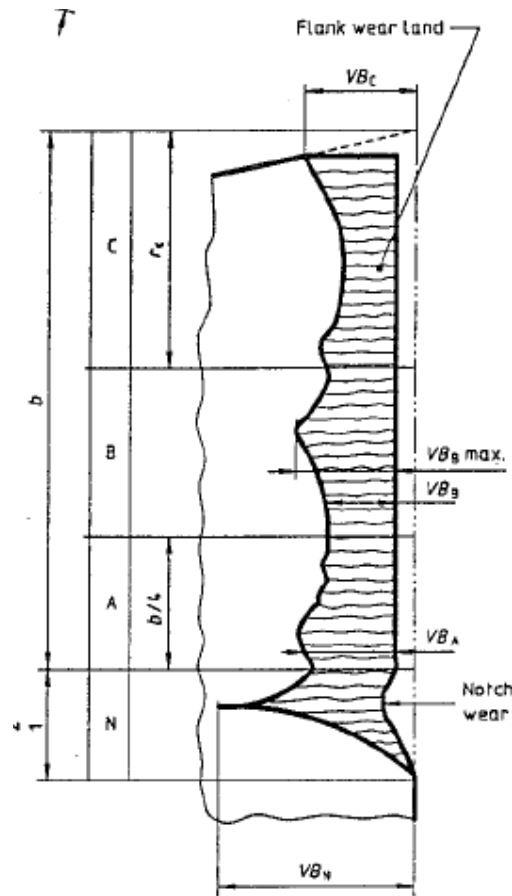


Figura 14: Medición del desgaste de flanco [7]

2.9.1. Medición del desgaste mediante Image J

A continuación, se presentará el procedimiento paso a paso para medir el desgaste de flanco utilizando el software Image J.

Como primer paso, resulta importante contar con un dispositivo de sujeción adecuado para fijar la herramienta de manera segura y estable, además de hacer que la herramienta tenga una posición constante durante todo el proceso de medición.

En cuanto a la captura de la imagen, se debe colocar la herramienta bajo el microscopio y capturar una imagen digital de la herramienta utilizando el mismo.

Una vez realizada la captura de la imagen, se procede al procesamiento de la imagen con Image J. El procedimiento para realizarlo es el siguiente:

1. Inicia el software Image J en tu dispositivo.
2. Importa la imagen digital de la herramienta previamente capturada.
3. Selecciona la herramienta "Straight" para crear un segmento que coincida con una distancia conocida en la imagen.
4. Utiliza la herramienta "Set Scale" para establecer la escala, especificando la longitud real de la distancia seleccionada anteriormente.

5. Vuelve a seleccionar la herramienta "Straight Line" para medir la longitud deseada.
6. Utiliza la herramienta "Measure" para realizar la medición.

Una vez obtenido el valor de desgaste de la herramienta, se deben anotar los resultados obtenidos y analizar los resultados.

Se recomienda utilizar imágenes de buena calidad, con alta resolución y contrastes claros entre la herramienta y el fondo.

Al tomar una imagen digital de un microscopio y luego realizar medidas utilizando un software de procesamiento de imágenes, existen varias fuentes de incertidumbre que se deben tener en cuenta. Algunas de las principales fuentes de incertidumbre en este caso podrían incluir:

- Incertidumbre en la resolución del sistema: La resolución de la captura de la imagen digital del microscopio puede afectar a las medidas. Con resolución se refiere a la capacidad del sistema para distinguir detalles finos. Cuanto mayor sea la resolución, menor será la incertidumbre asociada.
- Incertidumbre en la precisión del software de procesamiento de imágenes: El software utilizado para realizar las medidas puede tener una precisión inherente que afecta la incertidumbre de los resultados. Esto puede estar relacionado con algoritmos de detección de bordes, interpolación de píxeles, funciones de ajuste, entre otros.
- Incertidumbre en la escala de la imagen: El uso de escalas de referencia o patrones conocidos para establecer una relación entre los píxeles de la imagen y las unidades físicas induce una incertidumbre en la medición.
- Incertidumbre en la selección de la longitud de medición: Al utilizar un software de procesamiento de imágenes, es necesario establecer una longitud específica de la imagen para realizar las medidas, esto introduce una incertidumbre, especialmente si el objeto o la característica que se está midiendo no es claramente definido o presenta variaciones locales.
- Incertidumbre por criterio de medición: Al tomar la medida del desgaste de flanco, al ser una zona con sectores de mayor y menor longitud es necesario establecer un criterio.

Es importante realizar una evaluación cuidadosa de estas fuentes de incertidumbre y determinar su contribución relativa al resultado final de las medidas. Esto puede implicar realizar experimentos de repetibilidad, realizar ajustes adicionales o utilizar métodos de análisis estadístico para evaluar y cuantificar la incertidumbre en las medidas realizadas con el software de procesamiento de imágenes.

2.10. Metodología de ensayo

La metodología de ensayo consiste en realizar sucesivos cilindrados utilizando distintas velocidades de corte, utilizando una herramienta única para cada velocidad, y

tomar mediciones del desgaste de flanco y el tiempo de torneado durante el proceso. Se recomienda comenzar con la velocidad de corte más baja y progresar hacia las velocidades más altas.

Se recomienda verificar que la relación longitud/diámetro de la pieza no supere el límite de diez para evitar vibraciones.

Durante el torneado con una velocidad de corte seleccionada, se deben tomar mediciones del desgaste de flanco a intervalos adecuados y definidos para construir una gráfica. Estas mediciones, junto con el tiempo de corte para esa velocidad de corte, se reflejarán en una gráfica similar a la Figura 15, que muestra el comportamiento del desgaste de flanco en relación con la velocidad de corte seleccionada.

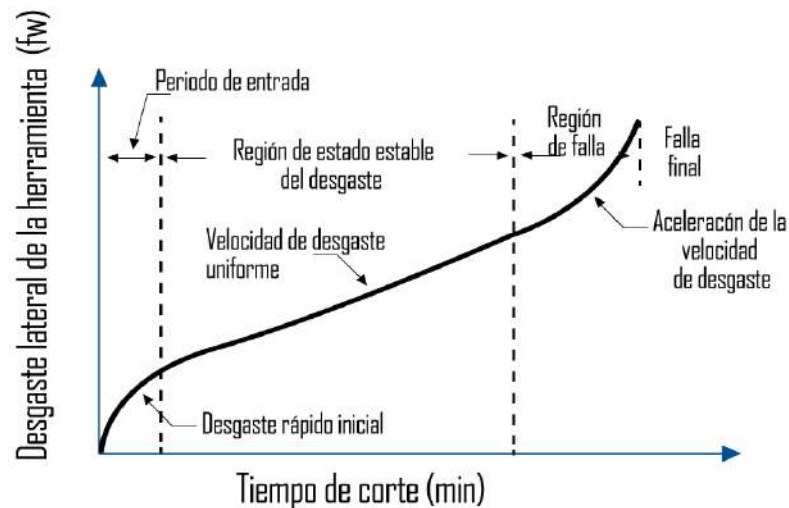


Figura 15: Comportamiento del desgaste de flanco para una velocidad de corte, adaptada de [7]

Luego de obtener las curvas para las distintas velocidades de corte, se deben combinar en una sola gráfica, similar a la Figura 16. Finalmente, se traza una gráfica bilogarítmica de la velocidad de corte en función de la vida útil de la herramienta, como se muestra en la Figura 17. Los puntos en esta gráfica se obtienen mediante aproximación con la función potencial correspondiente a la Ecuación de Taylor (Ecuación 12).

$$V_c^2 * t^n = C \quad (12)$$

donde:

- V_c : Velocidad de corte en metros por minutos
- t : Vida de la herramienta en minutos
- $n = 1/k$: Constante del material donde $k = \tan \alpha$: Pendiente de la curva
- C : Constante que depende del material de la herramienta, del material de la pieza

y de las condiciones de corte, coincidiendo su valor con la velocidad de corte a la cual la herramienta duraría un minuto.

Una vez obtenidas las gráficas, se deben analizar los resultados y extraer conclusiones sobre la maquinabilidad de los materiales evaluados.

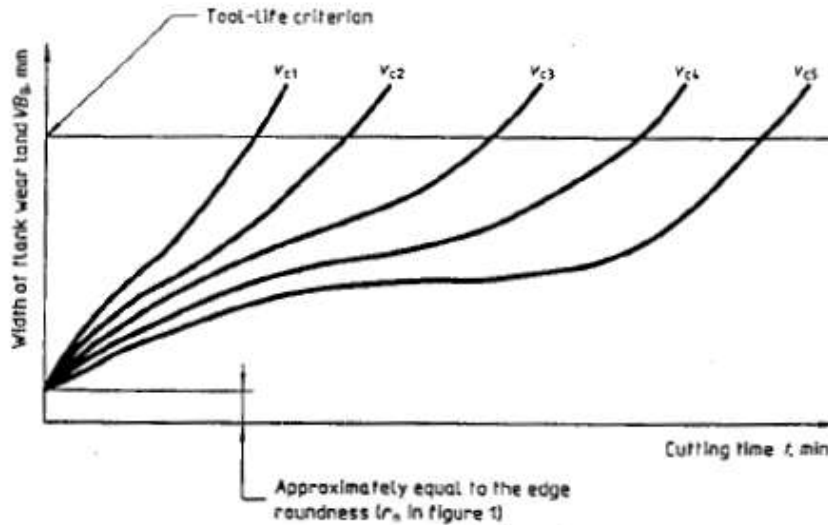


Figura 16: Comportamiento del desgaste de flanco para diferentes velocidades de corte [7]

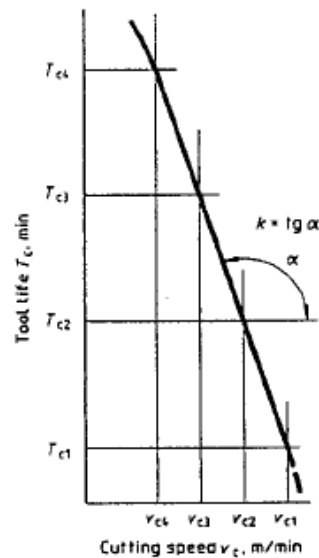


Figura 17: Velocidad de corte vs. Tiempo de vida útil basado en la Figura 16 [7]

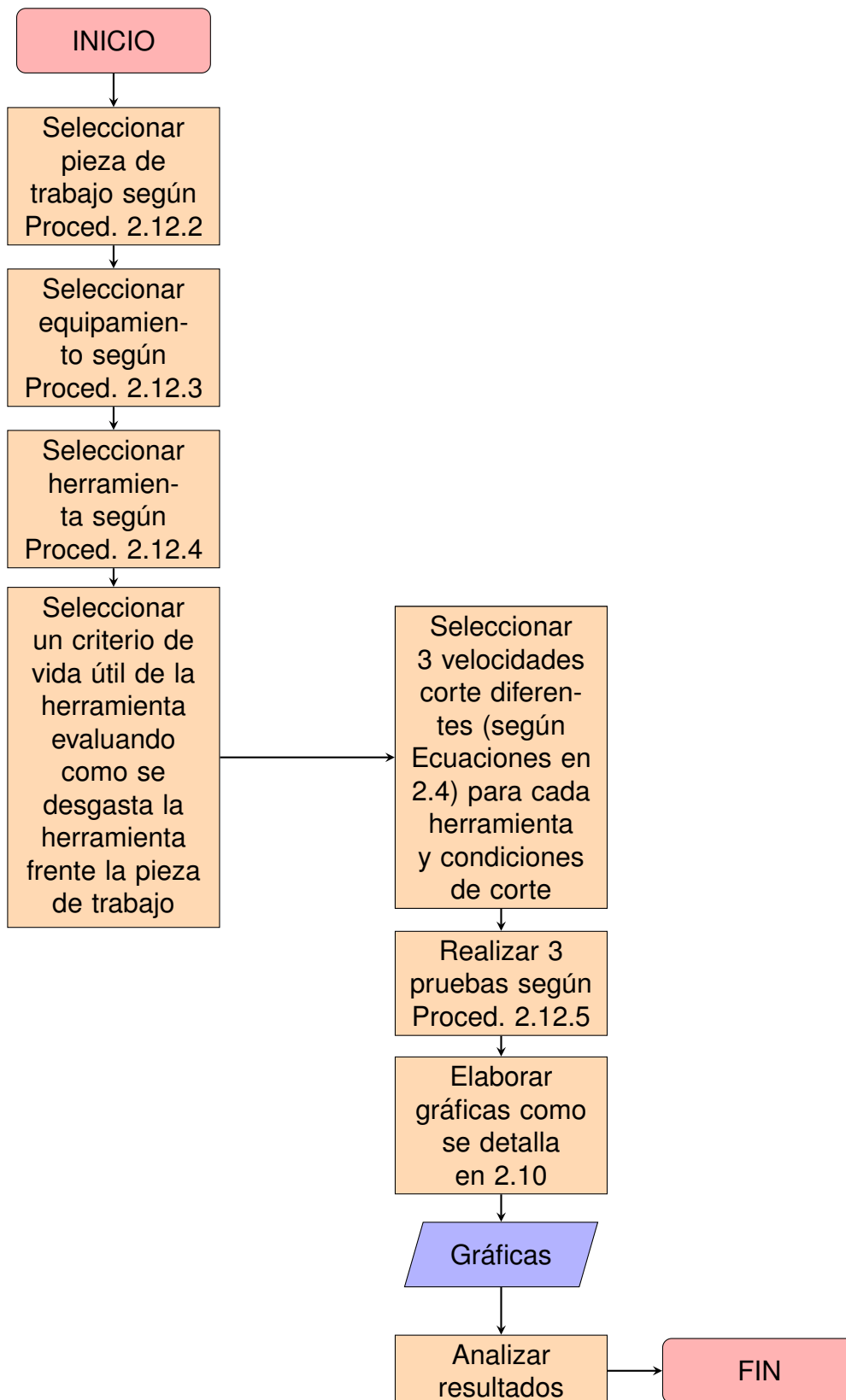
2.11. Condiciones de seguridad

Algunas consideraciones de seguridad durante la ejecución del procedimiento son:

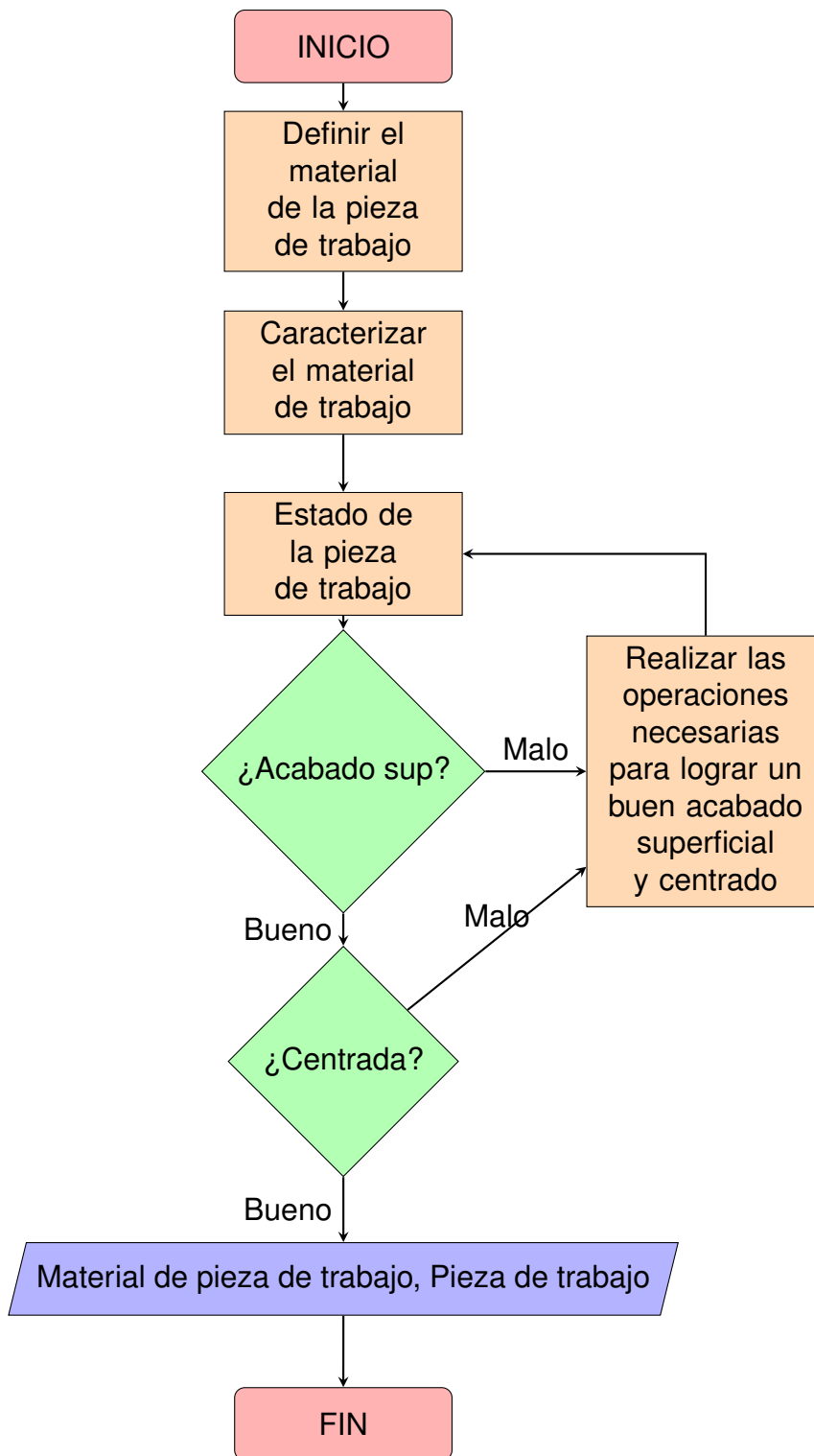
- Utilizar equipos de protección personal (EPP) como gafas de seguridad, protectores auditivos y ropa ajustada para evitar atrapamientos durante la operación en el torno.
- Tanto durante la operación en el torno como en la manipulación de sustancias ácidas, como cuando se realiza el ataque de las probetas para la caracterización de material, se deben cuidar las manos. Por lo tanto, es recomendable utilizar pinzas o herramientas adecuadas para manipular la pieza de trabajo y minimizar los riesgos asociados.
- Verificar la correcta de sujeción de las piezas de trabajo antes de comenzar el proceso de torneado. Utilizar dispositivos de sujeción adecuados, como mandriles o platos de tres mordazas.
- Es recomendable mantener el área de trabajo limpia y organizada para evitar tropiezos y caídas.

2.12. Procedimientos

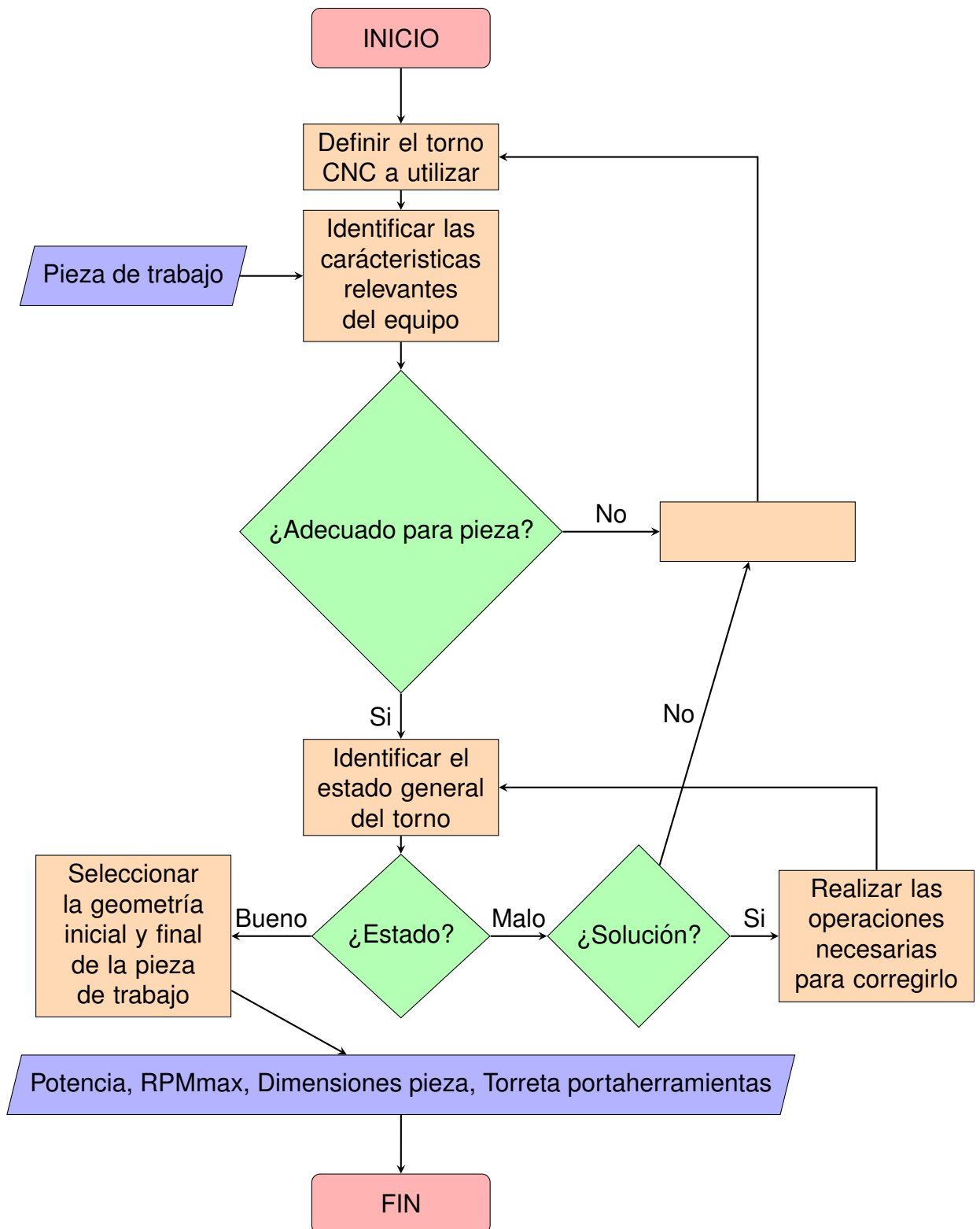
2.12.1. Procedimiento de ensayo



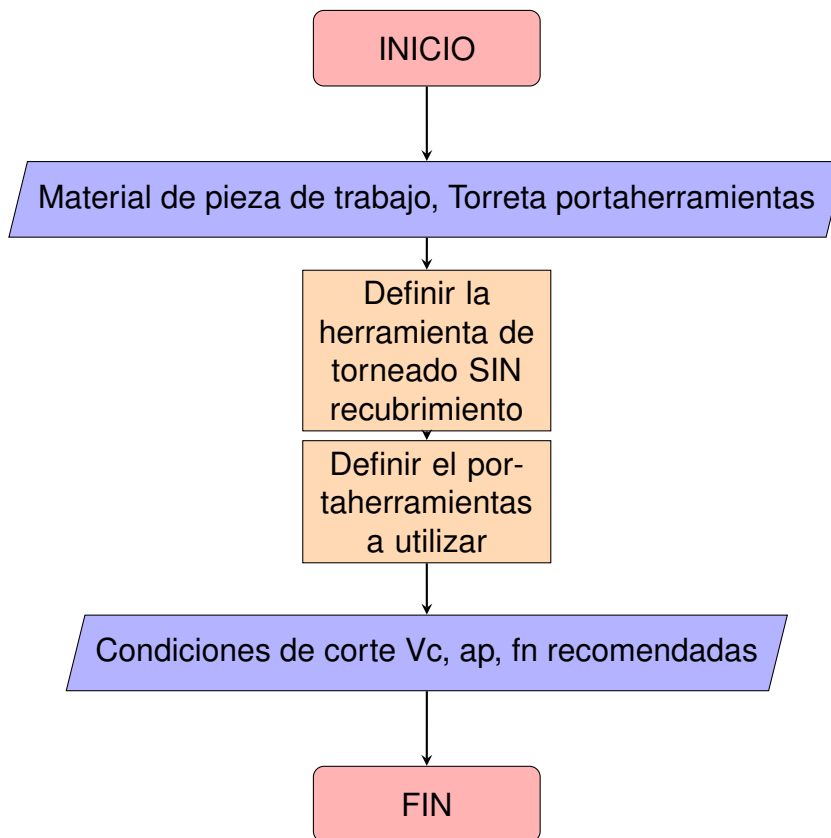
2.12.2. Selección de la pieza de trabajo



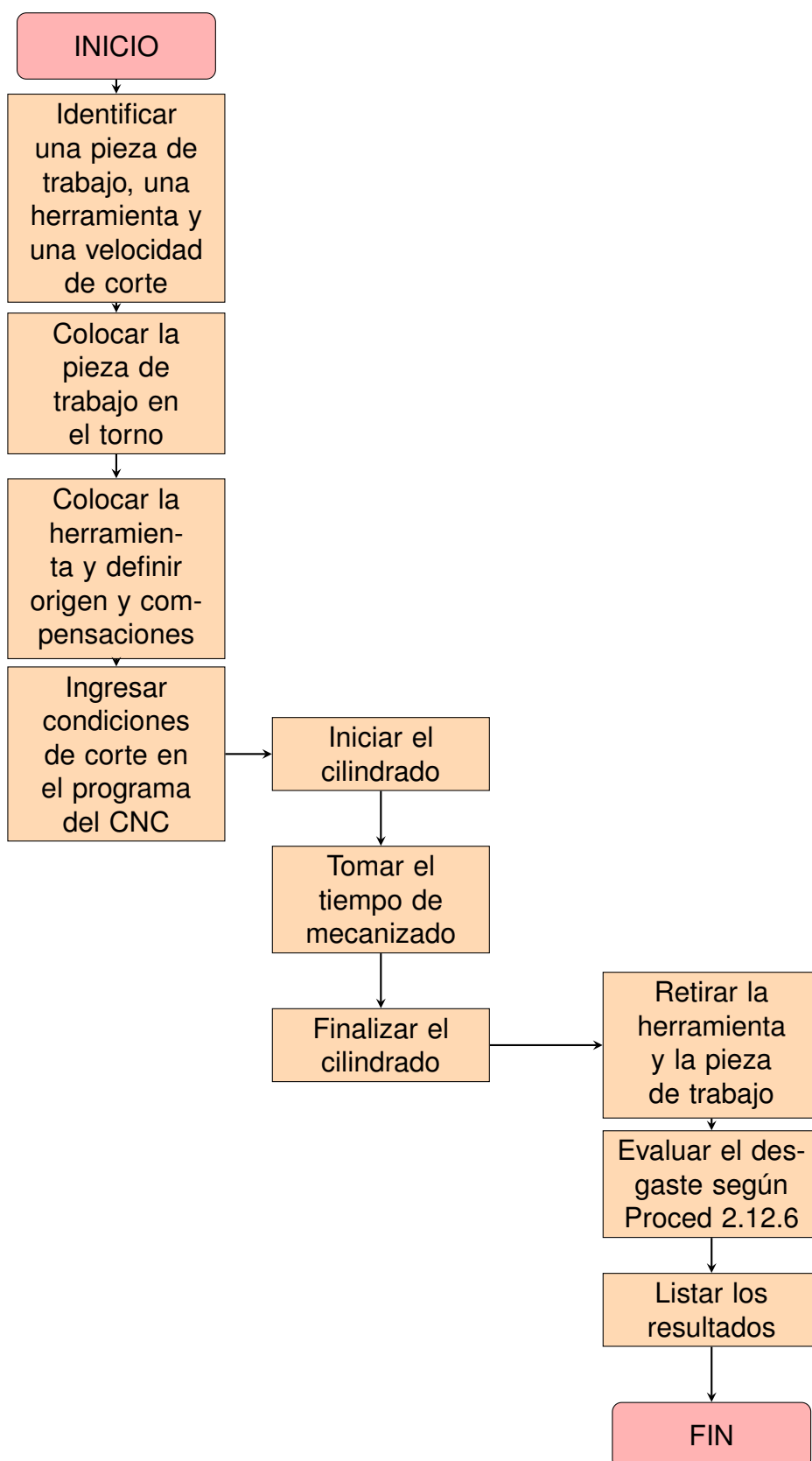
2.12.3. Selección del equipamiento



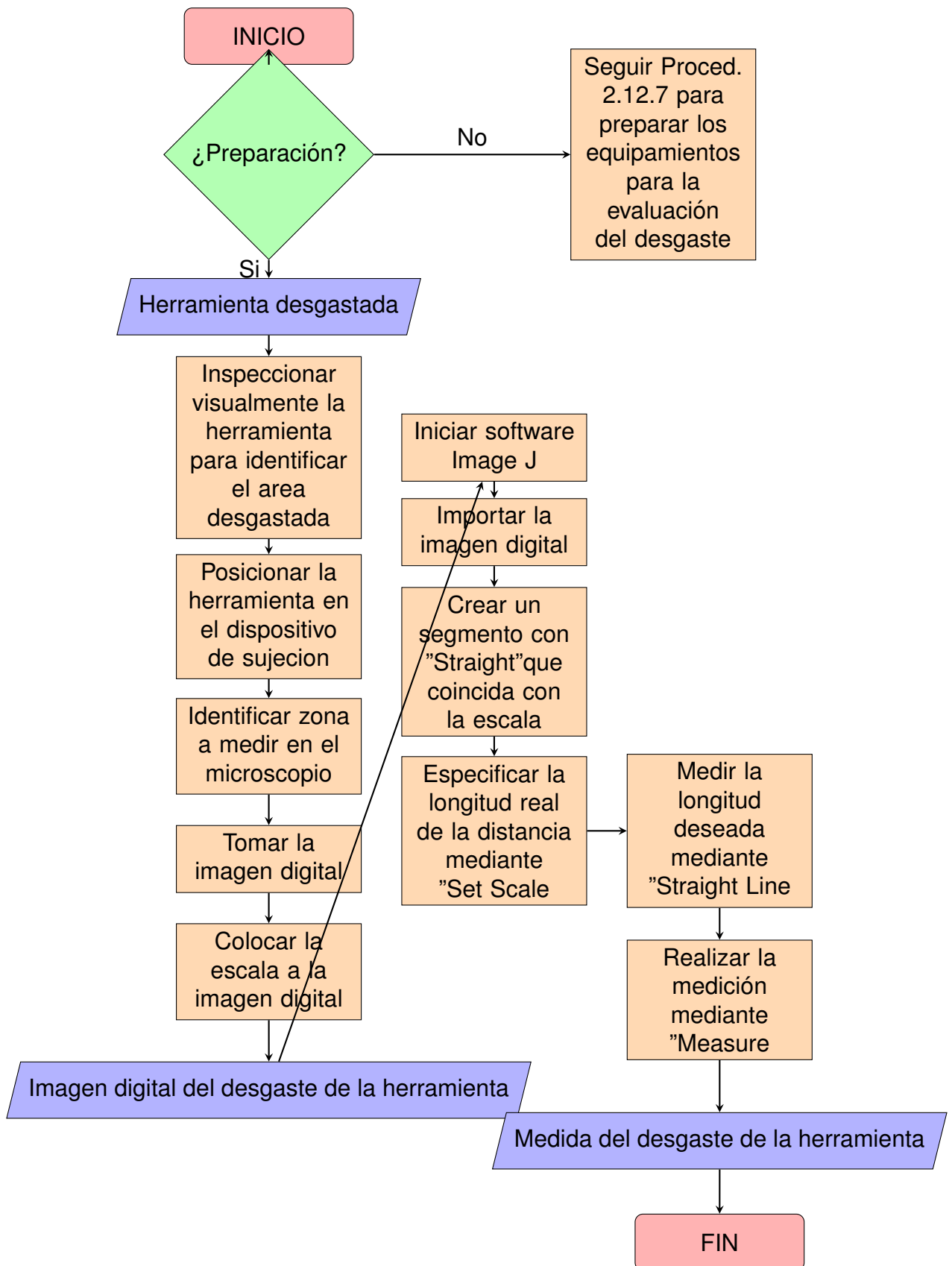
2.12.4. Selección de la herramienta

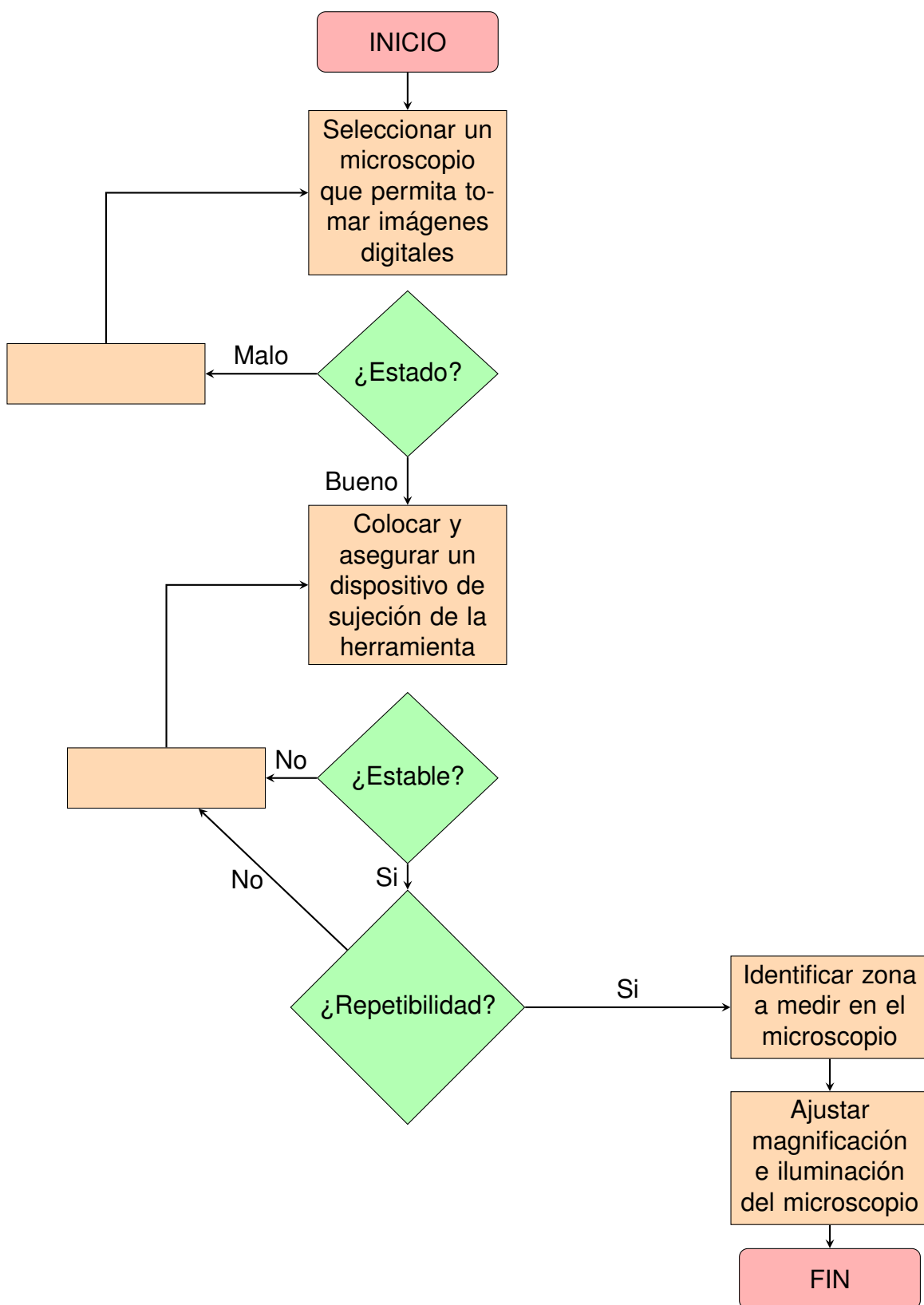


2.12.5. Metodología de prueba



2.12.6. Evaluación del desgaste



2.12.7. Preparación para la evaluación del desgaste

3. Capítulo 3: Prueba experimental

En la siguiente sección, se informa sobre el trabajo experimental realizado para verificar el funcionamiento del procedimiento mencionado anteriormente. Primero, se lleva a cabo una caracterización de los materiales disponibles para la prueba y se evalúan las características y prestaciones del torno que se utilizará.

Una vez completado este análisis, se selecciona una herramienta adecuada de entre las opciones disponibles en los diferentes portaherramientas del torno CNC de la Escuela de Ingeniería Mecánica. Además, se elige un método de medición del desgaste que esté accesible en la misma.

Antes de llevar a cabo el cilindrado, se realizan una serie de pasos preliminares para preparar la pieza para el torneado y se verifica su comportamiento en el torno seleccionado. Posteriormente, se definen condiciones de corte específicas y se lleva a cabo la prueba experimental mediante el cilindrado del material seleccionado. Como etapa final de esta prueba, se mide el desgaste utilizando el método digital seleccionado.

Es importante destacar que para cumplir con el procedimiento completo y realizar las gráficas correspondientes, es necesario realizar sucesivos mecanizados manteniendo las condiciones de corte y la misma herramienta, y realizar mediciones adicionales entre mecanizados hasta alcanzar el criterio de vida útil seleccionado. En este caso, solo se realiza una de tales mediciones.

En el caso del material utilizado en esta prueba, se espera un desgaste de flanco, por lo tanto, se ha seleccionado el criterio de vida de desgaste de flanco para su evaluación.

3.1. Caracterización de los materiales a ensayar

3.1.1. Primera etapa de caracterización

Para iniciar la caracterización del material, es necesario realizar la preparación de las muestras antes de llevar a cabo el análisis. A continuación, se detallan los materiales empleados en este proceso:

1. Material 1 (M1): Barra trefilada hexagonal, material 12L14 de diámetro 11,11mm. Dicha barra se obtiene por trefilado en frío desde un alambión de diámetro 12,7mm. En la Figura 18 puede observarse la cantidad de elementos aleantes correspondientes a la colada 14433 de la que se obtuvo tal barra.
2. Material 2 (M2): Barra trefilada hexagonal, material 1212 de diámetro 11,11mm. Dicha barra se obtiene por trefilado en frío desde un alambión de diámetro 12,7mm. La composición química de dicho acero correspondiente a la colada 78639 puede observarse en la Figura 19.
3. Material 3 (M3): Alambión enderezado de sección redonda, material 12L14 de diámetro 12,7mm (1/2"). La composición química de dicho acero correspondiente a la colada 19365 puede observarse en la Figura 20.
4. Material 4 (M4): Alambión enderezado de sección redonda, material 1212 de diámetro 12,7mm (1/2"). El mismo proviene de la colada 19379 y la composición de dicho acero puede observarse en la Figura 20 .

Colada	14433
Grado	12L14E1
C	0,07
P	0,071
S	0,305
Mn	1,00
Si	0,01
Cr	0,11
Ni	0,08
Cu	0,21
Mo	0,01
Al	0,001
V	0,003
Sn	0,013
N	58
Pb	0,35

- valores en % en peso salvo N en ppm.

Figura 18: Colada 14433 Material 12L14

Ultimo análisis químico

Descripción	Valor
Al	0,003
C	0,08
Cr	0,04
Cu	0,13
LIQUIDUS	1509
Mn	1,07
Mo	0,01
N	57
Ni	0,05
P	0,054
S	0,33
Si	0,01
Sn	0,011
V	0,001

Figura 19: Colada 78639 Material 1212

Ultimo análisis químico

Descripción	Valor
Al	0,002
C	0,07
Cr	0,05
Cu	0,1
LIQUIDUS	1513
Mn	0,93
Mo	0,01
N	51
Ni	0,05
P	0,046
S	0,287
Si	0,02
Sn	0,008
V	0,001

Figura 20: Colada 19379 Material 1212

Ultimo análisis químico

Descripción	Valor
Al	0,002
C	0,08
Cr	0,04
Cu	0,09
LIQUIDUS	1511
Mn	1,02
Mo	0,01
N	45
Ni	0,04
P	0,05
Pb	0,27
S	0,312
Si	0,01
Sn	0,009
V	0,001

Figura 21: Colada 19365 Material 12L14

Con el objetivo de preparar las muestras para observarlas en el microscopio óptico, se cortan pequeñas piezas de cada uno de los materiales. De cada uno de ellos, se obtienen 2 muestras, ya que el corte se realiza en dos sentidos, longitudinal y transversal al eje de las barras. Debido a que las secciones de material obtenidas resultan pequeñas para su manipulación, se decide incluirlas en bakelita en la incluidora que

se encuentra en el laboratorio de metalurgia del IMAE (Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras).

A continuación, se detallan las denominaciones de las probetas obtenidas teniendo en cuenta la lista enumerada detalla a principio de la sección:

1. Probeta 1 (P1): Corte transversal de M1.
2. Probeta 2 (P2): Corte longitudinal de M1
3. Probeta 3 (P3): Corte longitudinal de M2.
4. Probeta 4 (P4):Corte transversal de M2
5. Probeta 5 (P5): Corte transversal de M3.
6. Probeta 6 (P6): Corte longitudinal de M3
7. Probeta 7 (P7): Corte transversal de M4.
8. Probeta 8 (P8):Corte longitudinal de M4.

Una vez obtenidas las probetas, se les realiza un desbaste mediante una lijadora de banco y luego se lijan mediante pulidos sucesivos a 90° con lija al agua de diferentes granulometrías, se avanza desde la más gruesa a la más fina #600, #1000 y #1200. Por último, se realiza el pulido a espejo con una pulidora metalográfica con paño de diamante. En la Figura 22 pueden observarse las probetas obtenidas.

Luego del pulido, se les realiza el ataque correspondiente con Nital al 3 % sumergiendo la probeta por 3 segundos en el mismo.

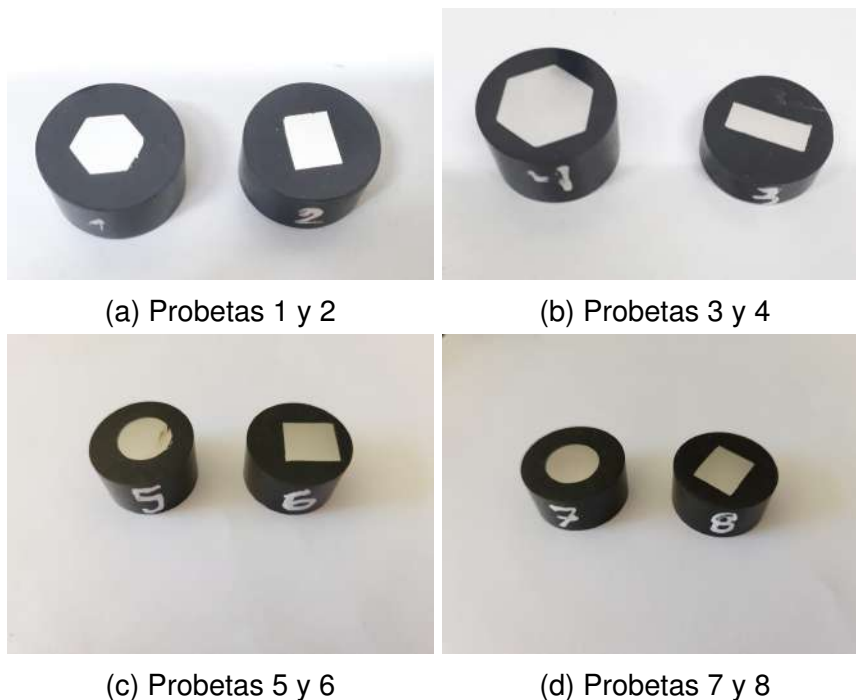


Figura 22: Probetas

El microscopio óptico utilizado para el análisis es el Olympus GX51 que se observa en la Figura 23 ubicado en el laboratorio de metalurgia del IMAE. El mismo cuenta con una magnificación mínima de 5x y máxima de 100x. Además, se adiciona al microscopio una cámara digital Ultralyt ISH130 de 1.3MP que permite ver, capturar y editar imágenes del microscopio en la computadora.



Figura 23: Microscopio Óptico

Las micrografías de las diferentes probetas se muestran en las Figuras 24 a 31.

En ambos materiales puede observarse una matriz ferrítica de tamaño de grano N°8 con algunos granos de perlita más pequeños ubicados en los bordes de grano de la ferrita.

En cuanto a las inclusiones, en ambos cortes, pueden observarse sulfuros de manganeso de un color grisáceo. En las probetas transversales, estas inclusiones aparecen de forma globular, en cambio, en las longitudinales se observa una morfología alargada debido a la laminación. En las probetas correspondientes al material 12L14 de corte longitudinal, no se distingue una estela como la que debería formar el plomo alrededor de los sulfuros de manganeso. Debido a ello, se analizan dos probetas de corte longitudinal de ambos materiales para buscar diferencias entre los sulfuros, pero tampoco se logran distinguir. Las imágenes estudiadas son las observadas en las Figuras 29e 29f y 31d.

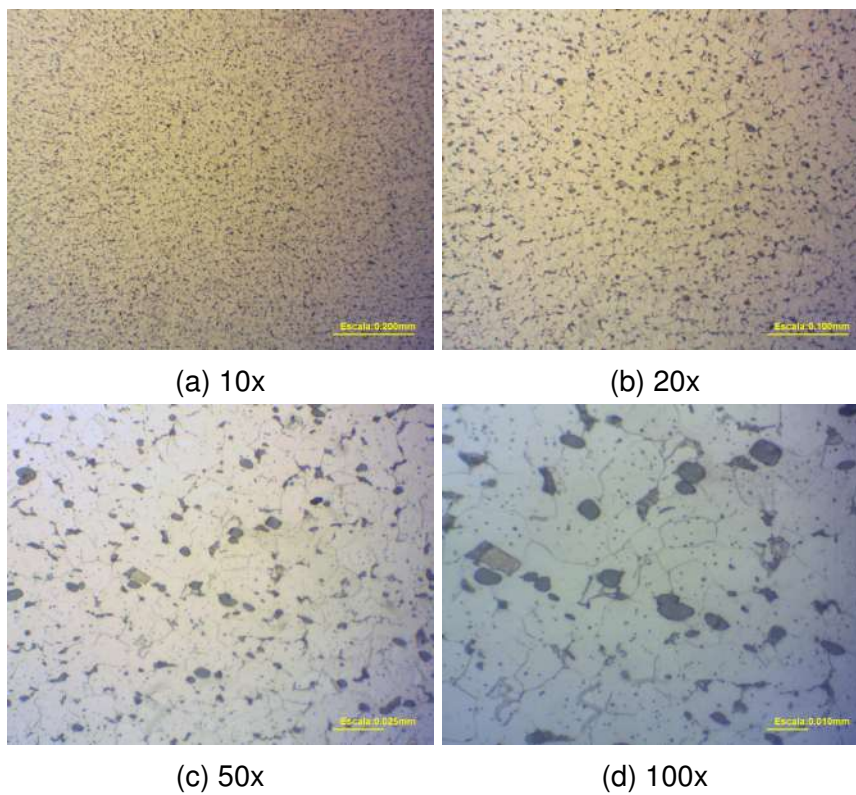


Figura 24: Micrografías Probeta 1

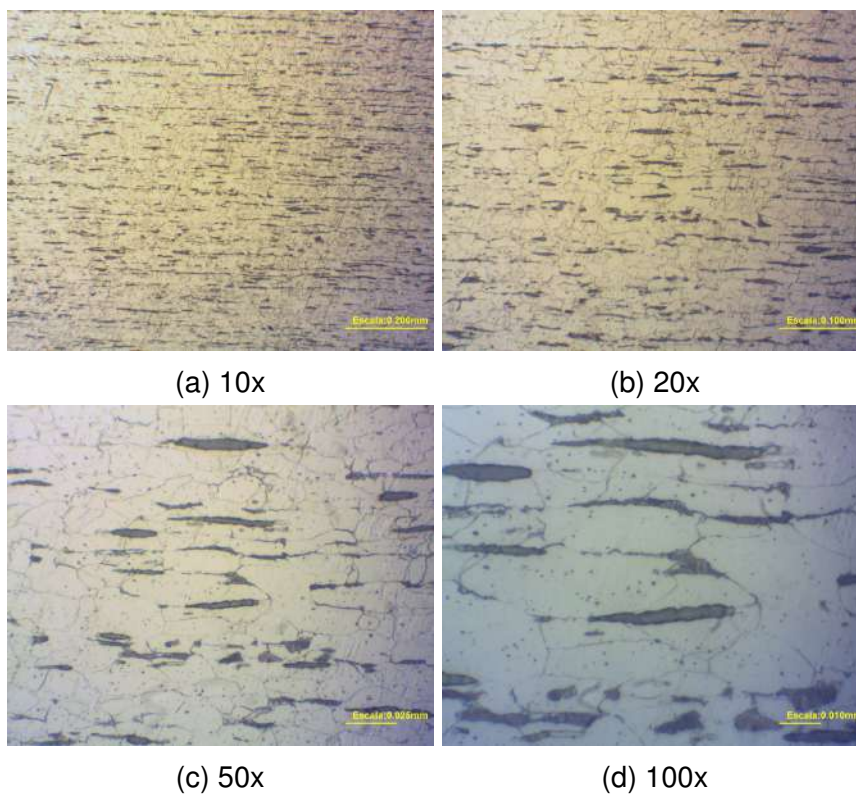


Figura 25: Micrografías Probeta 2

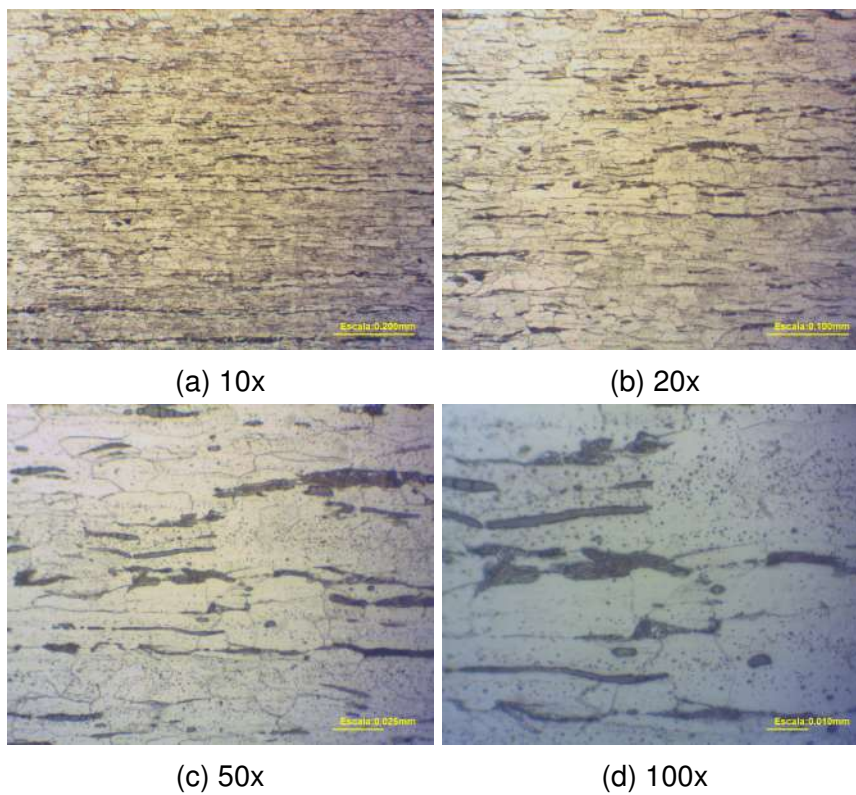


Figura 26: Micrografías Probeta 3

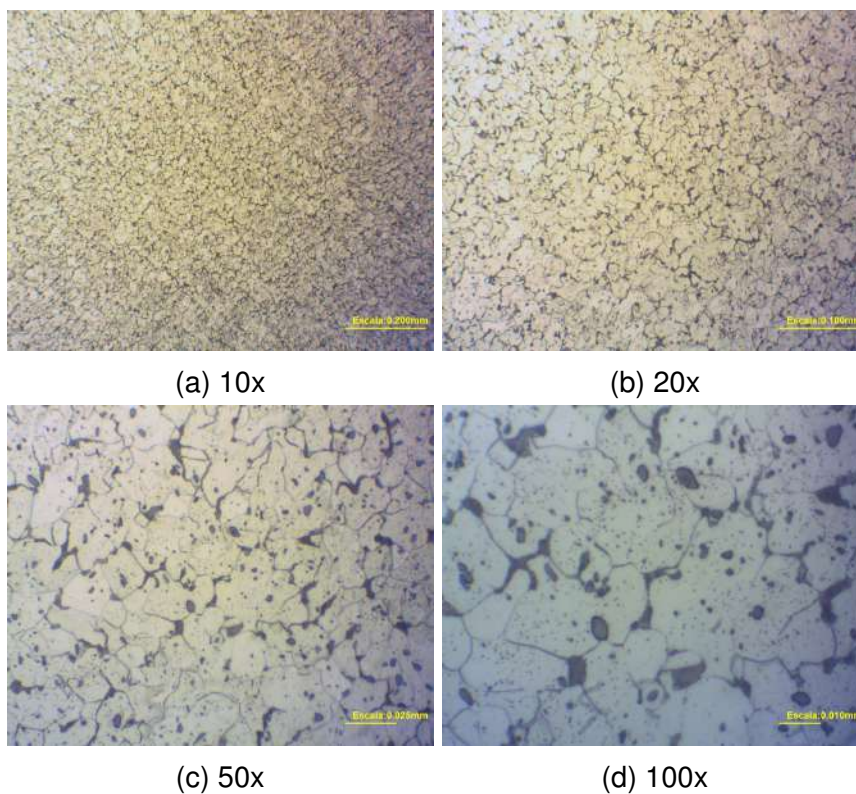


Figura 27: Micrografías Probeta 4

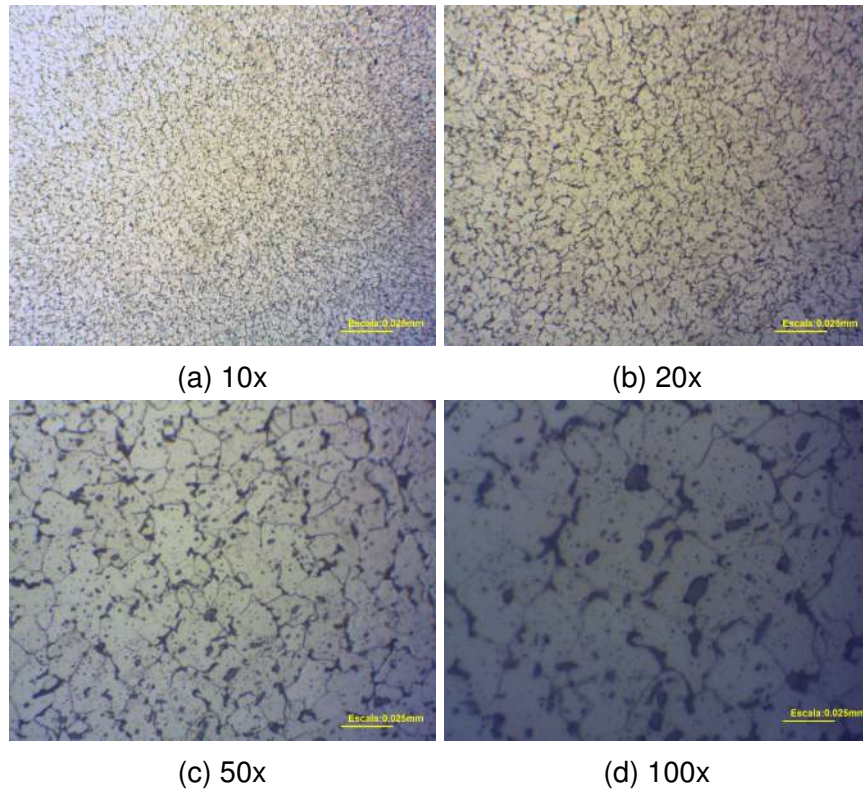


Figura 28: Micrografías Probeta 5

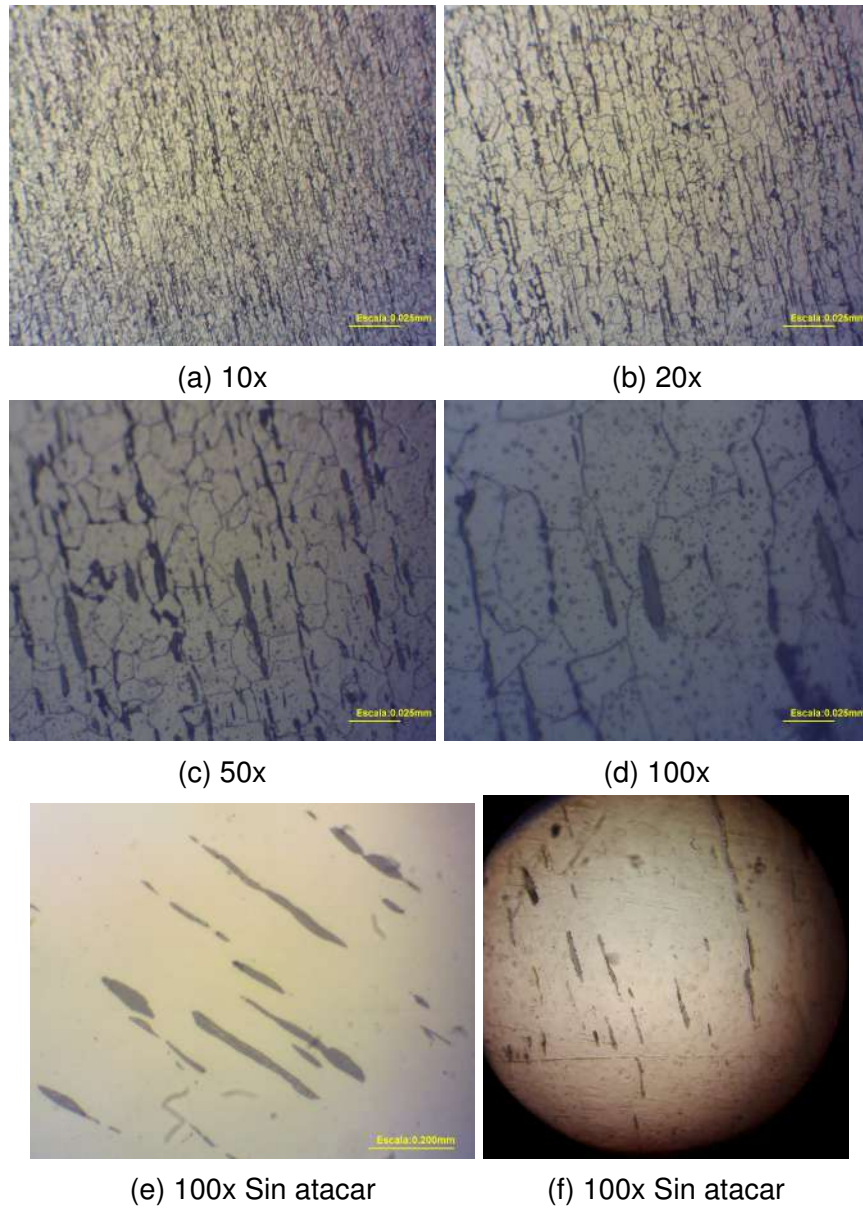


Figura 29: Micrografías Probeta 6

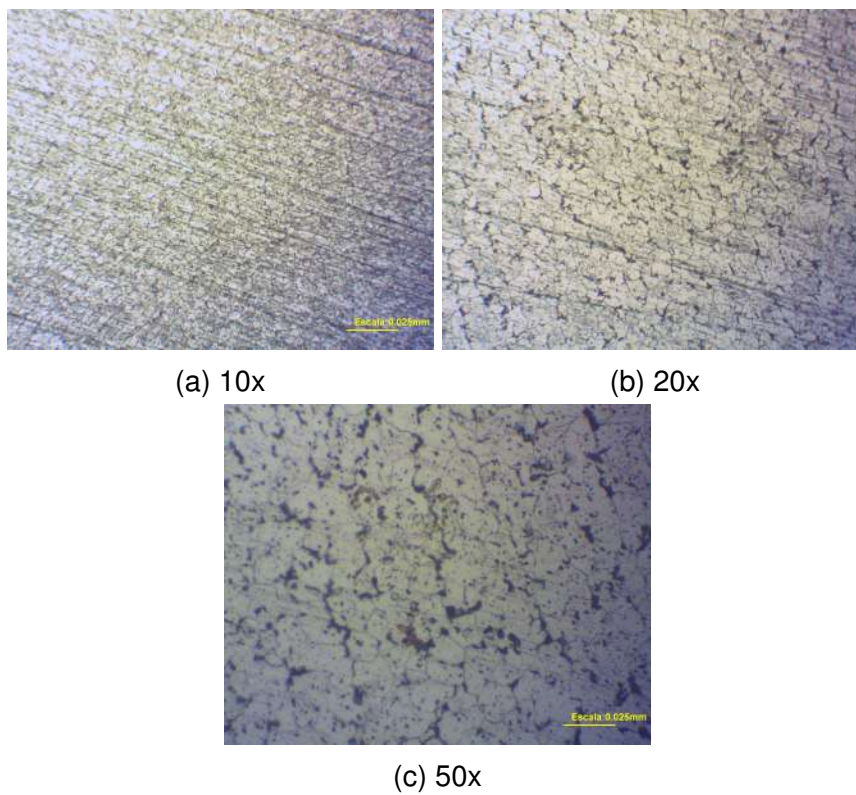


Figura 30: Micrografías Probeta 7

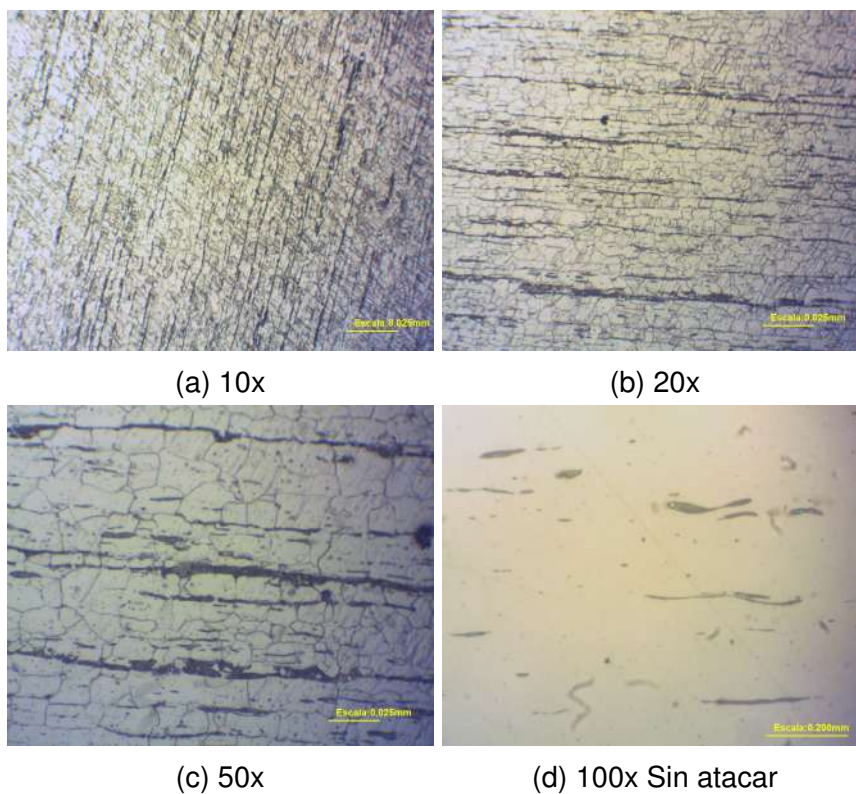


Figura 31: Micrografías Probeta 8

Debido a que por microscopia óptica no fue posible distinguir el plomo presente en el material, se decide realizar micrografías en el Microscopio Óptico de Barrido (SEM) ubicado en el IFIR (Instituto de Física Rosario). Este instrumento, a diferencia del microscopio convencional, aplica un haz de electrones en lugar de un haz de luz para formar una imagen. Dicho microscopio puede magnificar hasta 2000 veces (2000x) el tamaño de una superficie.

Como primer paso para la preparación de las muestras, se requiere recubrir la muestra con una delgada lámina de cobre debido a que el material de la probeta, la bakelita, no es conductora de la electricidad. La lámina se coloca entre la muestra y el portamuestra y en la muestra misma.

Además de la imagen digital obtenida del SEM, es posible realizar un micro-análisis químico mediante la incidencia de rayos X, lo que permite determinar los elementos presentes en una sección determinada de la muestra. Los característicos rayos X son emitidos por los elementos pesados, cuando sus electrones realizan transiciones entre los niveles más bajos de energía atómica. Los rayos X producidos por las transiciones desde los niveles $n=2$ hasta $n=1$ se llaman rayos X K-alfa y es en estos niveles de energía (30 eV) que puede determinarse la presencia del plomo. Si bien esta técnica resulta útil para determinar la presencia de los elementos aleantes del acero, en particular, para los elementos más livianos se registra un mayor error.

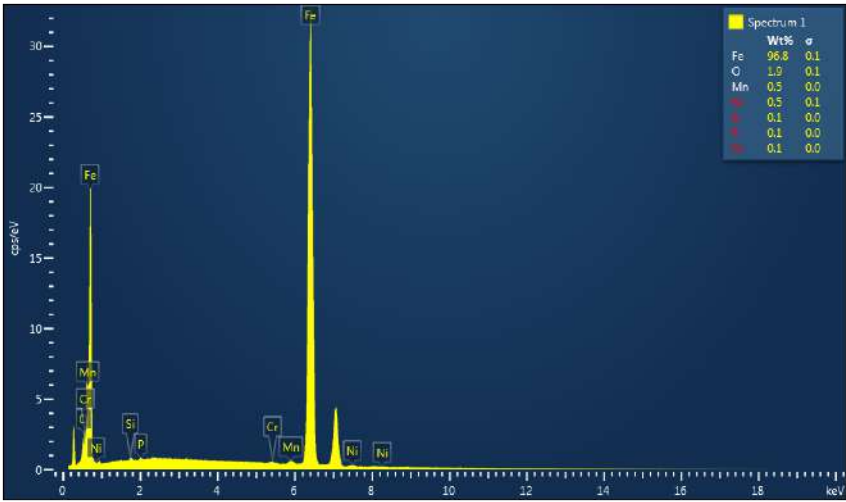
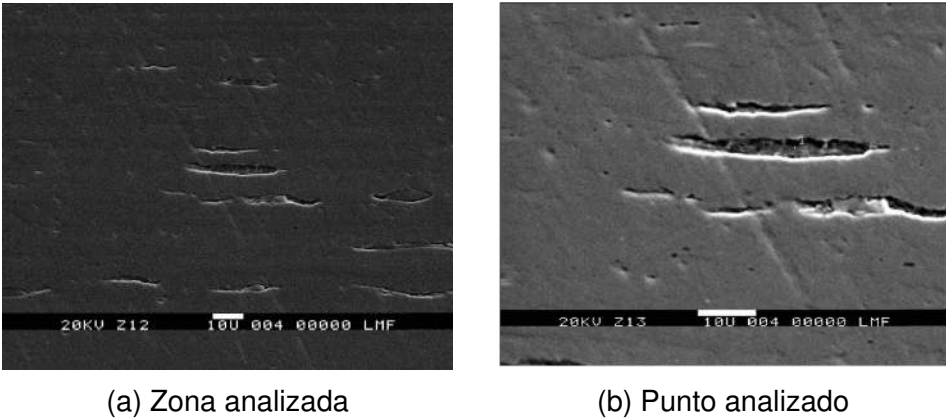
De la Probeta 2 se evalúan tres puntos en el centro de los sulfuros, dos de dichos puntos se encuentran en la misma inclusión de sulfuro de manganeso. Las imágenes y los resultados de los microanálisis químicos pueden observarse en las Figuras 32, 33 y 34. En ninguno de los análisis se detecta plomo presente en el acero. La fórmula química del sulfuro de manganeso es MnS y podemos constatar que el microanálisis químico resulta satisfactorio ya que observando la columna Weight %Sigma la relación entre estos dos elementos es atómica.

En la Probeta 3 se analizan dos puntos, uno en el centro del sulfuro y otro en la punta del mismo observados en las Figuras 35 y 36. En ambos se detecta presencia de hierro predominantemente, de azufre y de manganeso. La Probeta 3 es del material SAE 1212, por lo tanto, la observación es adecuada ya que no era esperable encontrar plomo. Debido a que en el análisis puntual dentro de la inclusión del material 12L14 no se halló plomo, se optó por realizar el microanálisis químico sobre una zona del sulfuro. En particular, se selecciona un sector perteneciente al final de la inclusión donde, según lo estudiado, se encuentra el plomo. Sin embargo, no se registra plomo en la zona mencionada. Dicho análisis puede observarse en la Figura 37 correspondiente a la Probeta 6.

Una vez más, al no encontrar plomo en la zona mencionada anteriormente, se decide realizar el análisis en toda la imagen obtenida del SEM, dentro de dicha imagen se encuentra el sulfuro anteriormente analizado. Como se puede observar en la Figura 38, tanto en el espectro como en la tabla, no se registra presencia de plomo en el sector analizado.

En conclusión, con la técnica del microanálisis químico en el SEM no fue posible detectar plomo en las probetas analizadas. Esto último puede deberse a que el plomo se desprendió de los sulfuros de manganeso cuando se alcanzaron altas temperaturas en los procesos de corte con sierra y desbaste en la lijadora de banco para la preparación de las probetas, es por ello que no se logró observarlo ni detectarlo en el

análisis.

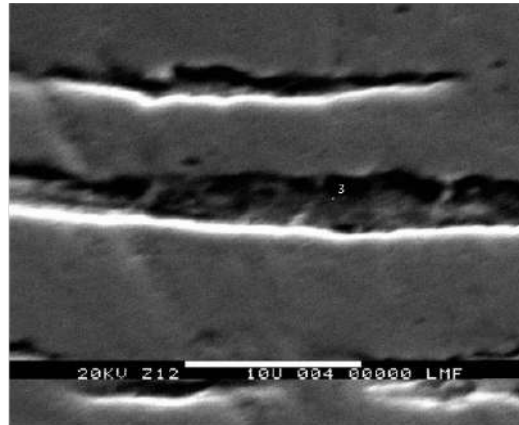


(c) Espectro de elementos

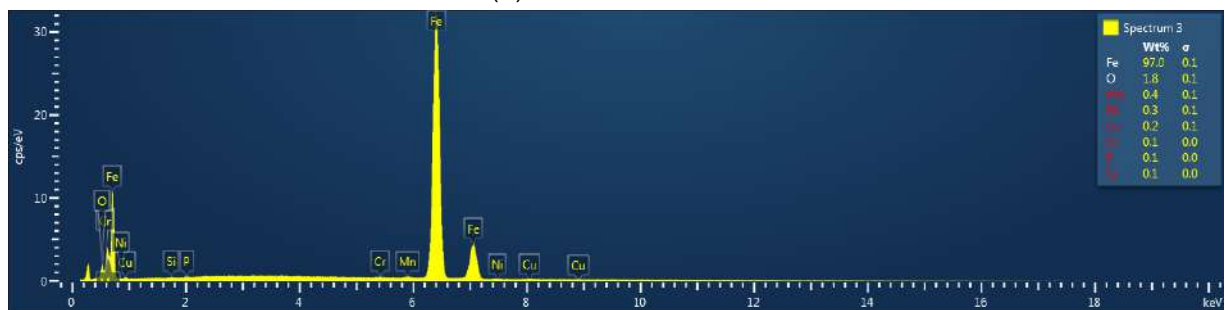
Element	Line Type	Apparent Concentration	k Ratio	Wt%	Wt% Sigma	Standard Label	Factory Standard	Standard Calibration Date
O	K series	2.98	0.01002	1.94	0.06	SiO2	Yes	
Si	K series	0.08	0.00063	0.13	0.03	SiO2	Yes	
P	K series	0.11	0.00061	0.10	0.03	GaP	Yes	
Cr	K series	0.12	0.00118	0.10	0.03	Cr	Yes	
Mn	K series	0.47	0.00474	0.50	0.05	Mn	Yes	
Fe	K series	94.25	0.94249	96.76	0.11	Fe	Yes	
Ni	K series	0.39	0.00393	0.46	0.06	Ni	Yes	
Total:				100.00				

(d) Tabla de elementos

Figura 32: Imagen y microanálisis químico obtenidos del SEM de la Probeta 2-Punto 1



(a) Punto analizado

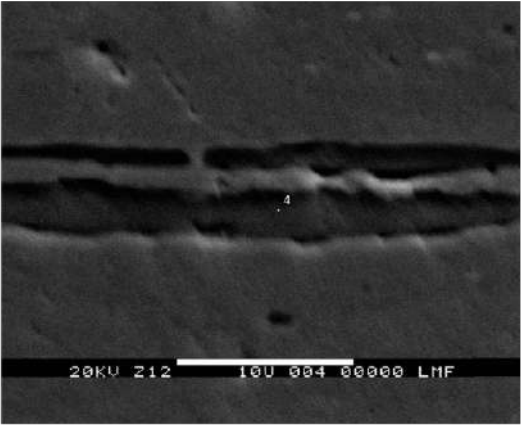


(b) Espectro de elementos

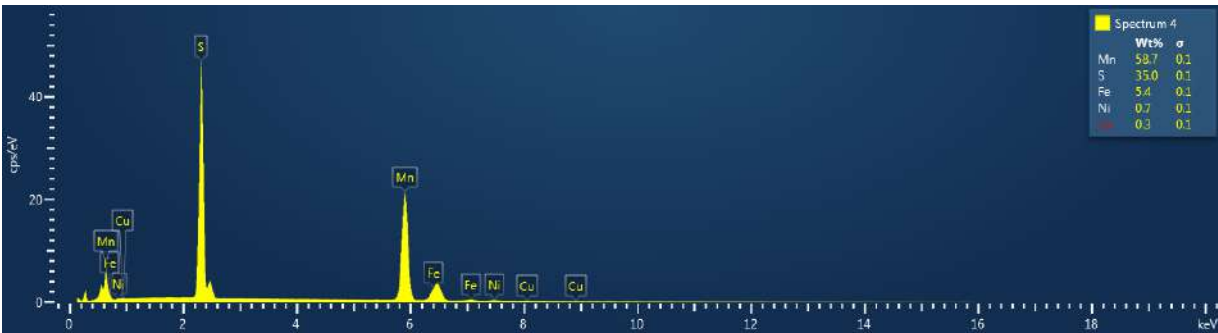
Spectrum 3	Line Type	Apparent Concentration	k Ratio	Wt%	Wt% Sigma	Standard Label	Factory Standard	Standard Calibration Date
O	K series	2.70	0.00910	1.78	0.06	SiO2	Yes	
Si	K series	0.04	0.00035	0.07	0.02	SiO2	Yes	
P	K series	0.10	0.00054	0.09	0.02	GaP	Yes	
Cr	K series	0.14	0.00141	0.12	0.03	Cr	Yes	
Mn	K series	0.39	0.00386	0.41	0.05	Mn	Yes	
Fe	K series	93.45	0.93452	96.98	0.13	Fe	Yes	
Ni	K series	0.26	0.00261	0.31	0.06	Ni	Yes	
Cu	K series	0.19	0.00188	0.23	0.08	Cu	Yes	
Total				100.00				

(c) Tabla de elementos

Figura 33: Imagen y microanálisis químico obtenidos del SEM de la Probeta 2 - Punto 3



(a) Punto analizado



(b) Espectro de elementos

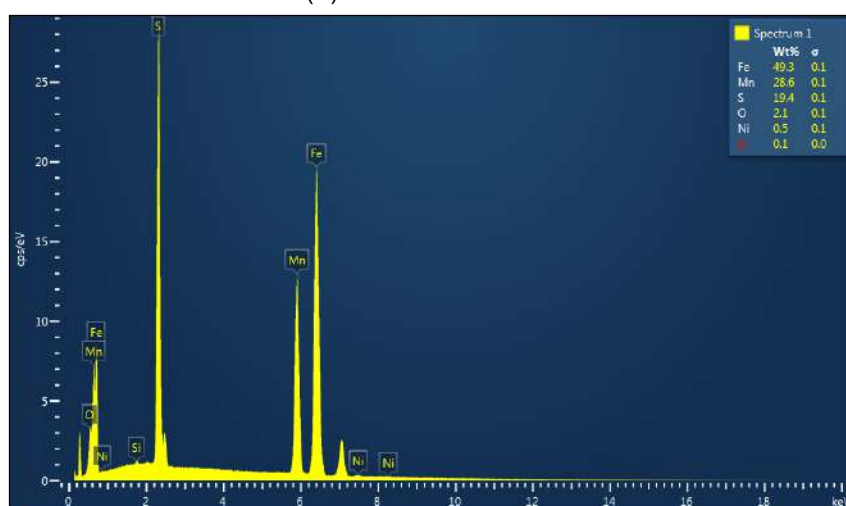
Spectrum 4	Line Type	Apparent Concentration	k Ratio	Wt%	Wt% Sigma	Standard Label	Factory Standard	Standard Calibration Date
S	K series	32.58	0.28067	35.03	0.10	FeS2	Yes	
Mn	K series	51.72	0.51725	58.68	0.12	Mn	Yes	
Fe	K series	4.86	0.04861	5.36	0.09	Fe	Yes	
Ni	K series	0.56	0.00560	0.66	0.06	Ni	Yes	
Cu	K series	0.22	0.00215	0.26	0.06	Cu	Yes	
Total				100.00				

(c) Tabla de elementos

Figura 34: Imagen y microanálisis químico obtenidos del SEM de la Probeta 2 - Punto 4



(a) Punto analizado



(b) Espectro de elementos Punto 1

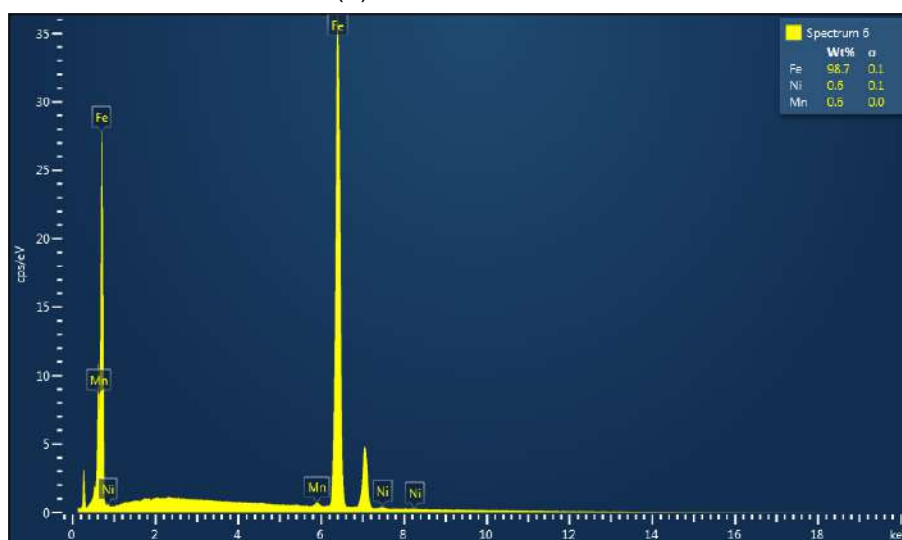
Element	Line Type	Apparent Concentration	k Ratio	Wt%	Wt% Sigma	Standard Label	Factory Standard	Standard Calibration Date
O	K series	2.64	0.00888	2.08	0.07	SiO2	Yes	
Si	K series	0.11	0.00086	0.14	0.02	SiO2	Yes	
S	K series	20.03	0.17252	19.40	0.07	FeS2	Yes	
Mn	K series	30.59	0.30590	28.57	0.10	Mn	Yes	
Fe	K series	54.16	0.54161	49.26	0.11	Fe	Yes	
Ni	K series	0.54	0.00542	0.55	0.05	Ni	Yes	
Total:				100.00				

(c) Tabla de elementos Punto 1

Figura 35: Imagen y microanálisis químico obtenidos del SEM de la Probeta 3 - Punto 1



(a) Punto analizado

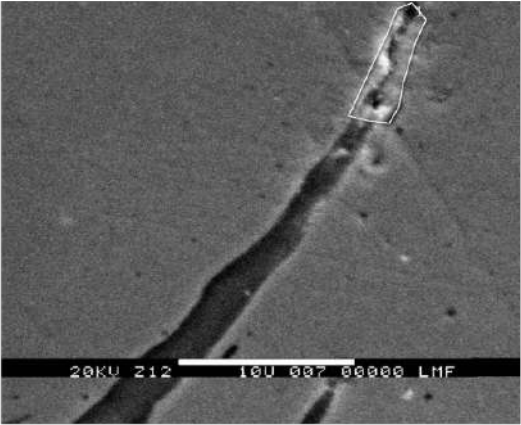


(b) Espectro de elementos

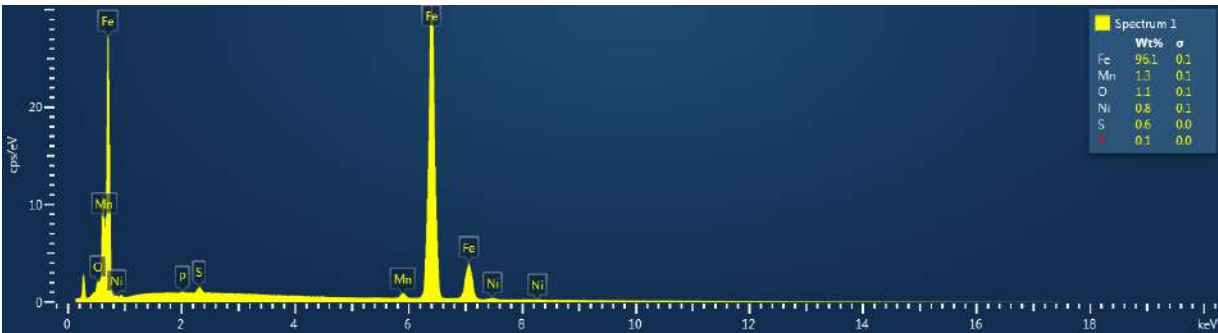
Element	Line Type	Apparent Concentration	k Ratio	Wt%	Wt% Sigma	Standard Label	Factory Standard	Standard Calibration Date
Mn	K series	0.62	0.00622	0.61	0.04	Mn	Yes	
Fe	K series	103.91	1.03912	98.74	0.07	Fe	Yes	
Ni	K series	0.59	0.00591	0.65	0.06	Ni	Yes	
Total:				100.00				

(c) Tabla de elementos

Figura 36: Imagen y microanálisis químico obtenidos del SEM de la Probeta 3 - Punto 6



(a) Zona analizada

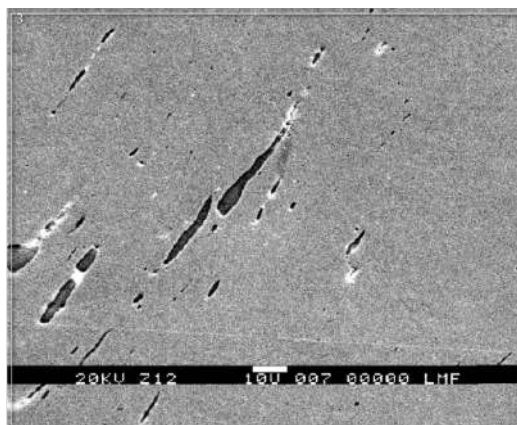


(b) Espectro de elementos

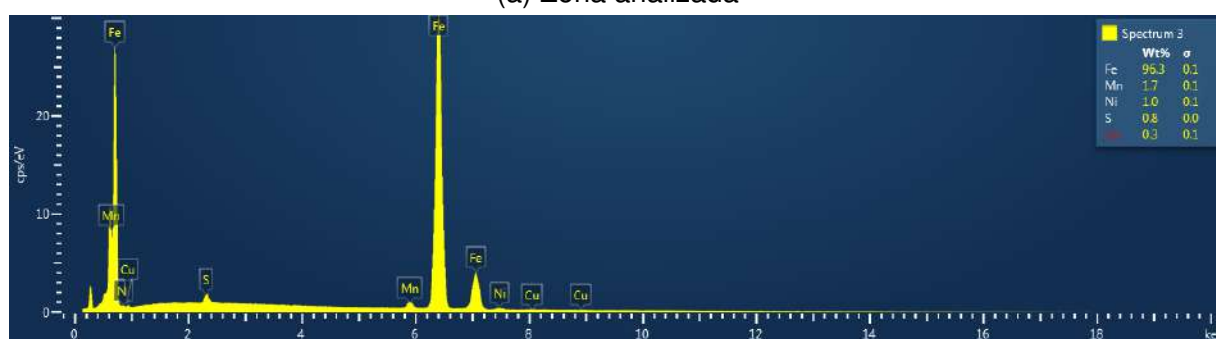
Spectrum 1	Line Type	Apparent Concentration	k Ratio	Wt%	Wt% Sigma	Standard Label	Factory Standard	Standard Calibration Date
O	K series	1.48	0.00498	1.06	0.06	SiO2	Yes	
P	K series	0.12	0.00069	0.13	0.03	GaP	Yes	
S	K series	0.44	0.00381	0.58	0.03	FeS2	Yes	
Mn	K series	1.13	0.01135	1.29	0.05	Mn	Yes	
Fe	K series	86.59	0.86595	96.10	0.11	Fe	Yes	
Ni	K series	0.65	0.00650	0.83	0.07	Ni	Yes	
Total				100.00				

(c) Tabla de elementos

Figura 37: Imagen y microanálisis químico obtenidos del SEM de la Probeta 6 - Zona 1



(a) Zona analizada



(b) Espectro de elementos

Spectrum 3	Line Type	Apparent Concentration	k Ratio	Wt%	Wt% Sigma	Standard Label	Factory Standard	Standard Calibration Date
S	K series	0.61	0.00523	0.80	0.03	FeS2	Yes	
Mn	K series	1.49	0.01489	1.70	0.05	Mn	Yes	
Fe	K series	86.65	0.86648	96.25	0.11	Fe	Yes	
Ni	K series	0.75	0.00748	0.96	0.07	Ni	Yes	
Cu	K series	0.22	0.00221	0.29	0.07	Cu	Yes	
Total				100.00				

(c) Tabla de elementos

Figura 38: Imagen y microanálisis químico obtenidos del SEM de la Muestra 6 - Zona 3

3.1.2. Segunda etapa de caracterización

Luego de analizar los resultados de la primer etapa se llegó a la siguiente conclusión. Posiblemente al procesar las muestras durante la primer etapa las inclusiones de plomo desaparecieron durante la utilización de la lijadora de banda generando que no se detecte el plomo en las micrografías ni en el análisis mediante SEM pero si en el análisis químico brindado por el proveedor del material.

Esto puede deberse en parte al mismo proceso de desbaste durante el cual se pueden desprender las inclusiones. Por otro lado las temperaturas alcanzadas durante este proceso son suficientes para fundir o al menos ablandar el plomo, cuyo punto de fusión es de 327°C.

Debido a esto se procedió a una segunda etapa de caracterización donde se tuvieron particulares recaudos a la hora de procesar las muestras, por un lado no se utilizó la

lijadora de banda ni pulidoras, el pulido en si se realizó manualmente teniendo especial cuidado de no generar aumentos de temperatura y se aumentó el número de etapas para generar un proceso más progresivo.

Luego se analizaron las muestras en el microscopio óptico de las instalaciones del laboratorio de materiales de la Escuela de Ingeniería Mecánica (EIM). En el mismo se obtuvieron las siguientes imágenes:

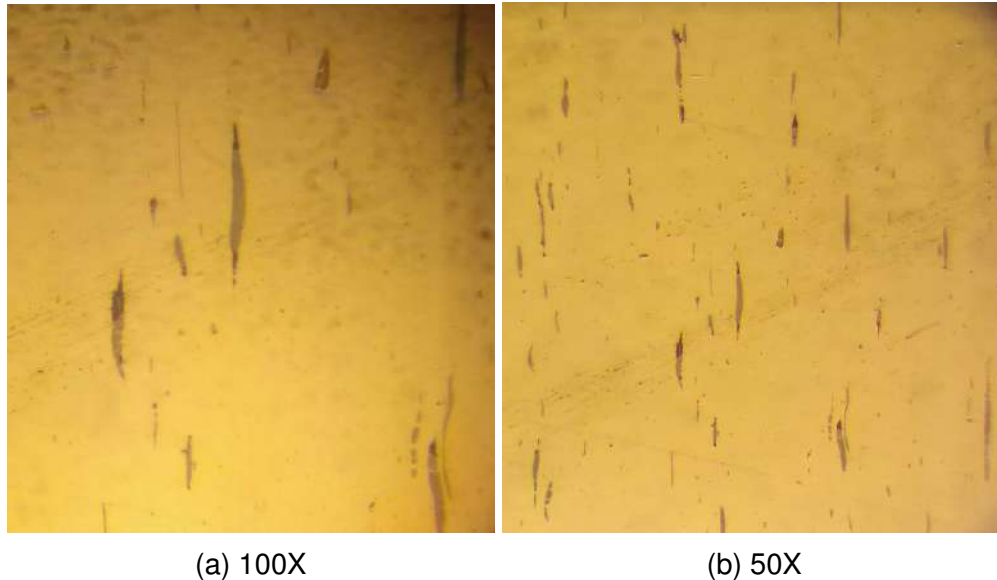


Figura 39: Mirografías obtenidas en la segunda etapa de caracterización

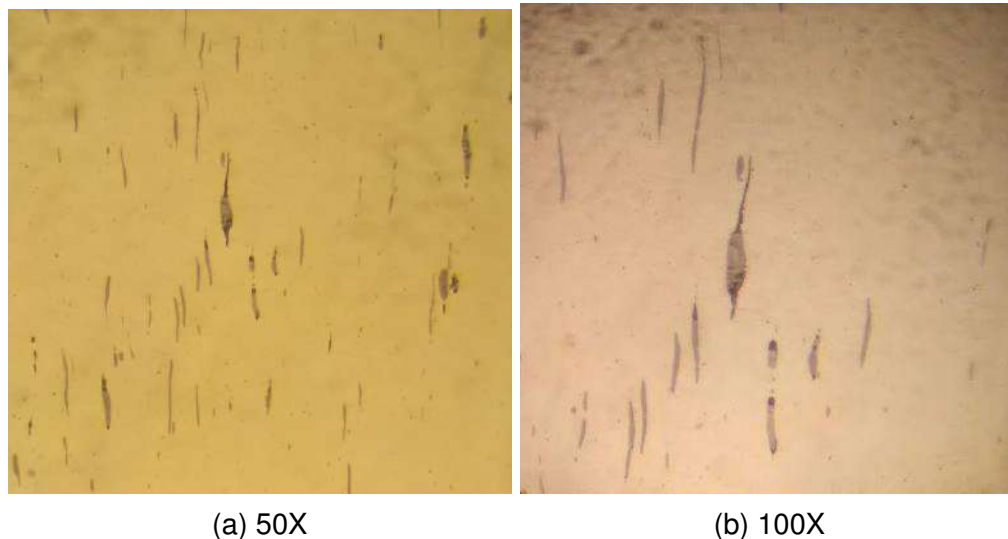


Figura 40: Mirografías obtenidas en la segunda etapa de caracterización

En las mismas se pueden observar las inclusiones de sulfuros de manganeso (MnS) de color gris claro y en sus extremos zonas más oscuras que corresponden al plomo. Eso es consistente con lo que indica la bibliografía consultada [18] [5].

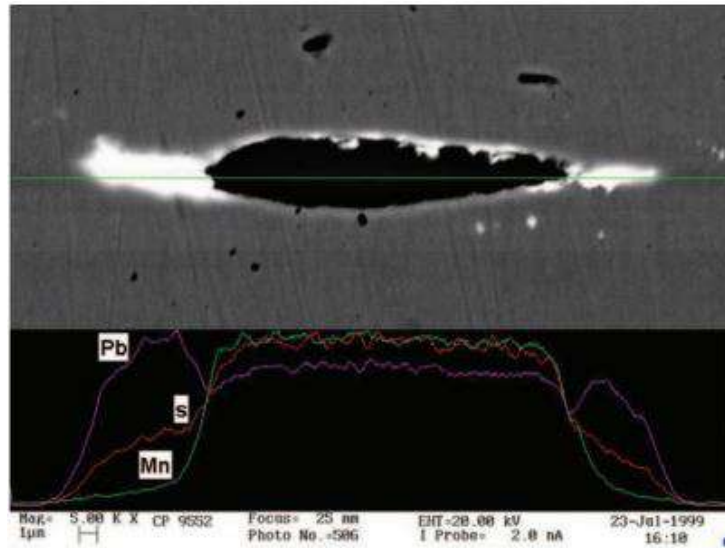


Figura 41: Plomo envolviendo una inclusión de MnS. Fuente: [5]

En las mismas se establece que el Pb tiende a situarse cubriendo las inclusiones de MnS y generando un aspecto de *colas de estela* cuando se analizan muestras en el sentido de alineación de los sulfuros.

En la Figura 41 se puede observar que la morfología observada en las muestras estudiadas se corresponde con el trabajo de referencia [5].

3.2. Características del torno utilizado

Debido a que el ensayo de maquinabilidad requiere fijar la velocidad de corte en un valor determinado, es necesario una herramienta a control numérico. Analizando las opciones disponibles, se decidió utilizar el único torno CNC automático que se encuentra en la Escuela de Ingeniería Mecánica.

El torno CONCEPT TURN 60 es una máquina herramienta más bien para condiciones de laboratorio ya que esta diseñada para la enseñanza del funcionamiento y la programación CNC. Una imagen y la ficha técnica del mismo se muestra en la Figura 42 y 42b. Algunas de las características técnicas más relevantes son:

- Distancia entre puntos de 335mm
- Motor asíncrono AC trifásico de potencia 1,1 kW
- Variación continua de la velocidad de 300 a 4200 RPM
- Plato de tres mordazas con contrapunta

Adicionalmente, el torno está equipado con un software llamado EMCO Easy2control, el cual facilita la programación del mecanizado de manera intuitiva y didáctica, especialmente diseñado para facilitar el aprendizaje de su funcionamiento.



(a) Ficha Técnica



(b) Foto del torno en el laboratorio

Figura 42: Torno CONCEPT TURN 60

3.3. Selección de la herramienta de mecanizado

La selección adecuada de la herramienta es un aspecto crucial en el proceso de mecanizado, especialmente en este caso donde se requieren características específicas. Según el procedimiento anteriormente citado, una de las condiciones principales es que la herramienta no tenga recubrimiento. De este modo, el desgaste producto del mecanizado será mayor, permitiendo una mejor medición del mismo.

Una característica importante a tener en cuenta es la necesidad de un portaherramientas para sostener la herramienta en el torno. Es esencial que el inserto se ajuste adecuadamente al porta para evitar vibraciones y deformaciones en la pieza. En este caso en particular, se utilizó el portaherramientas STGCR1212F11, que fue seleccionado de entre los disponibles en la Escuela de Mecánica. Este tipo de portaherramientas es de tornillo y tiene un ángulo de ataque de 91° , diseñado específicamente para una plaquita triangular con un ángulo de incidencia positivo de 7° .

En base en estas condiciones, se evaluaron varias opciones de herramientas disponibles en el mercado, tomando en cuenta su material, diseño, geometría de corte y capacidad para cumplir con los requisitos mencionados. Finalmente, se seleccionó

la herramienta TCMT 2-1-19 110204-19 IC20 de la marca ISOTURN, la cual cumple con todas las condiciones mencionadas. Esta plaquita de metal duro sin recubrimiento es ideal para operaciones de semi-acabado, acabado y semi-desbaste de aluminio, fundición y aceros inoxidables. Cabe destacar que en el mercado no se encontraron insertos sin recubrimiento para mecanizar acero, únicamente para aluminio.

En la Figura 44 se detallan las características de la plaquita seleccionada. Algunas de ellas son:

- Geometría triangular con un ángulo de desprendimiento plano positivo de 7°
- Velocidad de corte $V_c = 200$ a 600 m/min
- Avance $F_z = 0.1$ a 0.3 mm/rev
- Profundidad de corte $A_p = 0.5$ a 3 mm

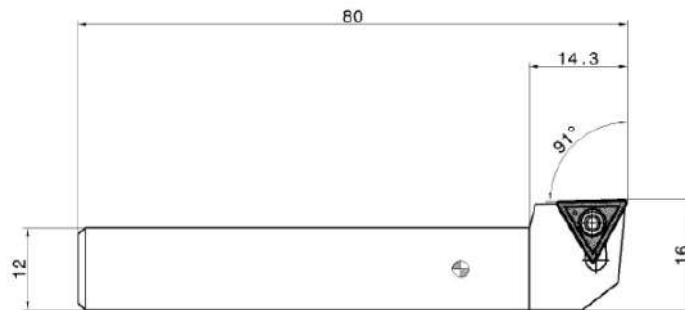
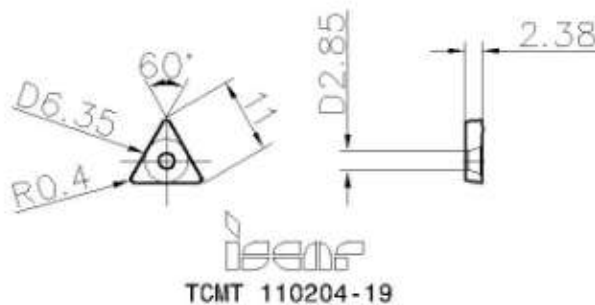


Figura 43: Dimensiones del portaherramientas STGCR 1212 F11



(a)
Carac-
terísticas
técnicas



(b) Dimensiones

Figura 44: Herramienta TCMT2-1-19 IC20

3.4. Medición del desgaste de las herramientas

Se evaluaron distintas opciones para medir el desgaste de la herramienta. En el laboratorio de metrología de la Escuela de Ingeniería Mecánica solo se cuenta con una máquina de medición analógica que no permite registrar mediciones sucesivas ni tomar fotos de la herramienta. Por esta razón, se decidió utilizar otro método de medición que fuera eficiente y lo suficientemente preciso para la prueba experimental. Luego de analizar varias alternativas, se optó por medir el desgaste de la herramienta mediante una imagen digital obtenida con un microscopio óptico y procesarla en un software especializado como Image J.

En cuanto al proceso de medición, en primer lugar, se llevará a cabo la fijación adecuada de la herramienta utilizando un dispositivo de sujeción para asegurar la estabilidad de la misma y mantener su posición constante durante todo el proceso. Posteriormente, se capturará una imagen digital de la herramienta mediante el uso del microscopio de alta resolución.

La imagen digital obtenida se procesará utilizando el software Image J, que analiza la intensidad de los píxeles en diferentes áreas de la imagen para calcular el valor de desgaste de la herramienta.

La utilización de un dispositivo de sujeción garantiza que la herramienta se mida con precisión y se obtengan resultados más precisos y confiables. Además, el software Image J ofrece una amplia gama de herramientas y funciones para realizar mediciones precisas y fiables, lo que facilita la determinación del valor de desgaste de la herramienta.

Una vez obtenido el valor de desgaste de la herramienta, se procede a analizar los resultados obtenidos.

En cuanto a Image J, es un software de procesamiento de imágenes de código abierto que es utilizado en diversos campos de investigación y ciencias, como la biología, la medicina, la física, la ingeniería y la ciencia de materiales. Este software permite la visualización, procesamiento y análisis de imágenes digitales, incluyendo imágenes de microscopía, tomografías y fotografías. Cuenta con una amplia gama de herramientas y funciones para la medición, el análisis y la manipulación de imágenes.

En este caso, y en el campo de la ingeniería mecánica, Image J es una herramienta muy útil ya que permite medir y analizar diferentes características de las piezas, como el desgaste de herramientas de mecanizado o en análisis de una metalografía mediante la medición de granos, la determinación del porcentaje existente de cada estructura, entre otros. Además, debido a que es de código abierto, su uso es gratuito y está disponible para cualquier persona que lo necesite.

Para llevar a cabo la medición, se debe abrir la foto correspondiente y seleccionar la herramienta "Straight" para crear un segmento que coincida con una distancia conocida en la imagen. A modo de ejemplo, se utilizara la Figura 45 como referencia. Posteriormente, se debe seleccionar la herramienta "Set Scale" para establecer la escala al especificar la longitud real de la distancia marcada, como se muestra en la Figura 46a. Esta herramienta convierte las mediciones de píxeles a unidades físicas, lo que es esencial para obtener mediciones precisas.

Una vez establecida la escala, se debe utilizar nuevamente la herramienta "Straight" para medir la longitud deseada y luego seleccionar "Measure" para realizar la medición como

se observa en 46b. Es importante tener en cuenta que la precisión de las mediciones depende en gran medida de la calidad de la imagen y de la selección realizada. Se recomienda utilizar imágenes con buena resolución y contrastes claros entre el objeto que se desea medir y el fondo.

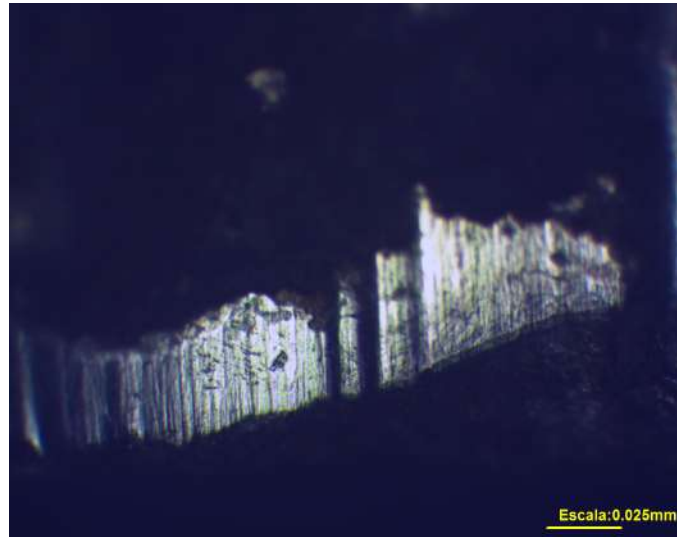
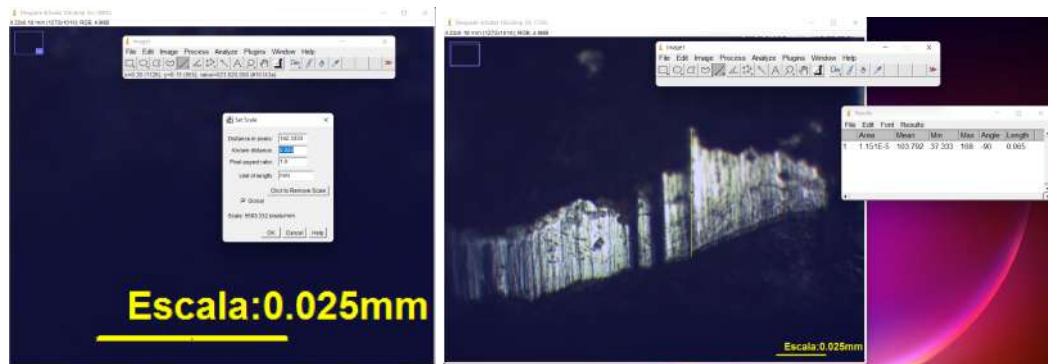


Figura 45: Imagen de ejemplo para medir el desgaste



(a) Herramienta "Set Scale"

(b) Herramienta "Measure"

Figura 46: Medición del desgaste de la herramienta mediante Image J

La utilización de este método de medición del desgaste de flanco a través de imágenes digitales ofrece varias ventajas significativas. Una de ellas es la capacidad de llevar a cabo pruebas con diversas velocidades de corte, capturar las imágenes de manera rápida y procesarlas posteriormente. Esto tiene como resultado una reducción en el tiempo necesario para llevar a cabo el ensayo, al mismo tiempo que se logra un enfoque más dinámico y eficiente. En este sentido, el uso de la tecnología digital para el análisis del desgaste de flanco presenta beneficios notables.

La posterior etapa de procesamiento de las imágenes constituye otro aspecto destacado. Al contar con las imágenes digitales, se dispone de herramientas y algoritmos

que facilitan la extracción de información relevante de manera precisa y eficiente. Esto permite un análisis más detallado del desgaste de flanco y una interpretación más precisa de los resultados obtenidos.

En resumen, el uso de la medición del desgaste de flanco mediante imágenes digitales ofrece ventajas significativas, entre las que se incluyen la posibilidad de realizar el ensayo completo eficientemente, la captura rápida de las imágenes y el procesamiento óptimo de las mismas. Estas mejoras permiten acortar el tiempo del ensayo, haciendo que el proceso sea más dinámico y eficiente en su conjunto.

3.4.1. Dispositivo de sujeción de la herramienta

Como se ha mencionado en la sección anterior, la medición del desgaste de la herramienta se llevará a cabo mediante una imagen digital capturada con el microscopio óptico. Para garantizar que los resultados sean comparables entre mediciones sucesivas, es imprescindible contar con un soporte que mantenga la herramienta fija en la misma posición. Por lo tanto, el objetivo del diseño del dispositivo de sujeción del inserto consiste en permitir una medición precisa del desgaste a través de una sujeción segura y estable de la herramienta.

El diseño del dispositivo de sujeción se realizó en SolidWorks teniendo como referencia las dimensiones de la plaquita. En la Figura 47 puede observarse el modelo 3D y el croquis del dispositivo.

Se utilizó una impresora 3D para imprimir el modelo en un material plástico PET G de color blanco, con el propósito de generar contraste entre el dispositivo y la plaquita. La Figura 47d muestra el dispositivo impreso. La impresión en 3D permitió la creación rápida de un prototipo funcional a bajo costo.

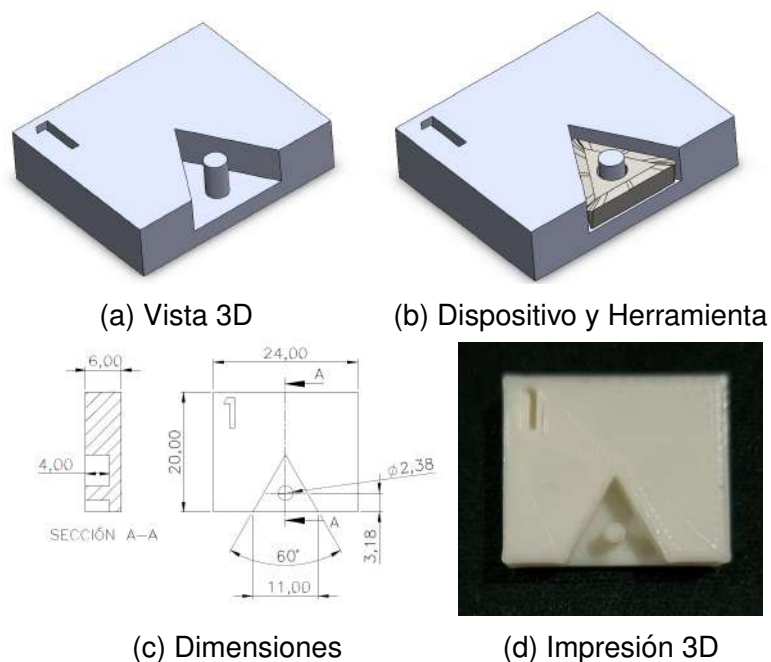


Figura 47: Dispositivo de sujeción de la herramienta

3.5. Puesta a punto del ensayo

Como primer paso para poner a punto el ensayo, se debe adecuar la pieza de trabajo al torno automático disponible ya que este es de pequeñas dimensiones. Esto implica seleccionar las dimensiones y geometría de la barra a torneear. Con lo cual, se elige una barra redonda de diámetro de 1" (25,4 mm) tal que pueda ser sostenido en el plato de 3 mordazas, y se corta a una longitud 150 mm a partir de una barra de 3 metros de largo. En la Figura 48 puede observarse la barra mencionada.

Debido al tamaño y la ubicación de los componentes del torno, como la torreta portaherramientas y la contrapunta, es necesario reducir el diámetro de la barra en el extremo opuesto al plato para evitar interferencias. Por lo tanto, se decide reducir el diámetro de la barra a 10 mm en los primeros 20 mm desde el extremo, lo que garantiza la ausencia de choques con los demás componentes.

Además, debido al largo de la barra, que estará sostenida por el plato de 3 mordazas, una gran parte de ella quedará en voladizo. Esto no es recomendable ya que puede provocar vibraciones excesivas en la punta y afectar el torneado. Para evitarlo, es necesario utilizar la contrapunta, lo cual implica realizar un agujero para sujetar la barra. También es crucial asegurarse de que la barra tenga una cilindridad adecuada para evitar desbalanceos inadecuados durante el torneado. Por lo tanto, se decide mecanizarla por completo para garantizar esta condición. Este último mecanizado reduce aproximadamente 1 mm del diámetro de la barra, pasando de 25,4 mm a 24,4 mm.

Ambos mecanizados se llevan a cabo en el torno paralelo del taller de la Escuela de Ingeniería Mecánica, tal como se muestra en la Figura 50. Se elige este torno específico debido a su mayor potencia y a la disponibilidad de una broca adecuada para mecanizar el agujero de la contrapunta, elementos que no están disponibles en el torno automático utilizado para la prueba. En la Figura 49 se puede apreciar el resultado del mecanizado y la pieza final que se utilizará en la prueba experimental.

En resumen, se incluye un croquis en la Figura 51 que sintetiza las modificaciones realizadas a la barra mencionadas anteriormente. Además, para el agarre del plato de 3 mordazas, se han destinado 15 mm de longitud. En la Figura 52 se observa la probeta montada en el torno correspondiente. Además, en la Figura 53 se observan las dimensiones finales de la pieza ya mecanizada.



Figura 48: Barra de 25,4mm de diámetro y 150mm de largo



(a) Vista superior



(b) Extremo de reducción del diámetro



(c) Extremo de donde se sujeta

Figura 49: Pieza de trabajo para la prueba experimental



Figura 50: Torneado de la probeta en el torno paralelo del EIM

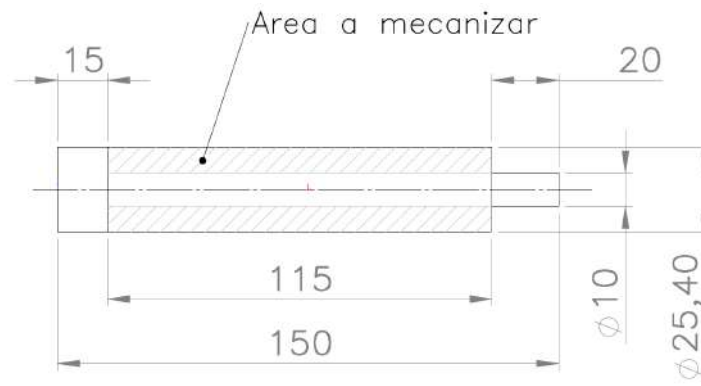


Figura 51: Croquis de la pieza de trabajo para la prueba experimental



Figura 52: Montaje de la barra en el torno CONCEPT TURN 60

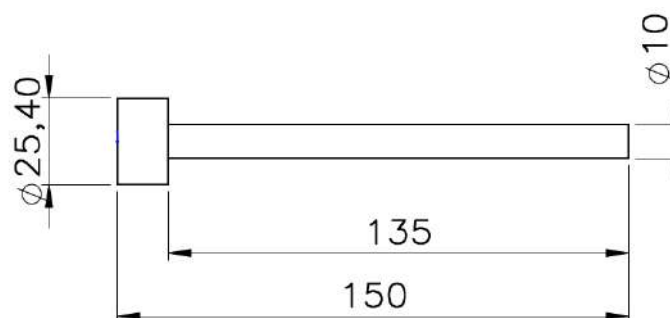


Figura 53: Dimensiones finales de la pieza

Se recogieron muestras de las virutas obtenidas luego del desbaste grueso realizado en el torno paralelo. En la Figura 54 puede observarse que la viruta obtenida es del

tipo tubular o tipo 3, de considerable longitud y, como característica usual del acero, la misma es brillante.



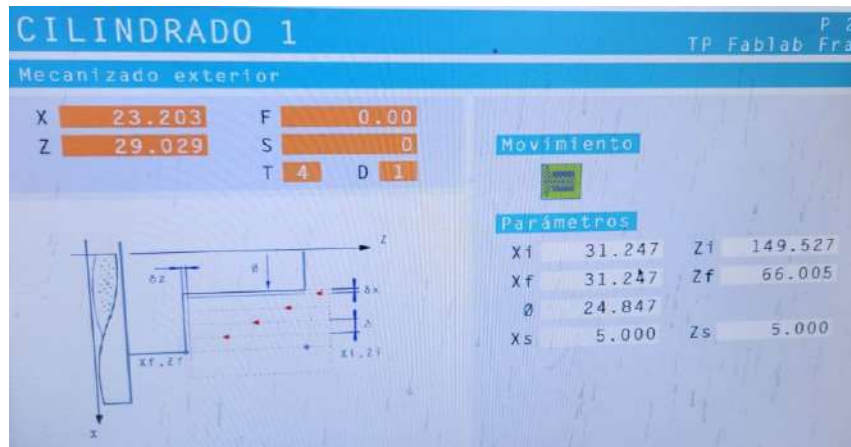
Figura 54: Viruta producto del desbaste grueso

Una vez obtenidas las dimensiones adecuadas para colocar la pieza de trabajo en el torno CNC, la misma se monta entre el plato de 3 mordazas y la contrapunta. Se verifica que la sujeción sea correcta y se procede a observar el comportamiento de la máquina y la pieza a diferentes velocidades sin que la herramienta realice cortes. Esto se realiza con el objetivo de determinar un rango de condiciones de corte adecuado. Se lleva a cabo esta prueba para evaluar el rendimiento a diferentes RPM, variando desde 800 hasta 1500 RPM.

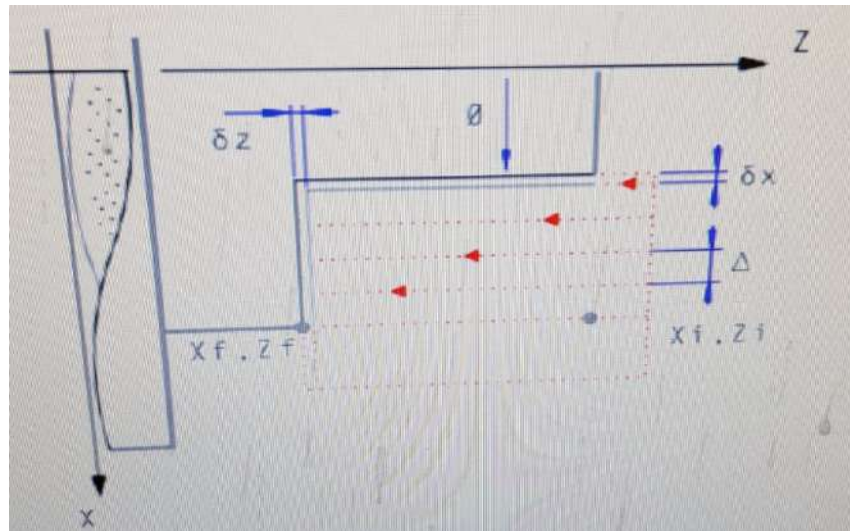
Además, se realiza una prueba adicional manteniendo la velocidad de corte constante en un rango de 50 a 100 m/min, limitando las RPM a 1500 respectivamente. Estas pruebas se realizan utilizando el software didáctico del torno CONCEPT TURN 60, simplemente ingresando los valores requeridos en las casillas correspondientes.

En relación al software del torno, la Figura 55 muestra cómo se programa el cilindrado a realizar. Para ello, se deben definir la geometría de la pieza de trabajo, incluyendo el diámetro inicial y final, así como la longitud a tornearse. También se debe establecer el punto de referencia de la pieza para calcular la velocidad de corte y mantenerla constante. Además, se especifica la profundidad de pasada y el avance por revolución deseado.

El programa de cilindrado de la máquina consiste en reducir gradualmente el diámetro de la pieza a una profundidad de pasada específica, repitiendo este proceso sucesivas veces hasta alcanzar el diámetro deseado.



(a) Pantalla del programa de cilindrado



(b) Forma de cilindrado de acuerdo al programa

Figura 55: Software del Torno CONCEPT TURN 60

3.5.1. Características de la pieza de trabajo

Para el ensayo se utiliza una barra redonda de acero de corte libre de grado 12L14E3 laminada en caliente y trefilada en frío, de un diámetro 1" (25,4 mm) y cortada a un largo de 150mm cuyo proveedor es ArcelorMittal Acindar. En la Figura 56 puede observarse la identificación que proporciona el proveedor.

En cuanto a sus propiedades mecánicas, en el catálogo del proveedor se mencionan las siguientes[6]:

- Resistencia a la tracción: 540 MPa
- Límite de fluencia: 410 MPa

- Alargamiento A (2'): 10 %
- Estricción Z: 35 %
- Dureza Brinell: 163 HB
- Maquinabilidad: 160 % (Considerando 1212-100 %)

Además, en el catálogo del proveedor se destacan varias ventajas asociadas a la utilización de productos trefilados. Estas ventajas incluyen un aumento en las propiedades mecánicas, una mayor precisión en la sección, una terminación superficial superior, una mayor rectitud y una mayor maquinabilidad [6].

El trefilado mejora significativamente el rendimiento durante el mecanizado, con mejoras de hasta un 20 % en comparación con otros productos. Además, favorece la formación de virutas más cortas, lo que contribuye a un proceso de mecanizado más eficiente. Asimismo, se logra una mayor cantidad de piezas mecanizadas por hora y se mejora la vida útil de la herramienta utilizada en el proceso.

La precisión en la sección, el nivel de superficie, la rectitud y la concentricidad de las barras sometidas al trefilado son factores variables que benefician la operación de mecanizado en general.

Debido a las dimensiones de la barra, no es posible utilizarla directamente en el torno. Por lo tanto, se procedió a mecanizarla en el torno paralelo hasta alcanzar las dimensiones indicadas en la Figura 57. Estas dimensiones son necesarias para lograr un agarre adecuado del plato de tres mordazas y evitar colisiones no deseadas entre los componentes del torno y la pieza en sí.



Figura 56: Identificación de la barra utilizada en la prueba

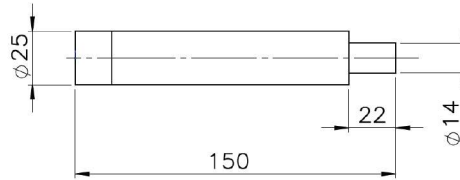


Figura 57: Dimensiones iniciales de la pieza de trabajo

3.5.2. Ajuste de la herramienta y verificaciones antes del torneado

Para realizar un torneado controlado y preciso, resulta fundamental configurar correctamente los parámetros y variables involucrados en el mecanizado. Además de las condiciones de corte, es necesario proveer al software de las coordenadas de la punta de la herramienta y las compensaciones de radio necesarias para que la pieza llegue correctamente a sus dimensiones finales y pueda mantenerse la velocidad de corte constante. Como se observa en la Ecuación 5, tanto la velocidad del husillo como el diámetro al que se encuentra mecanizando es fundamental para realizar la compensación adecuada y mantener esta medida constante.

Por lo tanto, al introducir una nueva herramienta en el torno, es fundamental determinar una serie de parámetros para que el software pueda conocer las coordenadas exactas de la punta de la herramienta y, de esta forma, realizar el mecanizado correctamente.

Para determinar el origen de la herramienta, se utilizan medidas conocidas de una pieza utilizada como referencia para establecer los parámetros necesarios. De esta manera, se realizan los cálculos necesarios en función de las medidas tomadas.

Por su parte, la compensación es esencial porque, durante el torneado, la herramienta no puede llegar exactamente al punto deseado debido a su propio radio. Por lo tanto, al restar el radio de la herramienta, se tiene en cuenta este factor y se logra obtener las dimensiones finales correctas. Esta compensación se configura en el software del torno, y se basa en el conocimiento preciso del radio de la herramienta que se está utilizando. Al programar las coordenadas para el mecanizado, el software realiza automáticamente la resta necesaria, asegurando así las dimensiones finales de la pieza.

En la Figura 59 puede observarse la determinación de los parámetros que establecen el origen de la herramienta y las compensaciones necesarias.

Además, es imprescindible llevar a cabo una prueba en vacío para analizar posibles colisiones entre la pieza, las herramientas, el plato y las contrapuntas. Esta prueba es crucial para garantizar la seguridad durante el mecanizado y prevenir daños tanto a la maquinaria como a las piezas. Asimismo, resulta importante realizar pruebas en vacío para asegurar observar el movimiento de la pieza cuando esta girando a la velocidad del husillo. De esta forma, se verifica que la pieza esté correctamente balanceada. Un desequilibrio podría generar vibraciones indeseadas durante el mecanizado, afectando negativamente la calidad del acabado y poniendo en riesgo la integridad de la herramienta.

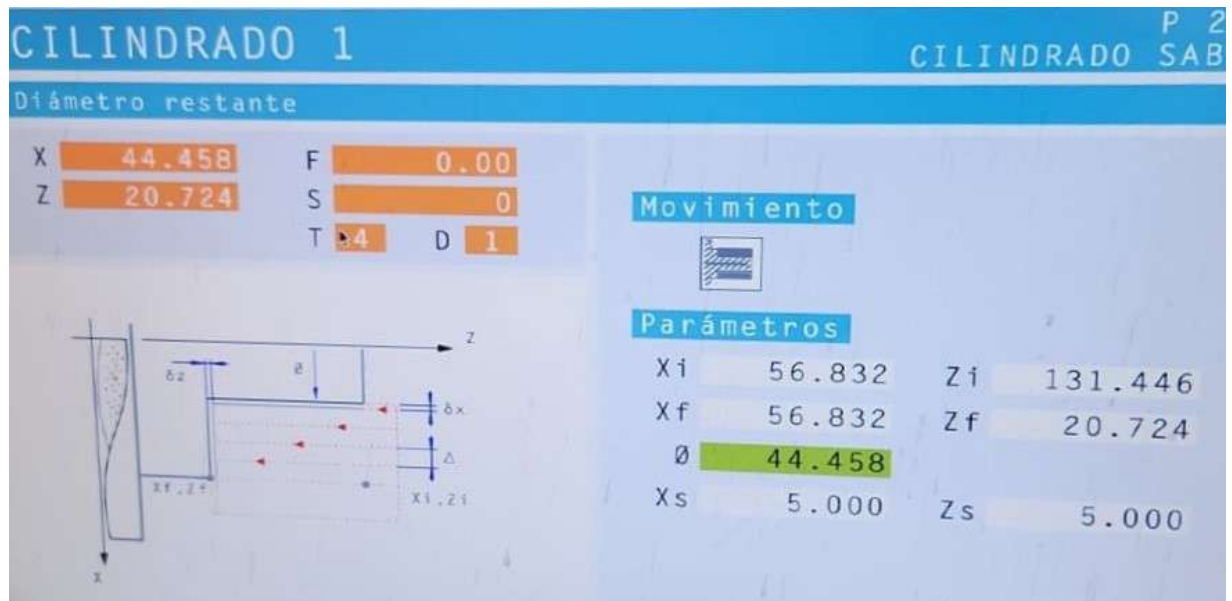


Figura 58: Prueba en vacío

En la Figura 58 puede observarse la configuración del programa de cilindrado del software del torno para realizar las pruebas en vacío, es decir no se mecaniza pero la herramienta, la pieza y la contrapunta se encuentran montadas para realizar un análisis de colisiones. Es por ello que puede observarse que los diámetros iniciales y finales son más grandes que la pieza en cuestión. Además, se lleva a cabo nuevamente una prueba en vacío con el propósito de obtener una mejor comprensión del rango de velocidades de husillo y de velocidades de corte que son aceptables para realizar el cilindrado correspondiente. En esta prueba se consideran las compensaciones y se determina el origen de la herramienta. De esta manera, se obtendrá información más precisa para llevar a cabo el proceso de cilindrado de manera óptima.

En resumen, configurar el origen de la herramienta de manera precisa, establecer parámetros correctos, realizar las compensaciones adecuadas y llevar a cabo pruebas en vacío son pasos esenciales para mantener una velocidad de corte constante y lograr un torneado eficiente y de calidad. Estas acciones contribuyen a minimizar errores, mejorar la seguridad y maximizar los resultados obtenidos en el proceso de mecanizado.

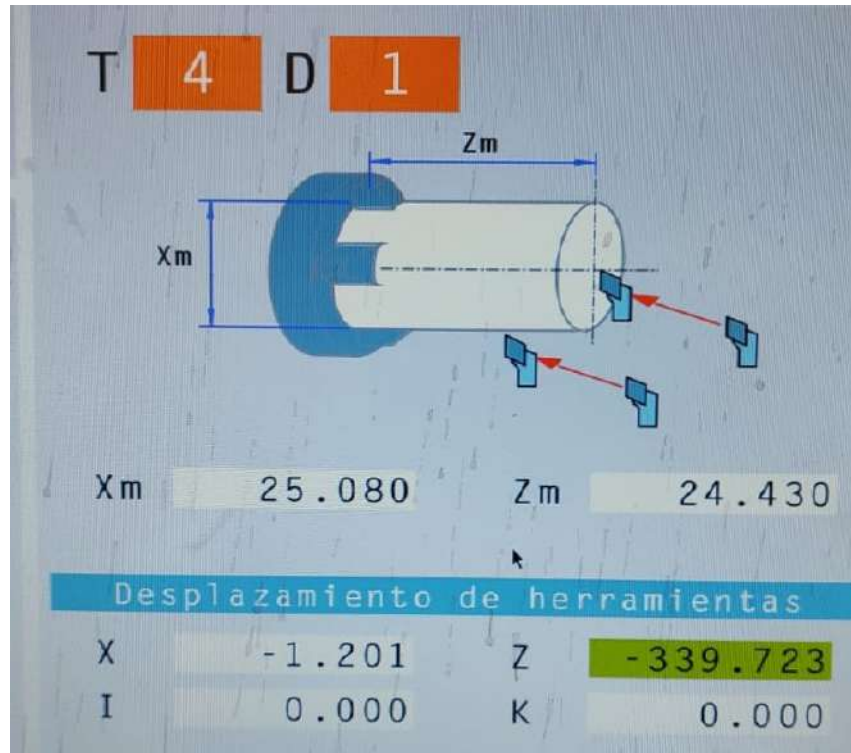


Figura 59: Configuración de la herramienta

3.6. Prueba experimental

La prueba experimental a realizar consiste en realizar un cilindrado en seco de la pieza de trabajo cuyas dimensiones iniciales se especifican en la Figura 60a. El material es un acero de corte libre de grado 12L14E3 que fue suministrado en forma de barras redondas de 25,4mm de diámetro y 3000mm de longitud. A este material de partida se le aplicaron una serie de operaciones previas para prepararlo para los ensayos como la reducción del diámetro para que la pieza se encuentre balanceada, agujeros de contrapunta y una reducción del diámetro a 14mm en los primeros 22 mm desde el extremo, lo que garantiza la ausencia de choques con los demás componentes.

Luego de realizar el ajuste del origen de la herramienta y las compensaciones necesarias, se lleva a cabo una prueba en vacío con la probeta montada en el torno. El propósito de esta prueba es verificar la posible existencia de colisiones entre los componentes, así como evaluar el balanceo y las vibraciones del conjunto completo. Una vez finalizada exitosamente la prueba en vacío, se procede a configurar el programa de cilindrado. Durante este paso, se realizan los ajustes necesarios en las condiciones de corte para lograr un mecanizado con una velocidad de corte constante que se mantenga desde un diámetro inicial de 25 mm hasta un diámetro final de 14 mm.

Los resultados obtenidos de la prueba en vacío nos proporcionan un rango de velocidades de husillo admisibles que garantizan vibraciones y carga térmica aceptables en el conjunto del torno en su totalidad. Este rango de velocidades se toma en consideración al seleccionar las condiciones de corte para el proceso de cilindrado.

Basándonos en la experiencia previa, se elige una velocidad de corte constante,

conocida como S o CSS en el programa de cilindrado, que no exceda las 2100 RPM. Para determinar la velocidad del husillo adecuada, se realiza un cálculo basado en la Ecuación 13, teniendo en cuenta el diámetro final a mecanizar (14 mm) y una velocidad de corte de 90 m/min. Según este cálculo, la velocidad del husillo resultante es de 2046 RPM, lo cual se considera apropiado y cumple con los requerimientos establecidos.

$$n = \frac{V_c \times 10^3}{\pi \times D_c} \quad (13)$$

donde:

- n [rev/min]: Velocidad del husillo
- V_c [m/min]: Velocidad de corte
- D_c [mm]: Diámetro final de la pieza

La variable de profundidad de pasada a_p indicada con la letra delta Δ en el programa, se selecciona de tal forma que se logre un acabado superficial aceptable y que no afecte en gran medida en la potencia de la máquina. El parámetro de avance se indica con la letra F en pies por minuto en el programa de cilindrado.

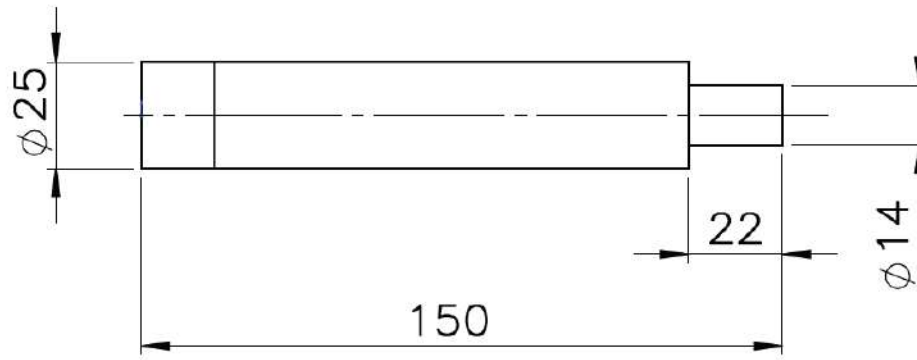
De lo descrito anteriormente entonces se seleccionan las siguientes condiciones de corte para el cilindrado a realizar:

- $V_c = 90 \text{ m/min}$ constante
- $a_p = 0,1 \text{ mm}$
- $f_n = 0,16 \text{ pies/rev} = 48,77 \text{ mm/rev}$
- $n_{max} = 2100 \text{ RPM}$

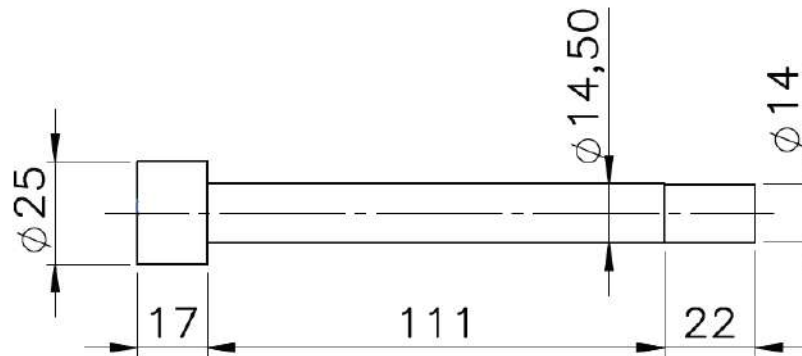
De las condiciones de corte seleccionadas, se realiza el cálculo de la velocidad de arranque de viruta y la potencia utilizada durante el corte para tener una idea de la misma con las Ecuaciones 6 y 7. Se obtiene que

- $Q = 483,93 \text{ cm}^3/\text{min}$ constante
- $P_c = 1,1 \text{ kW}$ considerando una Fuerza Específica de Corte $K_c = 1600 \text{ N/mm}^2$

Además de las condiciones de corte y dimensiones iniciales de la pieza de trabajo, también deben especificarse la longitud total de mecanizado y diámetro final a mecanizar. En la Figura 60 se observan ambas dimensiones de la pieza de trabajo.



(a) Dimensiones iniciales



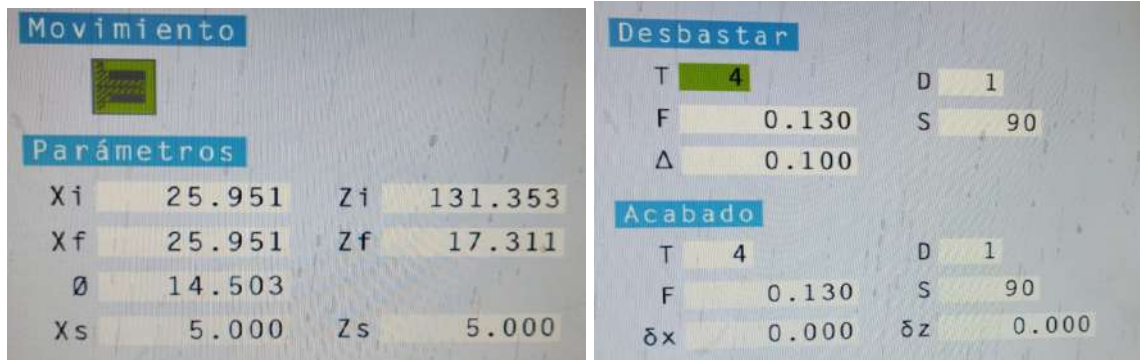
(b) Dimensiones finales

Figura 60: Dimensiones de la probeta antes y después del mecanizado

Las diferentes especificaciones necesarias para el proceso de mecanizado mencionadas anteriormente se cargan en el software del torno CNC. En la Figura 61, se puede observar cómo se indican estos parámetros en el software de mecanizado. El programa asigna dos tipos de mecanizado para el cilindrado: uno de desbaste y otro de acabado, con el objetivo de lograr una mejor calidad superficial en la pieza. Generalmente, durante el acabado, la velocidad de corte aumentaría; sin embargo, en este caso se mantienen todos los parámetros iguales, lo que significa que el cilindrado se realiza de manera uniforme durante todo el proceso de mecanizado ya que el acabado superficial final no resulta relevante a los fines del ensayo.

Una vez que se han establecido y asignado los valores correspondientes de todos los parámetros, se da inicio al proceso de mecanizado y se comienza a contar el tiempo transcurrido. La Figura 62 muestra la pieza de trabajo en el proceso de mecanizado.

El tiempo de mecanizado fue de 30 minutos a $V_c = 90 \text{ m/min}$ y la pieza de trabajo obtenida es la observada en la Figura 63.



(a) Coordenadas para el mecanizado

(b) Condiciones de corte

Figura 61: Especificaciones de dimensiones, coordenadas y condiciones de corte en el programa del torno CNC

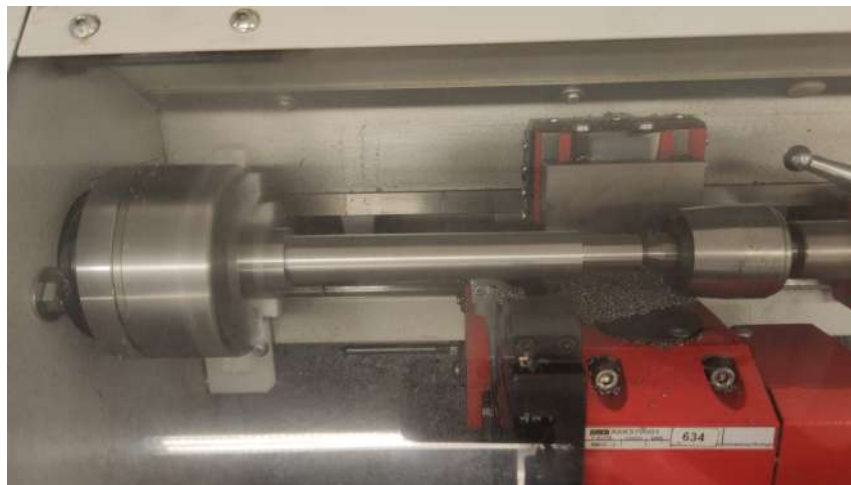


Figura 62: Cilindrado en el torno CNC



Figura 63: Pieza de trabajo luego del mecanizado

3.7. Resultados

La herramienta utilizada para el mecanizado se examina tanto con un microscopio óptico como con una lupa en la Escuela de Ingeniería Mecánica para evaluar su desgaste.

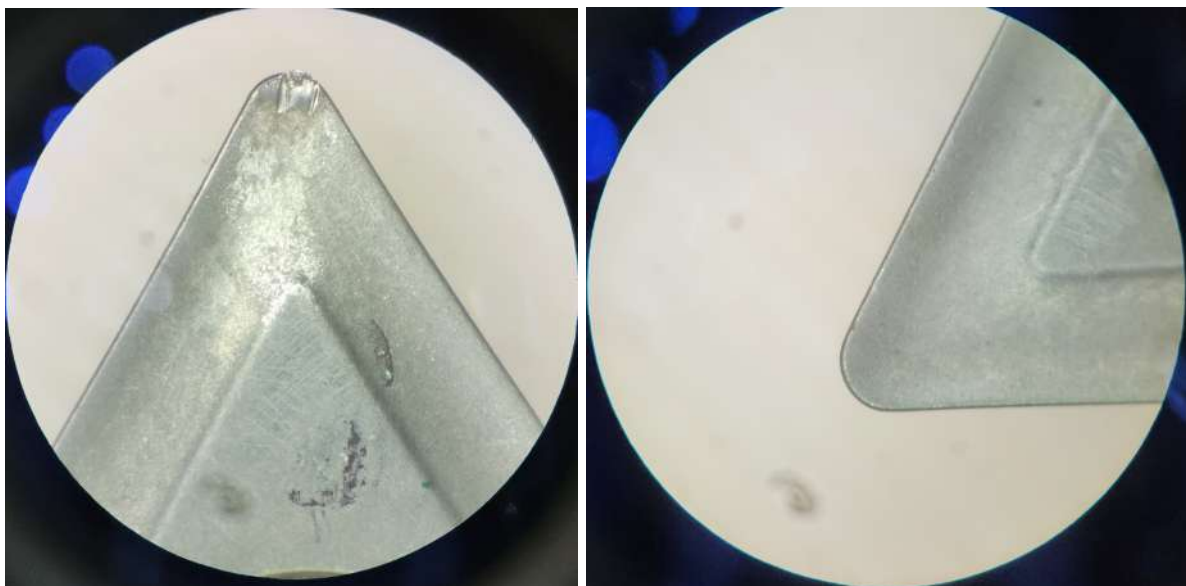
En las Figuras 64, 65 y 66 se presentan las imágenes capturadas con la lupa, mientras que en las Figuras 67 y 68 se muestran las obtenidas con el microscopio óptico. El fondo blanco presente en las imágenes corresponde al dispositivo de sujeción de la herramienta.

En la Figura 65a y la Figura 66a, se evidencia claramente el desgaste de la herramienta. En una observación detallada, se puede apreciar una deformación plástica pronunciada, que incluso afecta la punta del inserto creando un filo de aportación. Para una comparación entre el borde desgastado y el borde intacto de una de las puntas no utilizadas, se pueden utilizar las Figuras 65b y 66b.

Por otro lado, en la Figura 68 se muestra el ligero desgaste del flanco ocasionado durante el mecanizado. La última Figura (68c), se utiliza para medir el desgaste registrado en el software Image J, siguiendo el procedimiento mencionado anteriormente. Las mediciones de la longitud del desgaste se pueden observar en la Figura 69. En dichas mediciones, se registra el pico máximo de desgaste observado (Figura 69a), un desgaste similar cercano al pico máximo (Figura 69b), y el menor desgaste observado (Figura 69c). La unidad de medida es en milímetros (mm), lo que significa que estos picos corresponden a centésimas de micrómetro. Esta medición fue posible gracias a la escala que se refleja en las imágenes de 100 micrómetros (μm)



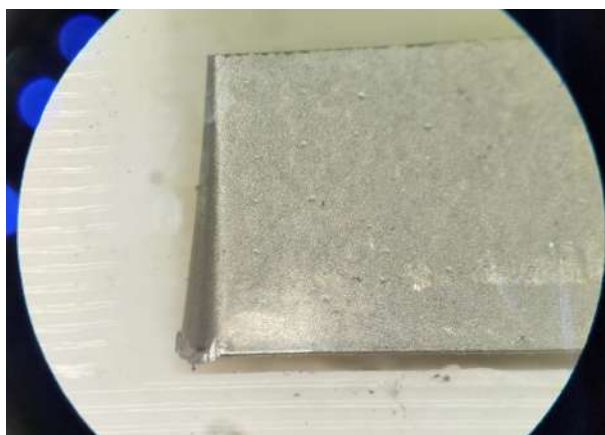
Figura 64: Vista superior de la herramienta utilizada



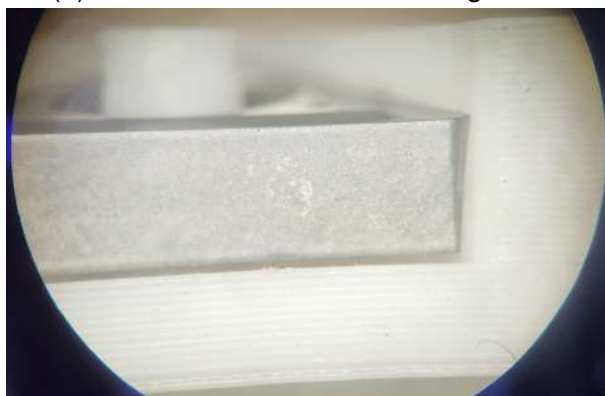
(a) Vista superior del borde desgastado

(b) Vista superior del borde sano

Figura 65: Imágenes superiores de la herramienta tomadas con la lupa

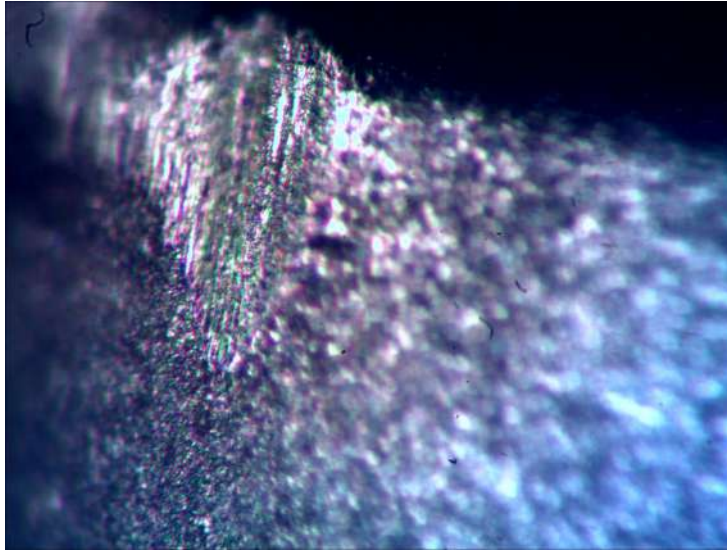


(a) Vista de frente del borde desgastado

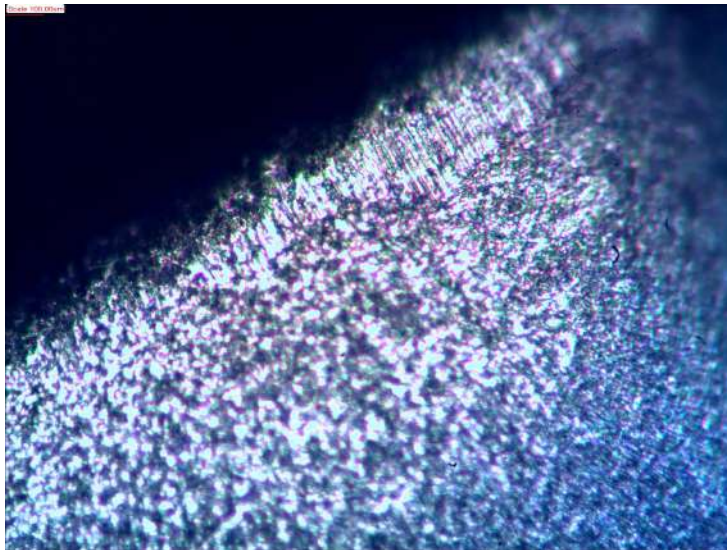


(b) Vista de frente del borde sano

Figura 66: Imágenes de frente de la herramienta tomadas con la lupa

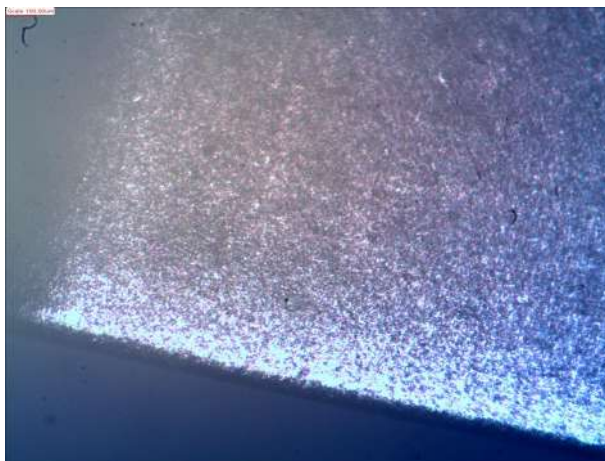


(a) Desgaste en la punta de la herramienta

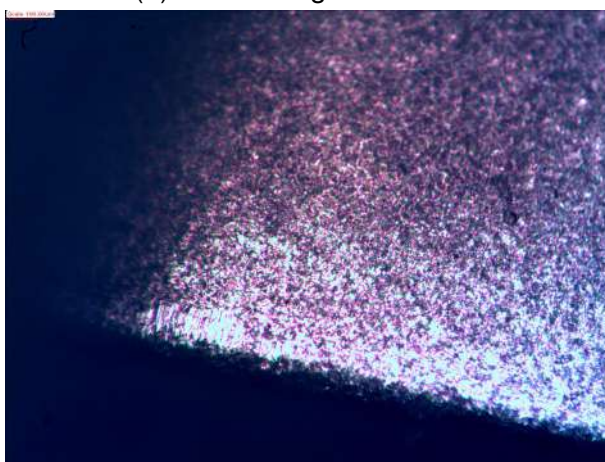


(b) Borde de desgaste de flanco

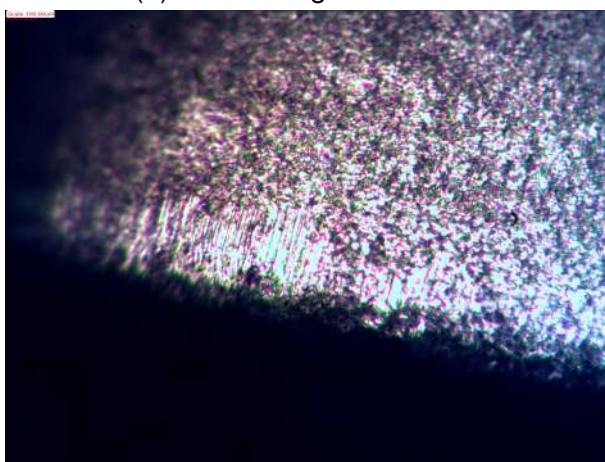
Figura 67: Imágenes de la herramienta tomadas con el microscopio



(a) Borde desgastado 100x

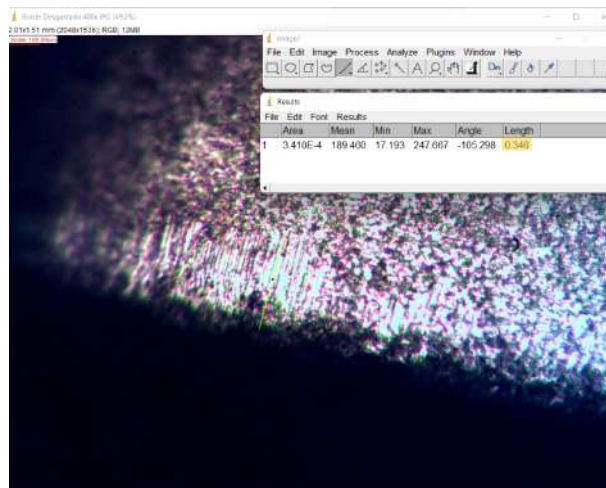


(b) Borde desgastado 200x



(c) Borde desgastado 400x

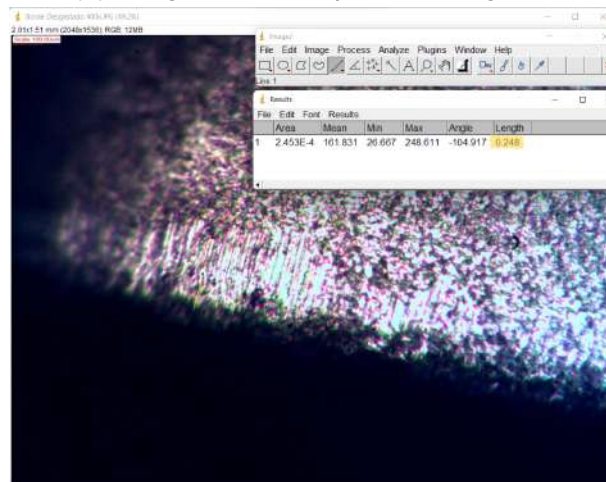
Figura 68: Imágenes del flanco de la herramienta tomadas con el microscopio



(a) Longitud del mayor desgaste observado



(b) Longitud de otro pico de desgaste



(c) Longitud del menor desgaste observado

Figura 69: Medición del desgaste mediante Image J de la prueba experimental

En la Figura 70, se presenta la viruta obtenida como resultado del proceso de me-

canizado. Al igual que en el desbaste grueso, se puede apreciar que la mayoría de las virutas son del tipo 3, es decir, tubulares y largas. Debido a la pequeña profundidad de corte, estas virutas son delgadas y presentan un aspecto brillante característico de los aceros de este tipo.

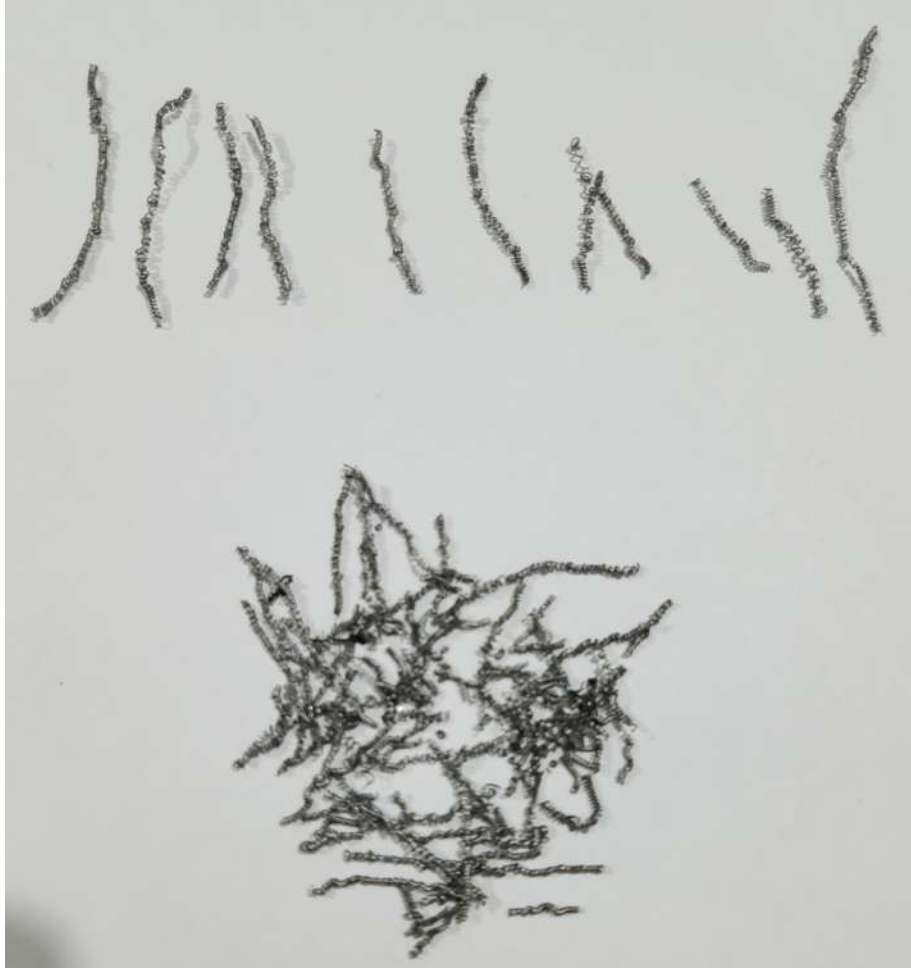


Figura 70: Viruta obtenida del cilindrado

Además, se llevó a cabo un ensayo de dureza en la pieza de trabajo con el objetivo de verificar que el material seleccionado cumple con las especificaciones indicadas en el catálogo [6]. En dicho documento se especifica que la dureza del material 12L14 es de 163 HB (Dureza Brinell) como puede observarse en la Figura 13

Para el ensayo, se utiliza un durómetro de la marca Wolpert, propiedad de la empresa Cym Materiales S.A. Dicho durómetro utiliza el método de dureza Brinell y permite aplicar cargas de 3000 kg, 1000 kg, 750 kg, 500 kg y 250 kg.

Una vez obtenida la referencia de dureza del material, se prosigue a determinar la bolilla que se utilizara para realizar la huella correspondiente en el material. De acuerdo con la tabla mostrada en la Figura 72, se determinó que para una dureza de 163HB se debe utilizar una bolilla de diámetro de 4,70 mm.

Previamente a la medición de dureza, se procedió a cortar y pulir la barra de manera que quede una superficie plana. Además, se verifica que la superficie este correcta-

mente pulida y libre de defectos. También resulta importante comprobar que el espesor de la pieza sea tal que la indentación no afecte a la cara opuesta de la pieza y que la carga sea aplique de forma perpendicular a la superficie y lejos de los bordes de la misma.

Una vez completadas estas operaciones, se llevó a cabo el ensayo de dureza utilizando una bolilla de diámetro de 4,70 mm y una carga de 750 kgf durante 30 segundos.

Los resultados del ensayo de dureza indicaron que la dureza obtenida es exactamente la misma que la mencionada en el catálogo, es decir, 163 HB. En la Figura 71 puede observarse la indentación producto del ensayo de dureza.



Figura 71: Indentación producto del ensayo de dureza en la pieza de trabajo

**EQUIVALENCIAS ENTRE DUREZAS BRINELL, ROCKWELL, VICKERS Y
SHORE Y LA RESISTENCIA A LA TRACCIÓN**

Brinell Diámetro Huella	Brinell Dureza HB	Rockwell Dureza Ha	Rockwell Dureza HRb	Rockwell Dureza HRC	Vickers Dureza HV	Shore	Resistencia a la tracción Kg/mm ²
2.35	682	64.0	-	65	885	91.0	232.9
2.40	652	63.0	-	63	820	87.2	221.5
2.45	627	61.5	-	61	765	84.8	213.5
2.5	600	60.5	-	59	633	76.5	188.7
2.55	578	79.5	-	59	717	81.5	204.0
2.60	555	79.0	120	57	675	78.5	195.1
2.65	534	78.0	119	54	598	73.5	181.3
2.70	514	77.0	119	52	567	71.0	174.9
2.75	495	76.5	117	51	540	68.5	168.0
2.80	477	75.5	117	49	515	66.7	162.2
2.85	461	74.4	116	48	494	65.0	157.0
2.90	444	73.5	115	46	472	63.0	150.6
2.95	429	73.0	115	45	454	61.0	145.6
3.00	415	72.5	114	44	437	59.0	140.0
3.05	401	71.5	113	42	420	57.2	136.0
3.10	388	71.0	112	41	404	55.8	132.0
3.15	375	70.5	112	40	389	54.0	127.5
3.20	363	70.0	110	39	375	52.2	123.4
3.25	352	69.5	110	38	363	50.5	120.0
3.30	341	68.5	109	36	350	49.2	115.9
3.35	331	68.0	109	35	339	48.0	112.4
3.40	321	67.5	108	34	327	46.7	109.1
3.45	311	67.0	108	33	316	45.2	105.6
3.50	302	66.5	107	32	305	44.5	102.7
3.55	293	66.0	106	31	296	43.2	99.6
3.60	285	65.5	105	30	287	42.0	96.9
3.65	277	65.0	104	29	279	41.0	94.2
3.70	269	64.5	104	28	270	40.0	91.5
3.75	262	64.0	103	27	263	39.2	89.1
3.80	255	63.0	102	25	256	38.5	86.7
3.85	248	62.5	102	24	248	37.5	84.3
3.90	241	62.0	100	23	241	36.5	81.9
3.95	235	61.5	100	22	235	35.7	79.9
4.00	229	61.0	99	21	229	35.0	77.9
4.05	223	60.5	98	20	223	34.0	75.8
4.10	217	-	97	18	217	33.0	73.8
4.15	212	-	96	17	212	32.5	72.1
4.20	207	-	96	16	207	32.0	70.4
4.25	202	-	95	15	202	31.2	68.7
4.30	197	-	94	14	197	30.2	67.0
4.35	192	-	93	13	192	29.5	65.3
4.40	187	-	92	11	187	29.0	63.6
4.45	183	-	91	10	183	28.5	62.2
4.50	179	-	90	9	179	28.0	60.9
4.55	174	-	89	7	174	27.5	59.2
4.60	170	-	88	6	170	26.5	57.8
4.65	166	-	87	4	166	25.5	56.3
4.70	163	-	86	3	163	25.0	55.4
4.75	159	-	85	1	159	24.5	54.0
4.80	156	-	84	0	156	24.0	53.0
4.85	153	-	82	-	153	23.0	52.0
4.90	149	-	81	--	149	23.0	50.7
4.95	146	-	80	--	146	22.0	49.6
5.00	143	-	79	-	143	22.0	48.6
5.05	140	-	78	-	140	21.0	47.6
5.10	137	-	77	-	137	21.0	46.6
5.15	134	-	76	-	134	21.0	45.6
5.20	131	-	74	-	131	20.0	44.5
5.25	128	-	73	-	128	20.0	43.5
5.30	126	-	72	-	126	-	42.8
5.35	124	-	71	-	124	-	42.2
5.40	121	-	70	-	121	-	41.2
5.45	118	-	69	-	118	-	40.1
5.50	116	-	68	-	116	-	39.4
5.55	114	-	67	-	114	-	38.8
5.60	112	-	66	-	112	-	38.0
5.65	109	-	65	-	109	-	37.1
5.70	107	-	64	-	107	-	36.4
5.75	105	-	62	-	105	-	35.7
5.80	103	-	61	-	103	-	35.0

Figura 72: Tabla de referencia para realizar el ensayo de dureza

4. Capítulo 4: Conclusiones y Recomendaciones

Tras realizar el proyecto de mecanizado del acero de corte libre y analizar los resultados obtenidos, se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- Limitaciones en el equipo de mecanizado: Se constata que las velocidades y potencias utilizadas en el torno disponible resultaron ser insuficientes para el material utilizado, que es un acero de corte libre conocido por su capacidad de mecanizado rápido en grandes volúmenes de producción. Las velocidades de trabajo distan considerablemente de las sugeridas por los fabricantes de herramientas para ese material y consecuentemente, de las velocidades óptimas de mecanizado.
- Desgaste de flanco y filo de aportación: Se logró observar un desgaste de flanco durante el proceso de mecanizado, lo cual era esperado y es consecuente con el estudio bibliográfico al respecto. Sin embargo se identificó la presencia de un filo de aportación, esto es indicio que las condiciones de corte no fueron óptimas, fundamentalmente es un fenómeno que se puede dar cuando las velocidades de corte son muy bajas respecto de las recomendadas para el material.
- Necesidad de ajustar los parámetros de corte: Los resultados experimentales indican claramente la necesidad de realizar ajustes en las velocidades y potencias utilizadas durante el proceso de mecanizado. Dado que el acero de corte libre se caracteriza por su mecanizado rápido, es esencial contar con un equipo capaz de alcanzar las velocidades y potencias adecuadas para aprovechar al máximo estas propiedades, lograr una maquinabilidad óptima y evitar otros mecanismos de desgaste como el producido por el filo de aportación.

En resumen, los resultados obtenidos en la prueba experimental revelan que las condiciones de corte utilizadas en el torno disponible no son suficientes para lograr un mecanizado eficiente para estas aleaciones. A pesar de observarse desgaste de flanco el filo de aportación apunta hacia la necesidad de ajustar los parámetros de corte y utilizar un equipo más adecuado para obtener una maquinabilidad óptima y aproximarse a las condiciones de mecanizado que se utilizan a nivel industrial para este tipo de aleaciones.

Más allá de las limitaciones técnicas mencionadas, se considera que el procedimiento de ensayo de maquinabilidad para condiciones de material limitadas es adecuado al utilizar los parámetros de corte y el equipo adecuado. Esta afirmación se basa en el hecho de que se pudo registrar y medir correctamente el desgaste de flanco esperado utilizando el software y los métodos mencionados.

A pesar que el torno disponible presentó restricciones en cuanto a velocidades y potencias, el hecho de lograr detectar y medir el desgaste de flanco indica que el procedimiento de ensayo empleado es aplicable una vez subsanada esta limitación.

En estas condiciones sería posible aplicar el procedimiento descrito para poder analizar comparativamente la maquinabilidad del acero SAE 1212 y SAE 12L14 de modo de establecer la influencia del plomo como aleante sobre esta propiedad. Sobre esta base se espera poder estudiar aleaciones alternativas que permitan el reemplazo del plomo sin perder sus capacidades a la hora de ser mecanizado.

En base a los resultados y conclusiones obtenidos, se proponen las siguientes recomendaciones para futuros proyectos de investigación que trabajen en el mismo campo:

- Utilizar velocidades industriales de corte: Es fundamental utilizar las velocidades de corte sugeridas por los fabricantes de herramientas para el material específico utilizado en el mecanizado de forma que los resultados se asemejen a la realidad de la industria y los mecanismos de desgaste obtenidos reflejen los presentes.
- Contar con una lupa y/o microscopio con buena resolución digital: Se recomienda utilizar una herramienta de observación de alta calidad para examinar y medir con precisión el desgaste durante el proceso de mecanizado. Esto permitirá una evaluación más detallada y precisa del desgaste de flanco y otros fenómenos relacionados, lo que proporcionará información valiosa para el análisis posterior. La portabilidad de este elemento es de suma importancia para tomar las mediciones en el mismo lugar que se realiza el mecanizado y así poder eficientizar la toma de datos.
- Realizar mediciones del desgaste durante el mecanizado: Es necesario establecer la cantidad y periodicidad de la toma de datos del desgaste durante el proceso de cilindrado cuando se efectúa la prueba de modo de obtener información suficiente pero no encarecer más de lo necesario el costo del ensayo por el tiempo requerido. Estas mediciones proporcionarán los datos necesarios para generar las gráficas y obtener un análisis detallado sobre el desempeño de la herramienta y su vida útil en condiciones específicas. De la calidad de los datos dependerá la de los resultados.
- Ajustar los parámetros de corte: Es fundamental ajustar los parámetros de corte, como las velocidades y las potencias utilizadas, para lograr un mecanizado eficiente. Si los resultados experimentales indican la presencia de un filo de aportación o un desgaste de flanco inusual, es necesario revisar y optimizar estos parámetros.

Referencias

- [1] VILCHES, FJ TRUJILLO. *Análisis paramétrico del mecanizado en seco de la aleación UNS A97075*. PhD thesis, PhD Thesis, University of Málaga, 2013.
- [2] Procesos de fabricación UNIVERSIDAD NACIONAL DE MAR DEL PLATA, Grupo Tecnología Mecánica. Teoría del corte de metales.
- [3] FURNO, M. EMILIA; SOSA, DANIEL A. *Diseño e implementación de ensayos de maquinabilidad de fundición de grafito esferoidal austemperada con ferrita libre*. PhD thesis, Facultad de ingeniería, Universidad Nacional de Mar Del Plata, Marzo 2018.
- [4] Machinability of carbon and alloy steels. In *The Making, Shaping and Treating of Steel*, chapter 52, pages 1465–1488. THE AISE STEEL FOUNDATION.
- [5] LUIZ, N AND MACHADO, ALISSON. Development trends and review of free-machining steels. *Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers Part B-journal of Engineering Manufacture - PROC INST MECH ENG B-J ENG MA*, 222:347–360, 10 2008.
- [6] ARCELORMITTAL ACINDAR. *Catálogo de Productos para la Industria*.
- [7] ISO. *ISO 3685:1993(E) - Tool-life testing with single-point turning tools*, 1993.
- [8] PAGLIANO, VICTOR; MARTINEZ KRAHMER, DANIEL; MACEIRA, GUSTAVO; PRIETO, DANIEL. Desarrollo de aceros de corte libre correlacionados con análisis de maquinabilidad. *Jornadas de Desarrollo e Innovación*, Octubre 2000.
- [9] CASTELLANOS DIAZ, R.; MARTINEZ KRAHMER, D. Evaluación de maquinabilidad por torneado de un acero sae 1020 fabricado en colombia. *Congreso SAM/CONAMET*, Octubre 2009.
- [10] HANDBOOK, ASM. Vol. 16: Machining, ASM international. *Materials Park, OH*, 1995.
- [11] SCHULTHEISS, FREDRIK AND WINDMARK, CHRISTINA AND SJÖSTRAND, STEFAN AND RASMUSSEN, MAGNUS AND STÅHL, JAN-ERIC. Machinability and manufacturing cost in low-lead brass. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 99(9):2101–2110, 2018.
- [12] Escuela de Ingeniería Mecánica UNIVERSIDAD NACIONAL DE ROSARIO, Cátedra de Tecnología de la Fabricación. Apunte de mecánica del corte.
- [13] CÁTEDRA DE TECNOLOGÍA DE LA FABRICACIÓN, EIM FCEIA UNR. Mecánica del corte, 2018.
- [14] GRUPO TECNOLOGÍA MECÁNICA - PROCESOS DE FABRICACIÓN. Teoría del corte de metales.

- [15] YASHIN, YU. D.; SOLDATKIN, S.A.; CHESNOKOV, P. YU. High-machineability steels. *Metallurgist*, 49:236–241, 2005.
- [16] Escuela de Ingeniería Mecánica UNIVERSIDAD NACIONAL DE ROSARIO, Cátedra Ciencia de los Materiales. Clasificación de los aceros, 2017.
- [17] CAJERO MEDINA, DANTE JESÚS; MELCHOR LEAL, JOSÉ MARTÍN. Efectos del recocido subcrítico en la dureza y tamaño de grano del acero aisi 12l14. Tesis de maestría*, CIATEQ, A. C. Centro de Tecnología Avanzada, Mayo 2022.
- [18] BERNSMANN, G. AND BLEYMEHL, M. AND EHL, R. AND HASSLER, A. Making of free cutting steels with additions of lead, bismuth, tellurium, selenium and tin. *Stahl und Eisen*, 121:87–92, 02 2001.
- [19] SOUSA, MARCELO DO NASCIMENTO. Aplicação de modelos estatísticos para verificar a influência dos elementos residuais (cr, ni e cu) na usinabilidade de aços de corte-fácil. Dissertação (mestrado em engenharias), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil, 2006.
- [20] SÍMARO, O AND DUTARI, LUIS. The production of free cutting and improved machinability steels, with and without lead additions, at acindar's steelmaking shop. 10 2001.
- [21] N Evangelista Luiz and Á R Machado. Development trends and review of free-machining steels. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 222(2):347–360, 2008.
- [22] Gert Bernsmann, Mark Bleymehl, Robert Ehl, and Albert Hassler. The making of free cutting steels with additions of lead, bismuth, tellurium, selenium and tin. *Stahl und Eisen(Germany)*, 121(2):87–91, 2001.