

**EVALUACIÓN DE LAS TEMPERATURAS GENERADAS EN EL PROCESO DE
TORNEADO EN SECO**

URIEL ALBEIRO NOGUERA PEÑA



UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA
SANTIAGO DE CALI

**EVALUACIÓN DE LAS TEMPERATURAS GENERADAS EN EL PROCESO DE
TORNEADO EN SECO**

URIEL ALBEIRO NOGUERA PEÑA

Proyecto de grado presentado para optar el título de
Ingeniero Mecánico

DIRECTOR:
JOHN JAIRO CORONADO M.
INGENIERO MECÁNICO, PH.D

CO-DIRECTOR:
SARA AIDA RODRIGUEZ P
INGENIERA MECÁNICA, PH.D



UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA
SANTIAGO DE CALI
2014

Nota de aceptación:

Aprobado por el comité de trabajo de grado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad del Valle, para optar el título de Ingeniero Mecánico.

Firma del evaluador

Firma del evaluador

Santiago de Cali, 19 de agosto del 2014

AGRADECIMIENTOS

A Dios le agradezco por la salud, por la fuerza, voluntad y persistencia para lograr un escalón más en mi vida y seguir adelante.

De la misma manera a mis padres Alina Peña y Albeiro Noguera por su apoyo incondicional en las adversidades, amor y confianza para lograr mi carrera.

A mis hermanos por su compañía, amistad y apoyo en momentos de dificultades.

A mis directores John Jairo Coronado y Sara Aida Rodríguez como directores, profesionales y amigos que depositaron su confianza, orientación y me hicieron parte de su grupo de trabajo que mediante su conocimiento se logró superar muchos obstáculos, muchas gracias.

A mis compañeros que de uno u otra manera fueron el pilar para cumplir cada una de las metas y sobrepasar obstáculos y adversidades que sin ellos no lo hubiese logrado, como son Octavio Andrés Castaño, Juan Carlos Chamorro, Gregory Zetty, Javier Caicedo, Diego Ararat, Javier Carmona, Juan Camilo Chávez, Nicolas Rojas, Carlos Luna, entre otros. A todos ellos muchas gracias por su apoyo.

Al profesor Arlex Leyton por sus importantes aportes en el desarrollo de este proyecto.

Al ingeniero Guillermo Perea por su valioso aporte para cumplir parte de los objetivos propuestos en esta tesis.

A los señores ingenieros y técnicos como son, Orlando Paz, Ernesto, Vladimir y Edison del laboratorio de procesos de manufactura que gracias a sus conocimientos prácticos se desarrolló los objetivos y se consiguió aprender más del campo técnico en el transcurso.

A Brayan Espinosa por su colaboración en los aspectos técnicos, su compañía y amistad en el desarrollo de esta tesis.

A todos mis amigos y conocidos que estuvieron a mí alrededor apoyándome incondicionalmente de una u otra forma.

A todas estas personas muchas gracias por este logro.

CONTENIDO

RESUMEN.....	11
1 INTRODUCCION.....	12
2 OBJETIVOS.....	13
2.1 OBJETIVO GENERAL	13
2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	13
3 REVISIÓN DE LA LITERATURA.....	14
3.1 MARCO TEÓRICO	16
3.1.1 TORNEADO.....	16
3.1.2 HERRAMIENTA DE CORTE	18
3.2 MARCO TEÓRICO ESTADÍSTICO	22
3.2.1 ELECCIÓN DEL TAMAÑO DE MUESTRA	22
3.2.2 DISEÑO FACTORIAL GENERAL	23
3.2.3 ANÁLISIS UNIVARIANTE DE LA VARIANZA-ANOVA	24
3.2.4 PRUEBAS POST-ANOVA.....	24
3.2.5 VERIFICACIÓN DE SUPUESTOS	24
3.3 ANTECEDENTES.....	26
4 MATERIALES Y MÉTODOS	28
4.1 MATERIALES.....	28
4.1.1 ACERO SAE 1020	28
4.1.2 HERRAMIENTA DE CORTE (INSERTOS).....	28
4.1.3 MAQUINA HERRAMIENTA PARA EL PROCESO	29
4.2 METODOS	30
4.2.1 CONSTRUCCIÓN, IMPLEMENTACIÓN Y CALIBRACIÓN DE JUNTA ROTATIVA.....	31
4.2.2 IMPLEMENTACIÓN DE TERMOCUPLA EN PORTA INSERTOS	35
4.2.3 SELECCIÓN DE PARAMETROS DE CORTE.....	36
4.2.4 IMPLEMENTACIÓN GENERAL PARA EL MECANIZADO Y AQUISICION DE DATOS	36
4.2.5 RUGOSIDAD	39
4.2.6 METALOGRAFIA	40
4.2.7 METALOGRAFIA DESPUES DEL MECANIZADO	40

4.2.8 RECUBRIMIENTO DE NIQUEL	41
4.2.9 MEDICION DEL DESGASTE DEL FLANCO DE LA HERRAMIENTA DE CORTE	41
4.3 METODOLOGIA ESTADISTICA.....	43
4.3.1 ASPECTOS BÁSICOS DEL EXPERIMENTO	43
4.3.2 PRUEBA POST-ANOVA	49
5 RESULTADOS	50
5.1 RUGOSIDAD	50
5.1.1 RUGOSIDAD ANTES DEL MECANIZADO	50
5.1.2 RUGOSIDAD DESPUÉS DEL MECANIZADO	51
5.2 METALOGRAFIA	51
5.2.1 METALOGRAFIA ANTES DEL MECANIZADO	51
5.2.2 METALOGRAFIA DESPUES DEL MECANIZADO	52
5.3 TEMPERATURAS EN EL MECANIZADO	53
5.4 EFECTO DE LA VELOCIDAD DE CORTE Y PROFUNDIDAD DE CORTE EN LAS TEMPERATURAS GENERADAS EN HERRAMIENTA Y PIEZA.....	54
5.4.1 TEMPERATURAS EN HERRAMIENTA Y PIEZA CON RESPECTO A LA PROFUNDIDAD DE CORTE	54
5.4.2 TEMPERATURA EN LA HERRAMIENTA Y PIEZA CON RESPECTO A LA VELOCIDAD DE CORTE	55
5.5 DESGASTE DE LA HERRAMIENTA	56
5.5.1 RELACIÓN DE LAS TEMPERATURAS CON EL DESGASTE Y LA RUGOSIDAD	59
5.6 VALORES GENERALES OBTENIDOS.....	60
5.7 RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO ACERCA DEL EFECTO DE LA TEMPERATURA.....	61
6 CONCLUSIONES	62
7 RECOMENDACIONES.....	64
8 ESTUDIOS FUTUROS.....	65
9 bBIBLIOGRAFIA.....	66

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. METODOLOGÍA PARA LA MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA EN EL PROCESO DE TORNEADO [3].	15
FIGURA 2. ESQUEMA DEL PROCESO DE TORNEADO [6].	16
FIGURA 3. MECANISMOS DE DESGASTE. 1) ABRASIÓN, 2) DIFUSIÓN, 3) OXIDACIÓN, 4) FATIGA Y 5) ADHESIÓN. MECANISMOS DE DESGASTE DE HERRAMIENTA EN FUNCIÓN T (°C) [10].	19
FIGURA 4. ZONAS TÉRMICAS EN EL CORTE [5].	19
FIGURA 5. DISTRIBUCIÓN TÍPICA DE TEMPERATURAS EN ZONA DE CORTE [11].	20
FIGURA 6. ESQUEMA DEL SISTEMA DE MONITOREO [8].	21
FIGURA 7. IMÁGENES DE HERRAMIENTA DE CORTE MEDIANTE CÁMARA TERMOGRÁFICA D. SOLER MALLO ET AL [12].	22
FIGURA 8. FICHA TÉCNICA DEL ACERO UTILIZADO [24].	28
FIGURA 9. PROCESO DE ELABORACIÓN DE PROBETAS CILÍNDRICAS DE ACERO SAE 1020.	28
FIGURA 10. DIMENSIONES DEL INSERTO [25].	29
FIGURA 11. TORNO PINACHO A.47, DE OPERACIÓN MANUAL.	30
FIGURA 12. METODOLOGÍA PARA LA EJECUCIÓN DEL PROYECTO.	30
FIGURA 13. JUNTA ROTATIVA COMERCIAL [27]	31
FIGURA 14. JUNTA ROTATIVA COMERCIAL [27]	31
FIGURA 15. ELEMENTOS DE LA JUNTA ROTATIVA.	32
FIGURA 16. JUNTA ROTATIVA ENSAMBLADA.	33
FIGURA 17. CONEXIÓN DE TEMOCUPLAS EN JUNTA ROTATIVA.	33
FIGURA 18. ESQUEMA DE CALIBRACIÓN DE TEMPERATURA PARA EL DISPOSITIVO.	34
FIGURA 19. ENTORNO GRÁFICO DEL PROGRAMA PARA LA ADQUISICIÓN DE LOS DATOS, DISEÑADO EN LABVIEW [28].	35
FIGURA 20. PORTA INSERTOS CON TERMOCUPLA INCRUSTADA.	36
FIGURA 21. ESQUEMA DEL MONTAJE REALIZADO EN LA PIEZA DE TRABAJO.	37
FIGURA 22. PIEZA DE TRABAJO EN EL TORNO.	38
FIGURA 23. PORTA INSERTOS EN TORNO.	38
FIGURA 24. TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS NATIONAL INSTRUMENT NI USB-6210.	39
FIGURA 25. A) VISTA DE MONTAJE EN LA HERRAMIENTA, B) VISTA DEL MONTAJE EN EL COMPUTADOR.	39
FIGURA 26. RUGOSIMETRO MITUTOYO SJ-201P.	40
FIGURA 27. INSERTOS TIPO TPUN COMO HERRAMIENTAS DE CORTE.	42
FIGURA 28. A LADO DERECHO, DESGASTE DE FLANCO DE HERRAMIENTA. A LADO IZQUIERDO CORTE EN SECCIÓN PARA UNA VISTA DE LA PROFUNDIDAD DEL CRÁTER [31].	42
FIGURA 29. CURVA DE POTENCIA PARA DISEÑO FACTORIAL DE DOS NIVELES.	45
FIGURA 30. MICROESTRUCTURA DE ACERO SAE 1020 ANTES DE MAQUINADO. CON ZOOM DE 250X.	51
FIGURA 31. METALOGRAFÍA A 400X DE CADA CONDICIÓN DEL MATERIAL LUEGO DEL MECANIZADO A) VC=90M/MIN, PC=1MM B) VC=120M/MIN, PC=1MM C) VC=90M/MIN, PC=2MM D) VC=120M/MIN, PC=2MM	52
FIGURA 32. TEMPERATURAS OBTENIDAS PARA CADA CONDICIÓN DE MECANIZADO.	53
FIGURA 33. TEMPERATURA DE LA PIEZA DURANTE EL CORTE A 0.15 MM/REV Y A 1 Y 3 MM DE PROFUNDIDAD [18].	54
FIGURA 34. EFECTO DE LA PROFUNDIDAD DE CORTE CON LAS TEMPERATURAS MÁXIMAS EN CADA CONDICIÓN.	55
FIGURA 35. EFECTO DE LA VELOCIDAD DE CORTE CON LAS TEMPERATURAS MÁXIMAS EN CADA CONDICIÓN.	55

FIGURA 36. CONDICIÓN $V_c=120\text{M/MIN}$ Y $P_c=2\text{MM}$. (A) DESGASTE DEL FLANCO, (B) FORMACIÓN DE CRÁTER EN CARA SUPERIOR.....	56
FIGURA 37. A) ANCHO DE FLANCO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO DE CORTE BAJO CORTE EN SECO, B) VIDA DE LA HERRAMIENTA BAJO EL CORTE CON FLUIDO DE CORTE Y SECO [34].	57
FIGURA 38. DESGASTE DE LA HERRAMIENTA CON $V_c=120\text{M/MIN}$, $P_c=1\text{MM}$. A) VISTA LATERAL FLANCO, B) CARA SUPERIOR CRÁTER.....	58
FIGURA 39. DESGASTE DE LA HERRAMIENTA CON $V_c=90\text{M/MIN}$, $P_c=2\text{MM}$. A) VISTA LATERAL FLANCO, B) CARA SUPERIOR CRÁTER.....	58
FIGURA 40. DESGASTE DE LA HERRAMIENTA CON $V_c=90\text{M/MIN}$, $P_c=1\text{MM}$. A) VISTA LATERAL FLANCO, B) CARA SUPERIOR CRÁTER.....	58
FIGURA 41. RELACIÓN DEL DESGASTE DE LA HERRAMIENTA DE CORTE CON LAS TEMPERATURAS OBTENIDAS..	59
FIGURA 42. RUGOSIDAD SUPERFICIAL EN LA PIEZA DE TRABAJO CON RESPECTO A LAS TEMPERATURAS MÁXIMAS GENERADAS.	60

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. ANÁLISIS DE VARIANZA DEL ANOVA	24
TABLA 2. PARTES QUE COMPONEN LA JUNTA ROTATIVA.....	32
TABLA 3. TEMPERATURAS DE CALIBRACIÓN DE JUNTA ROTATIVA.....	35
TABLA 4. PARÁMETROS DE MECANIZADO.	36
TABLA 5. VARIABLES DE INTERÉS Y SUS MEDIDAS.....	43
TABLA 6. ALEATORIZACIÓN DE LAS RÉPLICAS.	44
TABLA 7. POTENCIA Y TAMAÑO DE MUESTRA.....	45
TABLA 8. ANÁLISIS DE VARIANZA, DISEÑO FACTORIAL DE 2 FACTORES.....	47
TABLA 9. PARÁMETROS DE RUGOSIMETRO.	50
TABLA 10. VALORES DE RUGOSIDAD PARA CADA REPLICA.	50
TABLA 11. RUGOSIDADES PROMEDIO POR CADA CONDICIÓN ESTABLECIDA.....	51
TABLA 12. VALORES OBTENIDOS EN LAS PRUEBAS.	60
TABLA 13. VARIANZA DE LOS EXPERIMENTOS.	61

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A.....	70
--------------	----

RESUMEN

En este trabajo de investigación se evaluaron las temperaturas generadas en el proceso de torneado, tanto en la pieza como en la herramienta de corte, además se midió el desgaste de la herramienta y los cambios microestructurales y de rugosidad de la pieza. Los parámetros de mecanizado usados en los experimentos fueron, velocidad de corte 90m/min (800 rpm) y 120m/min (1050 rpm), profundidad de corte de 1mm y 2mm y el avance se mantuvo constante en 2mm/rev. Se diseñó y construyó una junta rotativa para medir las temperaturas, se usó un sistema de adquisición de datos y se usaron termopares que se alojaron en la pieza y en la herramienta. Los resultados fueron analizados estadísticamente con un diseño factorial de dos factores y un análisis de varianza ANOVA. Las mayores temperaturas se obtuvieron a la velocidad de corte de 120m/min y profundidad de corte de 2mm (temperatura en el inserto de 135,9°C y en la pieza de 90,2°C). Bajo los mismos parámetros se encontró desgaste de flanco con un ancho de 0,3mm en la zona VB_Bmax , parámetro el cual está regido por la norma ISO 3685, siendo este el valor máximo de desgaste de herramienta obtenido en las pruebas. Con los parámetros de 120m/min y 2mm también se encontró deformación plástica en la microestructura, y la vida de la herramienta fue menor. Mientras que para una velocidad de 90m/min y profundidad de 2mm el nivel de rugosidad fue el mayor, con un valor de $2,32\mu m$.

Palabras Clave: Torneado, temperaturas, junta rotativa, rugosidad, termocuplas, adquisición de datos.

1 INTRODUCCION

El torneado es un proceso de corte y de arranque de material en forma de viruta, donde se generan temperaturas altas por la fricción entre la herramienta y la pieza de trabajo. Con la medición de la temperatura sobre la pieza al realizar el proceso de torneado, se puede evaluar el efecto que tiene la velocidad de corte y la profundidad de corte, con el deterioro de la herramienta y el acabado superficial de la pieza [1].

Con la disipación de calor se puede evitar el desgaste prematuro de la herramienta de trabajo, de igual manera se puede dar protección a la pieza que se esté trabajando, para que no sufra corrosión u oxidación, para esto se hace uso de fluidos como método de enfriamiento [2]. Aunque el uso de refrigerante en muchos procesos sobre los resultados son similares en húmedo o seco y significa un alto costo en la industria metalmecánica por su uso, también su reciclaje cuando este después de varios usos finaliza su vida útil y al eliminar el refrigerante en los procesos de mecanizado produce una disminución en los riesgos de la salud en el personal que esta interactuando.

Siendo así, en este trabajo se evalúa la temperatura registrada en un proceso de torneado en seco, es decir que no se utilizará un método de enfriamiento. Para medir la temperatura que se genera en el momento del mecanizado se ve la necesidad de un dispositivo que de acuerdo a esta condición permita registrar datos en tiempo real, recurriendo a aparatos que se encuentran en el mercado pero con un coste entre US\$300 y US\$400 y que demandan de mucho tiempo de espera para poder adquirir el artículo. Teniendo en cuenta estas limitaciones se desarrolló un dispositivo giratorio que estará acoplado a la pieza de trabajo el cual ayuda a la lectura de datos de temperatura, por medio de una tarjeta de adquisición de datos se lleva a un ordenador y se obtendrá una lectura de la temperatura en la pieza de trabajo [3].

Usando la información de los datos de temperatura recolectada en la piezas de acero SAE 1020 se realizó un diseño factorial completo de dos factores de efectos fijos, los factores fueron, la velocidad de corte medida en (m/min) a dos niveles (90 m/min y 120 m/min) y la profundidad de corte medida en (mm) a dos niveles (1mm y 2mm), se realizó un análisis de varianza ANOVA para los tratamientos de este experimento [4].

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Identificar y analizar las temperaturas generadas en la pieza y la herramienta en el proceso de torneado en seco al variar los parámetros de corte.

2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

Diseñar una metodología para la adquisición de los datos de temperatura que permitan establecer los campos de temperatura en las piezas y herramientas durante el corte.

Cuantificar el efecto de la velocidad de corte en al menos dos niveles sobre la temperatura máxima y el gradiente de temperatura generado en la pieza y la herramienta.

Cuantificar el efecto de la profundidad de corte en al menos dos niveles sobre la temperatura máxima y el gradiente de temperatura generado en la pieza y la herramienta.

Correlacionar el desgaste de la herramienta con las temperaturas generadas en el corte.

Caracterizar la superficie de la pieza mecanizada y correlacionar los cambios de rugosidad y microestructura generados con los campos de temperatura.

3 REVISIÓN DE LA LITERATURA

En lo relacionado con las temperaturas generadas en el mecanizado, algunos autores investigan la variación de éstas en la influencia en los materiales, el desgaste y vida de la herramienta en sus flancos de corte. Todo esto dependiendo de las características micro estructural del material. De acuerdo a esta información se han seleccionado referencias a continuación discutidas.

Hay investigaciones que realizan el análisis de la generación de calor durante el corte, examinando las zonas donde se encuentra localizada la temperatura y determinan tres zona donde se encuentra un mayor incremento de ésta, el autor [5] cita a (*AMS Handbook, 1995*). La primera, la zona de cizallamiento en la que se produce un deslizamiento de planos internos del material de la pieza mecanizada, la segunda en la cara de desprendimiento de la herramienta entre el rozamiento de ésta y la viruta, y la tercera en la cara de incidencia de la herramienta debido al rozamiento generado entre esta y la superficie ya mecanizada.

Otra manera de analizar la variación de las temperaturas de corte es, por métodos de elementos finitos para ubicar la concentración de las temperaturas y el incremento de estas que se obtiene teniendo en cuenta las velocidades de corte y la fricción aplicada para cada prueba [6]. Concluyendo que a medida que se aumenta la velocidad de corte, la temperatura en el entorno va aumentando y a medida que se aumenta el coeficiente de fricción las temperaturas son mayores. También se tiene en cuenta procesos matemáticos que a raíz de la teoría, el comportamiento de los materiales y sus propiedades asociadas a estos, nos puede brindar aproximaciones en la predicción de temperaturas; la variación en las temperaturas, es inducida por las deformaciones plásticas en un intervalo de tiempo Δt , está dado por la ecuación:

$$\Delta\theta = \frac{\sigma \cdot \varepsilon \cdot \eta \cdot \Delta t}{Jc\rho \cdot 100}$$

Dónde:

J : Factor de equivalencia térmica de calor.

η : Porción de energía de deformación plástica que se transforma en calor.

c : Calor específico.

ρ : Densidad del material.

Por otra parte asume que el calor es transferido instantáneamente a los dos cuerpos en contacto. La ecuación de generación de calor en la zona de contacto es dada por:

$$Q^t = \frac{\tau_f u_y A_f \Delta t}{J}$$

Dónde:

A_f : Área de la superficie de fricción en el contacto herramienta viruta

τ_f : Tensión de fricción.

u_y : Componente de la velocidad tangencial de la viruta.

Estas ecuaciones se la usa para calcular el campo de temperatura resultante de la deformación plástica y de la interacción de la herramienta y la pieza, incluyendo condiciones de dispersión relacionadas con el trabajo mecánico [7], para el proceso de corte ortogonal para un acero AISI 1020 también se incluye un modelo de elementos finitos obteniendo valores de temperatura de la herramienta entre 659°C y 800°C y en la pieza entre 75°C y 80°C. Los resultados que se obtienen por los métodos mencionados permiten predecir la temperatura en la zona de corte y la herramienta, comparando esto con resultados de experimentos que se encuentran en la literatura y obteniendo efectos favorables.

Sabiendo que la temperatura de la interfaz de mecanizado juega un papel importante en el desgaste de la herramienta y en las posibles modificaciones de las propiedades de la pieza de trabajo, hay experimentos que están enfocados en el uso de termocuplas que se alojan en el material a mecanizar con la ayuda de una junta rotativa y el uso de una cámara térmica de infrarrojo para monitorear el proceso y dar soporte a las mediciones que efectúan las termocuplas [3], D. O 'Sullivan, Cotterell presentan en la Figura 1 el montaje que realizaron.

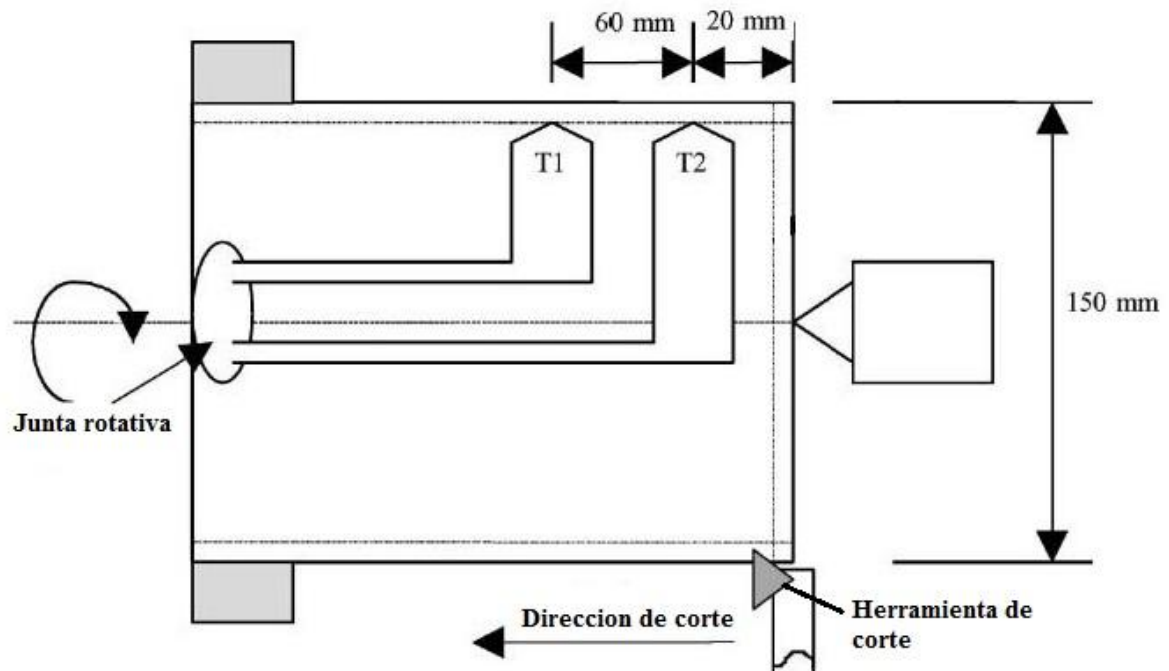


Figura 1. Metodología para la medición de la temperatura en el proceso de torneado [3].

Teniendo en cuenta que la obtención de temperatura mediante termopares requiere instrumentos adicionales que recolecten la información en tiempo real y se calibren de acuerdo a pérdidas o interferencias de señal. Flórez *et al* [8] desarrollaron una plataforma que monitorea, procesa y almacena en tiempo real las fuerzas y la temperatura de corte de un proceso de mecanizado, donde se destacan el acondicionamiento y la integración de

diferentes tipos de señales y la comunicación entre los diferentes software (*Matlab*, *Excel* y *DasyLab*). De estos experimentos se obtiene que un incremento en la velocidad de corte reduce tanto la fuerza de corte como la temperatura en la superficie maquinada. La reducción de temperatura se asocia a la alta tasa de remoción de material, y cabe destacar, que la temperatura evaluada muestra una alta sensibilidad frente a variación de los parámetros de corte.

3.1 MARCO TEÓRICO

Este proyecto estará centrado, en el mecanizado por desprendimiento de material y más concretamente en la evaluación de las temperaturas que se generan en este proceso, determinando así la influencia en el material mecanizado como en el desgaste de la herramienta.

El mecanizado es un proceso de remoción de material, mediante una herramienta de filo, a partir de un bloque de materia prima en revolución, para conseguir determinadas formas y tamaños según sea la conveniencia en la pieza. El material desprendido queda en forma de viruta [6].

3.1.1 TORNEADO

Es el proceso del cual se obtiene la geometría deseada mediante la combinación de los movimientos de giro de la pieza y desplazamiento de la herramienta de corte. Este tipo de procedimiento es específicamente eficiente para la obtención de geometrías de revolución por desprendimiento de viruta [6].

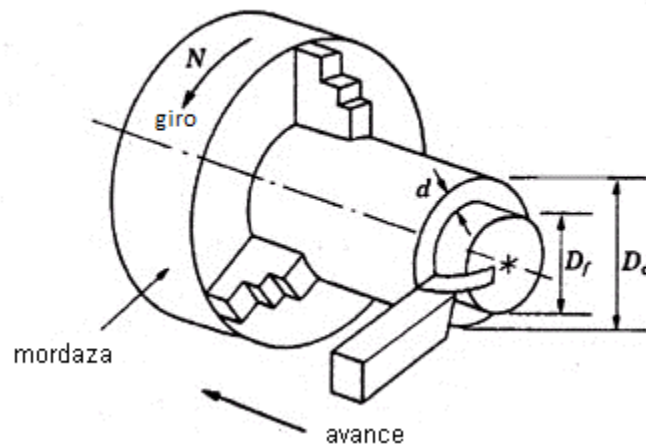


Figura 2. Esquema del proceso de torneado [6].

Para producir el arranque de viruta se deben llevar al cabo movimientos de una forma paralela en los cuales deben interactuar la herramienta y la pieza como se muestra en la Figura 2. Los tipos de movimiento son:

- **Movimiento de corte:** movimiento el cual desprende viruta mediante el giro de la pieza.
- **Movimiento de avance:** junto con el movimiento de corte se produce un desprendimiento continuo de viruta.
- **Movimiento de penetración:** establece la profundidad de pasada y por consiguiente el espesor de viruta desprendida.

Parámetros de corte

Son las magnitudes las cuales se varían en el proceso de torneado para realizar una adecuada remoción de material.

- **Velocidad de corte:** velocidad de la herramienta efectuada linealmente respecto a la pieza de trabajo en la dirección del movimiento corte. Las unidades de medida habitualmente están en m/min. Si esta velocidad es alta se obtendrá un desgaste más severo de la herramienta de corte. Para esto se deberá tener en cuenta los parámetros sugeridos en los catálogos de las herramientas según el material que se trabaje. Teniendo en cuenta lo nombrado se desarrolla una ecuación para determinar la velocidad de corte [9].

$$V_c = \pi \cdot N \cdot D / 1000$$

Dónde:

V_c = Velocidad de corte (m/min)

N = Revoluciones de la pieza en (rpm)

D = Diámetro de la pieza (mm)

Avance: es el desplazamiento de la herramienta expresada en (mm) por cada revolución de la pieza en (rpm). Conocidas estas dos se obtiene V_a que es velocidad de avance en mm/min [9].

$$V_a = a \cdot N$$

Dónde:

a : avance

N : velocidad de giro

- **Profundidad de corte:** profundidad de pasada en (mm). Mediante la penetración de corte (d) [9].

3.1.2 HERRAMIENTA DE CORTE

Una herramienta de corte posee uno o más filos cortantes. Estos filos sirven para remover material en forma de viruta como se muestra en la Figura 2. En este filo cortante está: la superficie de ataque o desprendimiento y el flanco o superficie de incidencia. La superficie de ataque es por donde la viruta que se forma al producirse el corte se desprende de la pieza. El flanco de la herramienta provee un claro entre la herramienta y la superficie de la pieza de trabajo ya mecanizada, de esta manera protege a la superficie de la abrasión que puede generar la superficie de trabajo.

3.1.2.1 Desgaste de la herramienta.

En la interacción de los distintos parámetros de corte en el mecanizado encontramos unos mecanismos de desgaste en la herramienta de corte tales como:

- **Abrasión:** desgaste que se da entre dos superficies que se rozan entre sí. Un material de corte (herramienta) más duro es recomendable.
- **Difusión:** proceso químico en donde la combinación de calor y presión en la zona de corte producen reacciones entre la herramienta y el material, produciendo un desgaste por cráter en la superficie de ataque.
- **Oxidación:** proceso químico, en donde la interacción de la herramienta y la pieza producen un desgaste en la arista de corte de la herramienta.
- **Fatiga:** variaciones de temperatura y presión contribuyen a que la herramienta se vuelva aún más frágil de lo que normalmente es. Puede producirse por una mala refrigeración.
- **Adhesión:** el material de la pieza se adhiere a la arista de corte de la herramienta, cambiando así su geometría y fricción. Este mecanismo se presenta a bajas temperaturas y velocidades de corte [10].

Cada uno de los mecanismos nombrados anteriormente están directamente influenciados por la temperatura generada en la zona de corte y se muestran en la Figura 3a [10]. En la Figura 3b se observa el desgaste que se produce en la herramienta respecto de la temperatura de corte con la influencia de estos mecanismos de desgaste y también una temperatura crítica cuando se encuentran involucrados todos estos a la vez.

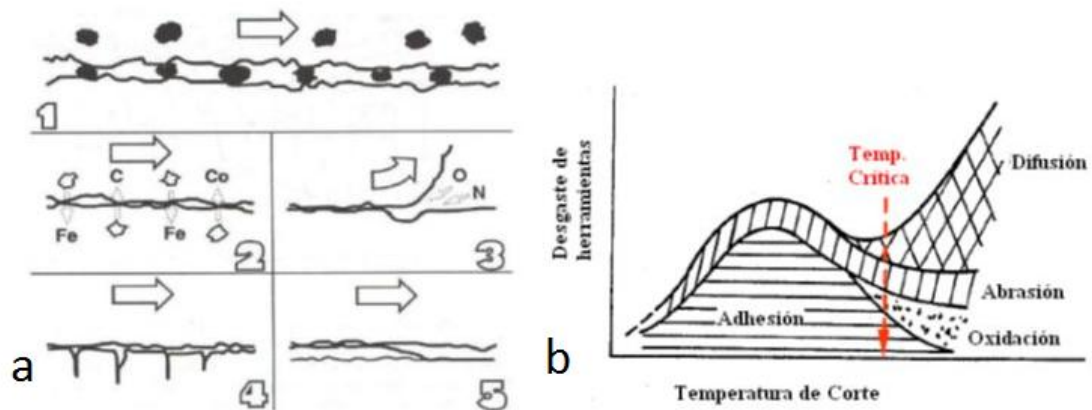


Figura 3. Mecanismos de desgaste. 1) Abrasión, 2) difusión, 3) oxidación, 4) fatiga y 5) adhesión. Mecanismos de desgaste de herramienta en función T ($^{\circ}\text{C}$) [10].

3.1.2.2 Zonas de temperatura y su distribución en el proceso de corte.

La energía mecánica empleada en el proceso de corte se transforma en calor que provoca elevadas temperaturas en la zona, producto de la fricción entre la herramienta y la pieza. Las elevadas temperaturas influyen en el rendimiento de la herramienta y a la calidad de la pieza. Siendo estas alcanzadas en la superficie de desprendimiento de la herramienta, en regiones cercanas al filo.

Parte del calor generado en el mecanizado se disipa a través del ambiente y fluido de corte en el caso de utilizarse. El calor restante es expulsado, un 80% por la viruta, un 15% por la herramienta y un 5% por la misma pieza de trabajo. [9]

Teniendo en cuenta el comportamiento de este fenómeno donde se deben considerar tres zonas diferentes como las indicadas en la Figura 4, en las que se consigue un mayor incremento de temperatura. [5]

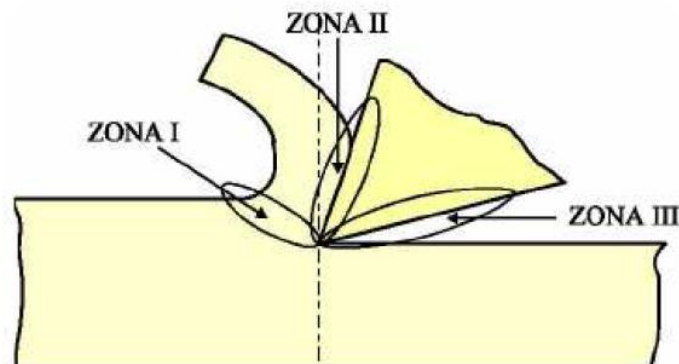


Figura 4. Zonas térmicas en el corte [5].

- **Zona I:** Llamada zona de deslizamiento en la que se produce un rozamiento interno del material en proceso de deformación.

- **Zona II:** se localiza en la cara de desprendimiento de la herramienta y aparece como consecuencia del rozamiento entre ésta y la viruta.
- **Zona III:** Una zona III ubicada en la cara de incidencia entre la herramienta y la superficie de la pieza ya mecanizada.

Estas zonas de temperatura estarán dependiendo de factores como la conductividad térmica y el calor específico de los materiales que se encuentran en contacto, como son la herramienta y la pieza maquinada, la velocidad de corte y profundidad de corte y también el tipo de fluido, si se usa. [5].

En la Figura 5 a continuación se presenta una distribución típica de las temperaturas y la presencia de altos gradientes térmicos. [11].

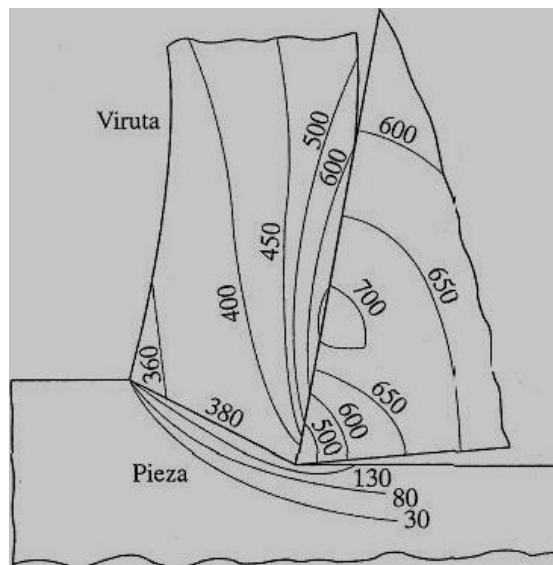


Figura 5. Distribución típica de temperaturas en zona de corte [11].

3.1.2.3 Medición de temperatura en el corte.

Para la obtención de los datos de temperatura se requiere de una termocupla ubicada en la base de la herramienta de corte, ya que es el lugar más cercano al punto de interacción de la herramienta y la pieza de trabajo, a partir de ese dato se hace una medición de la temperatura de corte. [8]

Termocupla

Dispositivo compuesto de metal-metal que genera voltaje mediante diferenciales de temperatura tomada desde puntos en cada extremo llamados punto frío y punto caliente respectivamente. Este dispositivo es usado industrialmente como sensor de temperatura ya que maneja un amplio rango de altas temperaturas.

Las termocuplas más usadas son:

- **TIPO J:** El hierro se oxida rápidamente a temperaturas mayores a 540°C. No recomendable en ciclos mayores que 760°C. Se comporta muy bien en atmósferas reductoras. Utilizar vainas de protección y alambres de mayor diámetro para atmósferas oxidantes.
- **TIPO K:** El más usado en la industria debido a su confiabilidad y exactitud de calibración. Muy buena respuesta en forma continua hasta 1260°C. Se comporta muy bien en atmósferas oxidantes y es conveniente su protección en atmósferas reductoras.
- **TIPO T:** Ideal de 0 a 370°C. Apto para uso continuo en vacío.
- **TIPO E:** Mayor FEM (Fuerza Electro Motriz) que el resto de las curvas. Excelente para temperatura subcero. Buena resistencia a la corrosión e ideal atmósferas húmedas.

En la Figura 6 se muestra la ubicación de la termocupla en la herramienta de corte, para este caso una tipo K, la cual está conectada a un sistema de adquisición de datos que ayudara a almacenar la información de temperatura en el ordenador

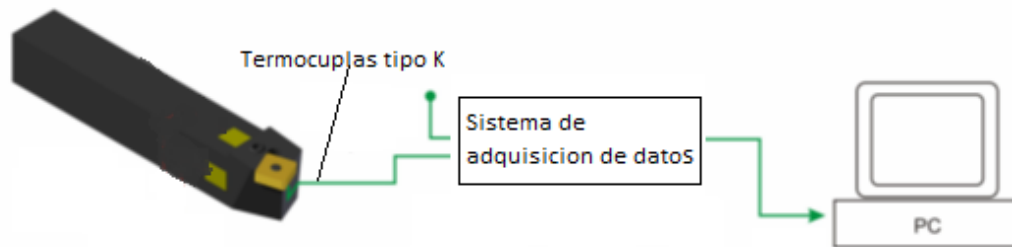


Figura 6. Esquema del sistema de monitoreo [8].

Cámara termo gráfica

Está equipada con detector de radiación que la convierte en una señal eléctrica expresada en niveles digitales (DLL) los cuales no son magnitudes relevantes por lo cual se debe calibrar la cámara para relacionarlos con una temperatura real en el entorno. [12]

Razonablemente se determina que la temperatura alcanzada por la herramienta durante el corte, depende en gran medida de las condiciones de corte (avance y velocidad de rotación), y del material de la pieza. Sin embargo, se tiene en cuenta factores como el montaje de la cámara, la calibración y la precisión de la emisividad. Todos estos factores son determinados en toma de la temperatura final, dando así una medida más precisa en la medición de la temperatura de la pieza en el corte ortogonal en seco [12].

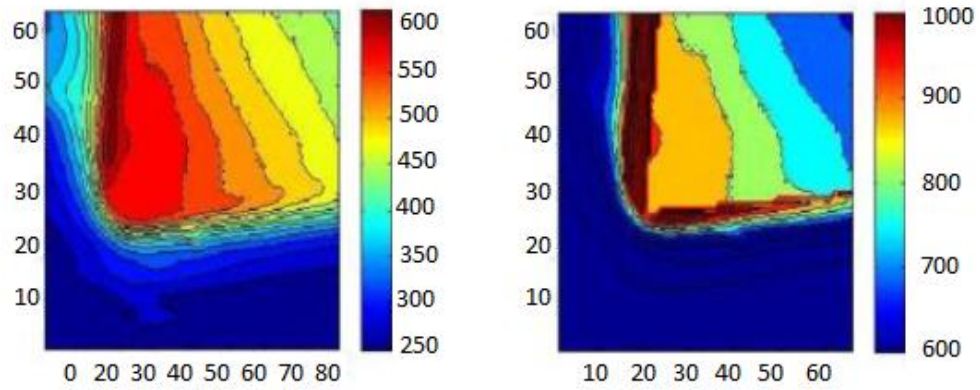


Figura 7. Imágenes de herramienta de corte mediante cámara termográfica *D. Soler Mallo et al [12]*.

3.2 MARCO TEÓRICO ESTADÍSTICO

3.2.1 ELECCIÓN DEL TAMAÑO DE MUESTRA

Es posible usar las curvas de operación característica, para asistir al experimentador con el objetivo de determinar un tamaño de muestra (el número de réplicas, n) apropiado en un diseño factorial de dos factores [13].

Una forma muy eficiente de usar estas curvas es determinar el valor mínimo de φ^2 que corresponde a una diferencia especificada entre dos medias de tratamientos cualesquiera. Por ejemplo, si la diferencia entre dos medias de renglón es D , el valor mínimo de φ^2 será:

$$\varphi^2 = \frac{nbD^2}{2a\sigma^2}$$

Dónde:

D : es la diferencia máxima entre dos medias de renglón.

φ^2 : tiene que ver con el parámetro de no centralidad.

Mientras que la diferencia entre dos medias de columna es D , el valor mínimo de φ^2 será:

$$\varphi^2 = \frac{naD^2}{2b\sigma^2}$$

Finalmente, el valor mínimo de φ^2 que corresponde a una diferencia igual a D entre cualquier par de efectos de interacción será:

$$\varphi^2 = \frac{nD^2}{2\sigma^2[(a-1)(b-1)+1]}$$

3.2.2 DISEÑO FACTORIAL GENERAL

En el caso general de los diseños factoriales, se tienen en cuenta a niveles del factor A, b niveles del factor B, c niveles del factor C, etc., dispuestos en el experimento. En general habrá $abc \dots n$ observaciones totales si se hacen n réplicas del experimento completo. Hay que tener en cuenta que es necesario un mínimo de 2 réplicas ($n \geq 2$), para determinar una suma de cuadrados debido al error si todas las interacciones posibles están incluidas [13].

3.2.2.1 Diseños factorial de dos factores.

Los tipos más simples de diseños factoriales incluyen únicamente dos factores o conjuntos de tratamientos. Hay a niveles del factor A y b niveles del factor B, los cuales se disponen en un diseño factorial; es decir, cada réplica del experimento contiene todas las ab combinaciones de los tratamientos. En general, hay n replicas.

El efecto de un factor se define como el cambio en la respuesta producido por un cambio en el nivel del factor; con frecuencia se le llama efecto principal por que se refiere a los factores de interacción primario del experimento. En algunos experimentos puede encontrarse que la diferencia en la respuesta entre los niveles de un factor no es la misma para todos los niveles de los otros factores. Cuando esto ocurre hay interacción, puesto que el efecto de A depende del nivel que se elige para el factor B, se observa que existe una interacción entre A y B y no se puede estudiar el efecto de un factor sobre la respuesta independiente del otro factor.

3.2.2.2 Modelo de diseño.

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \epsilon_{ijk} \quad \begin{cases} i = 1, \dots, a \\ j = 1, \dots, b \\ k = 1, \dots, n \end{cases}$$

Dónde:

- Y_{ijk} : Es el valor que toma la variable respuesta explicada por el i -ésimo nivel del factor A, por el j -ésimo nivel del factor B y la k -ésima interacción.
- μ : Es la media general sin tener en cuenta los factores y su interacción.
- τ_i : Es el efecto del i -ésimo nivel del factor A de los reglones, sobre la variable de respuesta.
- β_j : Es el efecto del j -ésimo del factor B de las columnas, sobre la variable de respuesta.
- $(\tau\beta)_{ij}$: Es el efecto debido a la interacción de primer orden entre los factores, sobre la variable de respuesta.
- ϵ_{ijk} : Es un componente del error aleatorio, debido a factores no controlados o no controlables.

Se supone que ambos factores son fijos, y los efectos de los tratamientos se definen como las desviaciones de la media global, por lo que $\sum_{i=1}^a \tau_i = 0$ y $\sum_{j=1}^b \beta_j = 0$. De manera

similar, los efectos de las interacciones son fijos y se definen de tal modo que $\sum_{i=1}^a (\tau\beta)_{ij} = 0$. Puesto que hay n réplicas del experimento, hay abn observaciones en total.

Supuestos del modelo:

- Normalidad: $\epsilon_{ijk} \sim N(0, \sigma^2 I)$
- $E[\epsilon_{ijk}] = 0; \forall i, j, k.$
- Homocedasticidad: $\text{Var}[\epsilon_{ijk}] = \sigma^2 I; \forall i, j, k.$
- Independencia: $\text{Cov}[\epsilon_{ijk}, \epsilon_{i'j'k'}] = 0; \forall i \neq i', j \neq j', k \neq k'$

3.2.3 ANÁLISIS UNIVARIANTE DE LA VARIANZA-ANOVA

A continuación se muestra cómo se pueden probar las hipótesis planteadas anteriormente, usando un análisis de varianza bifactorial (de dos factores):

Tabla 1. Análisis de varianza del ANOVA

FV	Suma de cuadrados	gl	Cuadrado medio	F_0	ECM
A	SS_A	$a - 1$	$MS_A = \frac{SS_A}{a - 1}$	$F_0 = \frac{MS_A}{MS_E}$	$bn \sum_i \frac{A_i - \bar{A}}{a - 1} + \sigma^2$
B	SS_B	$b - 1$	$MS_B = \frac{SS_B}{b - 1}$	$F_0 = \frac{MS_B}{MS_E}$	$bn \sum_i \frac{B_i - \bar{B}}{b - 1} + \sigma^2$
AB	SS_{AB}	$(a - 1)(b - 1)$	$MS_{AB} = \frac{SS_{AB}}{(a - 1)(b - 1)}$	$F_0 = \frac{MS_{AB}}{MS_E}$	$n \sum_i \sum_j \frac{AB_{ij} - \bar{AB}}{(a - 1)(b - 1)} + \sigma^2$
Error	SS_E	$ab(n - 1)$	$MS_E = \frac{SS_E}{ab(n - 1)}$		
Total	SS_T	$abn - 1$			

3.2.4 PRUEBAS POST-ANOVA

Una vez que el ANOVA ha mostrado que un valor de F es significativo (rechazo de la hipótesis nula), se puede aplicar una prueba de comparación múltiple como la, Duncan, Tuckey o el de la Diferencia Significativa Menor (LSD), entre otras que se han propuesto. Todos los procedimientos involucran el cálculo de un valor que es comparado con la diferencia entre promedios. Si este valor es más pequeño que las diferencias quieren decir que éstas son significativamente diferentes.

Tradicionalmente, las comparaciones múltiples se realizan al mismo nivel de significancia que el ANOVA. Por ejemplo, para un ANOVA significativo a un nivel de 5% ($\alpha = 0,05$), se realizan comparaciones múltiples al 5%.

3.2.5 VERIFICACIÓN DE SUPUESTOS

La validez de los resultados obtenidos en cualquier análisis de varianza queda supeditada a que los supuestos del modelo se cumplan, éstos supuestos del modelo de ANOVA son:

normalidad de los errores, varianza constante e independencia de los errores. Esto es, que la respuesta (Y) debe provenir de una distribución normal, con la misma varianza en cada tratamiento y las mediciones deben ser independientes.

Para validar los supuestos del modelo se puede hacer de dos formas [14]:

- Métodos gráficos, los cuales son fáciles de entender y se puede apreciar comportamientos inesperados.
- Métodos formales, basados en pruebas de hipótesis.

3.2.5.1 Supuesto de normalidad.

Entre las pruebas formales esta la prueba de Shapiro Wilks (muestras pequeñas $n < 30$), para efectuarla se calcula la media y la varianza muestral s^2 y se ordenan las observaciones de menor a mayor y la prueba de Kolmogorov-Smirnov (muestras grandes $n \geq 30$), si su distribución es normal, se puede comprobar mediante la elaboración de una gráfica de probabilidad normal de los residuos.

3.2.5.2 Supuesto de homogeneidad de varianzas

La graficación de los residuales también sirve para verificar el supuesto de que las varianzas del error son constantes, para esto se construye una gráfica de los tratamientos vs los residuales (ϵ_{ij}), cuando la varianza es estable no existe ninguna tendencia aparente de la varianza de los residuales, en caso de que se presenta una de las tendencias, se requiere una transformación estabilizadora de la varianza [13].

Cuando se tiene tamaños de muestra pequeños en cada tratamiento, sólo se grafican pocos puntos en la gráfica de los residuales lo que dificulta la detección de diferencias en la varianza, en tal situación es recomendable utilizar uno de los métodos formales disponibles para validar el supuesto de homogeneidad de varianzas, entre los cuales se encuentran [15]:

3.2.5.3 Supuesto de independencia de los errores

La independencia de los errores es de esperar en situaciones estáticas (cuando todas las observaciones corresponden al mismo período temporal), pero no en situaciones dinámicas, donde medimos la variable respuesta a lo largo del tiempo. Para validar este supuesto el tercer gráfico que se construye son los residuos en su secuencia temporal de obtención, para identificar posibles cambios en el tiempo de las condiciones experimentales, cuando los ϵ_{ij} son independientes no se observa ninguna tendencia [16].

3.2.5.4 Control local del experimento

Para poder medir el control local del experimento se puede calcular el Coeficiente de Variación, la cual es una medida de variabilidad relativa (sin unidades de medida), cuyo uso es para cuantificar en términos porcentuales la variabilidad de las unidades experimentales, frente a la aplicación de un determinado tratamiento.

Para evaluar el control local ejercido en este experimento tenemos que:

$$CV = \frac{\sqrt{CME}}{\bar{Y}} * 100$$

Dónde:

CME: es el cuadrado medio del error, es decir la varianza de los datos.

$\bar{Y}$: es la media general del experimento.

CV: coeficiente de Variación.

3.3 ANTECEDENTES

Umbrello et al [17] tienen en cuenta las variables locales en el mecanizado, una de las más importantes la temperatura, desarrollan procedimientos experimentales eficaces, para validar resultados numéricos en lo que implementan dos enfoques para la medición de la temperatura, uno de ellos es usando termocuplas en contacto con herramienta de corte y el otro un análisis numérico. En sus resultados encuentran que los estudios termo mecánicos son menos acertados que los analíticos, brindando ventajas relevantes.

Wallbank y Da Silva [18] concentran su estudio en los métodos de predicción de temperatura en el torneado, enfocándose en la revisión de métodos analíticos y experimentales utilizados, presentando algunos resultados experimentales. Concluyendo que las principales variables son la fuerza de corte, la rugosidad, el tipo de viruta, desgaste de la herramienta y como último la temperatura, siendo ésta la más difícil de medir, lo que explica la variedad de métodos utilizados para su análisis.

Mahapatra et al [19] realizan mecanizados en seco en Cu/TiC con insertos sin recubrimiento, teniendo en cuenta el efecto de los parámetros de mecanizado como velocidad, velocidad de avance y profundidad de corte relacionado con la fuerza de corte y la rugosidad de la superficie. Sus resultados experimentales muestran que la fuerza de corte aumenta con la velocidad hasta 80m/min y luego disminuyendo hasta 120m/min, también que con el uso de insertos sin recubrimiento obtienen un mejor acabado en materiales compuestos.

López [20] evaluó el desempeño de los insertos de corte de la serie GC 4000 de Sandvik con calidad GC 4015 en un proceso de torneado en seco en acero AISI 4140. El autor diseñó un experimento, considerando los principales factores que afectan el desempeño de los insertos de corte, como lo son: la profundidad de corte, el avance, las revoluciones por minuto (donde va implícita la velocidad de corte), el tipo de mecanizado: seco o húmedo y el tipo de inserto Wiper o inserto normal. Se realizó un diseño factorial y el análisis de varianza correspondiente. Algunos resultados mostraron que los efectos con interacción afectan en mayor grado a la rugosidad de la pieza de trabajo y en segundo lugar las interacciones dobles de dichos efectos. La velocidad de avance es el factor que tiene mayor efecto en la rugosidad de la pieza, es decir cuando se cambia el avance de 0.1 a 0.3 mm/rev se incrementa la rugosidad, por lo que si se busca obtener un buen acabado superficial es necesario emplear un avance de 0.1 mm/rev. El tipo de inserto es el segundo factor más

importante debido a la variación en el tipo de inserto de normal a Wiper se generó una variación en la superficie de la pieza, para tener un mejor acabado se sugiere emplear un inserto tipo normal.

Hernández [21] abordó el estudio experimental del efecto del volumen de metal cortado y de la velocidad de corte sobre el desgaste del flanco de dos insertos de carburos recubiertos y en un cermet, durante el torneado de acabado en seco del acero AISI 1045 a velocidades de corte moderada, intermedia y alta. Los resultados fueron comparados utilizando la dimensión volumétrica de la vida útil de la herramienta, el análisis de varianza y el análisis de regresión lineal para describir la relación entre el desgaste y el volumen removido, según las ecuaciones del modelo ajustado. La investigación mostró un efecto significativo de la velocidad de corte y del volumen cortado en el desgaste del flanco, pues se logró el mejor desempeño para la alta velocidad con el carburo recubierto con tres capas y el peor funcionamiento con el carburo recubierto con dos capas.

Pérez y Hernández [22] Abordaron el estudio experimental de la evolución de la fuerza de corte resultante de dos insertos de carburo recubierto y un cermet, durante el torneado en seco del acero AISI 1045 con velocidades de corte de 400, 500 y 600 m/min. Se introdujo, además, un nuevo criterio para el estudio del rendimiento de las operaciones de mecanizado: el coeficiente de dimensión volumétrica de la fuerza de corte. La investigación mostró un mejor rendimiento del cermet para la velocidad de corte moderada e intermedia, mientras que para la alta velocidad de corte y tiempo final de mecanizado, el mejor resultado se obtuvo para el carburo recubierto con tres capas. El análisis de varianza demostró un efecto significativo del tiempo de mecanizado sobre el coeficiente de dimensión volumétrica de la fuerza de corte resultante, mientras que la variable tipo de material del inserto y su interacción, fue significativa para la velocidad de corte intermedia.

Morales [23] Investigó los efectos de los parámetros corte en el desgaste de flanco con dos insertos recubiertos durante el torneado de acabado en seco a altas velocidades del acero inoxidable AISI 316L. Los efectos de los parámetros de corte fueron determinados utilizando un análisis de varianza y de regresión simple. Como principal resultado se obtuvo el efecto significativo del avance y del tiempo de maquinado en el desgaste del flanco. El inserto de tres capas no sobrepasó el criterio de fin de vida del desgaste, mientras que el inserto de una capa sufrió un desgaste catastrófico para la mayor velocidad de corte. El desgaste del flanco tuvo mejor comportamiento para el avance de 0,08 mm/rev en todas las velocidades empleadas en este estudio.

4 MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 MATERIALES

4.1.1 ACERO SAE 1020

Para la evaluación de los campos de temperatura se emplea una barra cilíndrica de acero SAE 1020 con 50,8mm de diámetro y 150 mm de longitud, la cual fue mecanizada internamente para ajustarla de acuerdo a las necesidades de la obtención de los datos de temperatura. En la Figura 8 se muestra la ficha técnica del material con sus propiedades.

MATRIZ ACEROS ESPECIALES SACK (versión 1.1)							
Tipo Acero	Clasificación según normas internacionales	Descripción					
		Composición Química	Resistencia	Maquinado	Soldadura	Ductilidad	Tratamiento Térmico
Acero SAE 1020 	AISI C1020 UNI C20 UNE F112 SS 1450 BS 050 A 20 ; 055 M15 AFNOR AF42 C20 ; XC 25 DIN C22	C 0,20 % Mn 0,45 % P 0,03 % S 0,05 %	Bajo contenido de C, tienen una resistencia a la tracción relativamente baja y no deben escogerse cuando las piezas sean requeridas a grandes esfuerzos.	Este acero no se maquina con facilidad por lo tanto deben evitar usar cuando las piezas a elaborar necesitan un acabado fino superficial.	Este acero no presenta dificultades al soldarse por los medios comunes, siendo recomendable su uso en piezas construidas estructuralmente, que incluso involucren mecanizados.	Este acero sirve para numerosas piezas forjadas, estampadas o embutidas Ej: herramientas agrícolas, pernos de baja resistencia etc.	Mejora su dureza sometiendo a un aumento superficial del contenido de C mediante cementación y temple al agua o aceite, también es posible mejorar su comportamiento mecánico mediante Lam en frío.

Figura 8. Ficha técnica del acero utilizado [24].

En la Figura 9 se muestra el proceso de maquinado al que fue sometido el material para definir las probetas a las medidas requeridas para las pruebas, que para este caso fueron cilíndricas.



Figura 9. Proceso de elaboración de probetas cilíndricas de acero SAE 1020.

4.1.2 HERRAMIENTA DE CORTE (INSERTOS).

Para las pruebas a realizar se utilizaron insertos o plaquitas para mecanizado de referencia Brassinter BA-55 TPUN 160304, de metal duro de carburo de tungsteno y cobalto; los

cuales se usaron como herramienta de corte. Los insertos son posicionados en porta herramientas de referencia CTGPR7L2525M16 para insertos TPUN. Las características geométricas del inserto se pueden observar en la Figura 10.

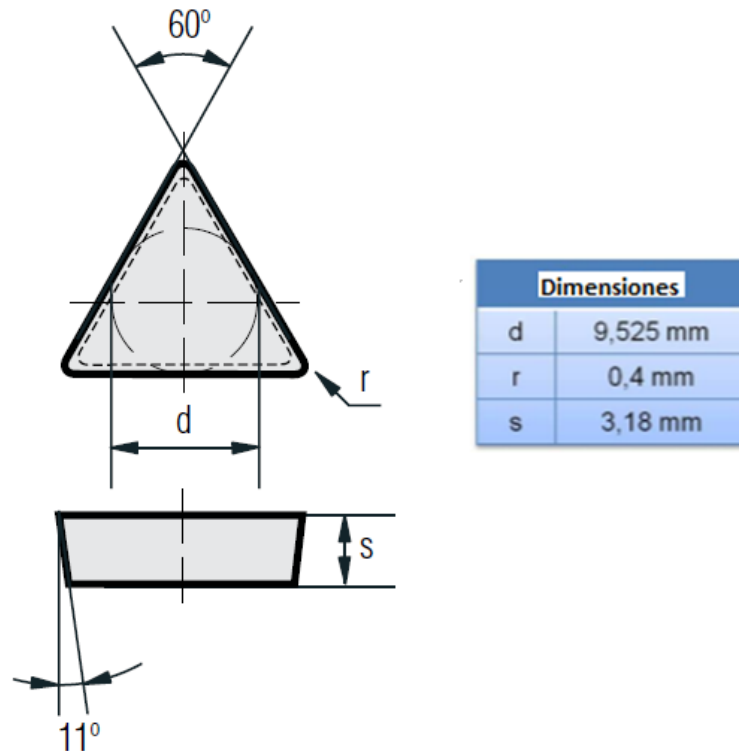


Figura 10. Dimensiones del inserto [25].

De acuerdo a las recomendaciones dadas por el fabricante de los insertos y las comparaciones hechas con otra bibliografía [26], da como resultado los siguientes datos.

- El inserto BA55 está clasificado por la norma ISO P30. Indicado para bajas velocidades y avances grandes.
- La velocidad de alimentación o avance no debe exceder 2/3 del valor del radio de nariz de la herramienta de corte.
- La profundidad mínima de corte para el acabado, debe ser mayor al radio de nariz de la herramienta de corte.

4.1.3 MAQUINA HERRAMIENTA PARA EL PROCESO

Para realizar el proceso de cilindrado se utilizó el torno PINACHO, modelo A.74 mostrado en la Figura 11 perteneciente al laboratorio de procesos de manufactura de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad del valle.



Figura 11. Torno pinacho A.47, de operación manual.

4.2 METODOS

En la Figura 12 se muestran los procedimientos que se llevaron a cabo para la realización del proyecto teniendo en cuenta los aspectos más generales.

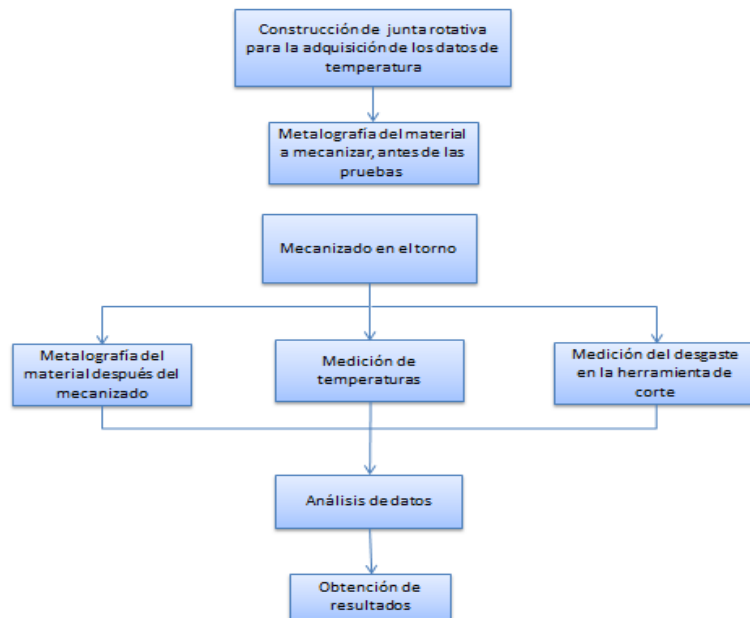


Figura 12. Metodología para la ejecución del proyecto.

4.2.1 CONSTRUCCIÓN, IMPLEMENTACIÓN Y CALIBRACIÓN DE JUNTA ROTATIVA

Dentro del diseño de una metodología para la obtención de los datos de temperatura se requirió de una junta rotativa para la obtención de estos que se generan en la pieza a maquinar cuando ésta se encuentra en movimiento rotativo, por lo tanto se procedió a diseñar y construir una para la conexión de dos termocupas, partiendo de la apariencia de una ya existente que se encuentra en el mercado ya que el costo de esta es de US\$158 comparado con US \$40 que es el costo al construirla en el laboratorio. En la Figura 13 se muestra la junta rotativa comercial que es usada para multipropósitos en la industria.



Figura 13. Junta rotativa comercial [27]

4.2.1.1 CONSTRUCCIÓN

Tomando como referencia la junta rotativa comercial mostrada en la Figura 13 se realiza el diseño virtual mediante el uso de la herramienta Solidworks, teniendo en cuenta las dimensiones de las probetas para las pruebas a las cuales se ajustó.

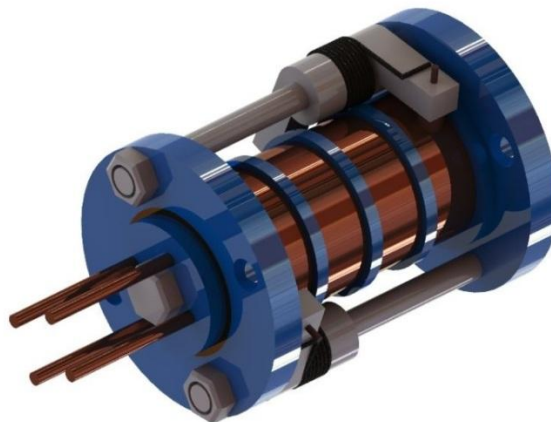


Figura 14. Diseño virtual de la junta rotativa.

En la Figura 14 se muestra el modelo virtual definitivo lo cual se adjuntan los planos y dimensiones de cada componente en el **anexo A** al final del documento. A continuación se procede a fabricar las piezas en el laboratorio de procesos de manufactura.

Se usó teflón como material de la estructura, ya que siendo un polímero sirve como aislante, y cobre para los anillos, por los cuales hay transferencia de la señal.

En la Figura 15 se muestran numeradas todas las partes fabricadas y listas para armar la junta rotativa, en la *Tabla 2* se nombra cada elemento y en la Figura 16 se muestra el ensamble completo de esta.

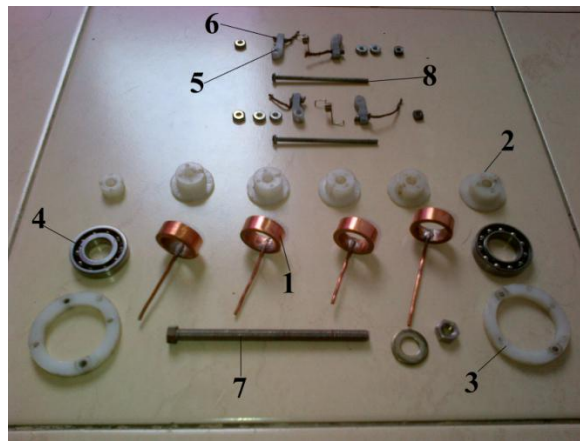


Figura 15. Elementos de la junta rotativa.

Tabla 2. Partes que componen la junta rotativa.

Núm. de elemento	Descripción
1	Anillos de cobre
2	Separadores centrales de teflón
3	Anillos de alineación para los extremos
4	Rodamientos de carga axial
5	Porta escobillas de teflón
6	Escobillas cobrizadas
7	Tornillo central
8	Tornillos de alineación y de porta escobillas

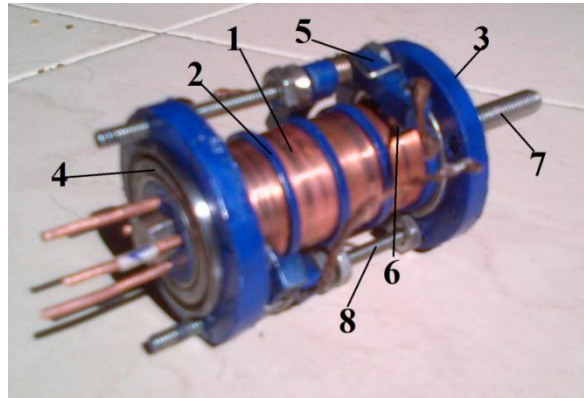


Figura 16. Junta rotativa ensamblada.

4.2.1.2 IMPLEMENTACIÓN

Al obtener el ensamble completo de la junta rotativa, se procede a conectar las termocuplas en los terminales correspondientes, asegurándonos que cada color en el terminal de entrada coincida con el de la salida y que las juntas queden muy firmes para evitar errores en las mediciones como se muestra en la Figura 17, ya que de no hacerlo así podemos obtener ruido u otras frecuencias que distorsionen la medición, para este caso fueron soldadas con estaño.

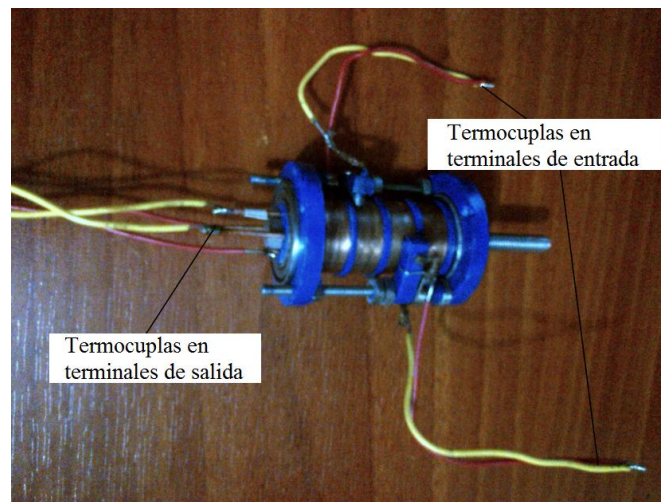


Figura 17. Conexión de termocuplas en junta rotativa.

4.2.1.3 CALIBRACIÓN

Después de obtener el dispositivo completamente ensamblado y con las termocuplas en su posición (Figura 17), se procede a realizar la calibración con el fin de conocer el comportamiento del dispositivo, respecto a la transferencia de señal y la variación de las

mediciones de temperatura relacionada con las pérdidas por las conexiones y fluidez de la señal, de esta manera se realizan pruebas de continuidad con el apoyo de un multímetro. Seguido de lo anterior se realiza la calibración de temperatura conectando las termocuplas de entrada a un fluido de referencia, y un termómetro a las termocuplas de salida de la junta rotativa, procediendo a realizar pruebas del método de agua helada y punto de ebullición con el dispositivo (Figura 18).

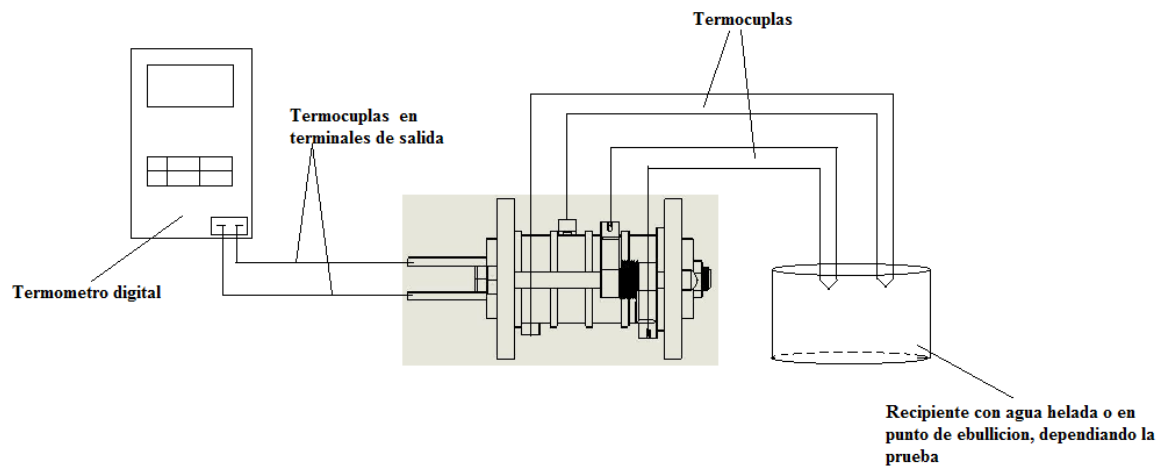


Figura 18. Esquema de calibración de temperatura para el dispositivo.

- **METODO DE AGUA HELADA:** Para realizar este método, se llenó de hielo molido un recipiente y añadiéndole agua fría limpia del grifo hasta que ésta cubra el hielo y luego agitando bien la mezcla. A continuación se sumergió la punta de la termocupla proveniente del dispositivo dentro de la mezcla. Con la precaución que la punta no toque los lados o el fondo del recipiente. Se tomó un tiempo de espera de 30 segundos hasta lograr una estabilización en la pantalla del termómetro. Se llevaron a cabo 5 mediciones teniendo en cuenta que el agua se mantuvo alrededor de los 0°C en el transcurso de la calibración midiendo con un termómetro Marca TES-1300, las cuales se muestran en la *Tabla 3*.
- **MÉTODO PUNTO DE EBULLICIÓN:** En este método, se calentó agua limpia en un recipiente hasta que alcanzó el punto de ebullición (100°C). Se sumergió la punta de la termocupla por 30 segundos hasta la estabilización y se obtuvieron 5 mediciones con el mismo procedimiento (ver *Tabla 3*), manteniendo estabilizada la temperatura del agua con la ayuda del termómetro y un sistema de control de temperatura que se había diseñado, construido y calibrado en un curso previo.

Tabla 3. Temperaturas de calibración de junta rotativa.

Prueba	Temp agua helada (°C)	Temp en ebullición (°C)
1	-4	95.3
2	-5.8	94
3	-6	94.6
4	-4.4	95
5	-5	94.7

Dados los resultados en las pruebas de calibración *Tabla 3*, se observó que había un desfase de -5°C con respecto a las temperaturas reales, lo cual se le atribuye a las pérdidas generadas por las conexiones y aditamentos en el dispositivo. Este valor de error fue tomado en cuenta en las mediciones de las pruebas y fue compensado en el programa realizado en la herramienta LabView que se utilizó para la adquisición de los datos. En la Figura 19 encontramos el entorno grafico que se usa en el programa, el cual muestra doce visualizaciones de medida.

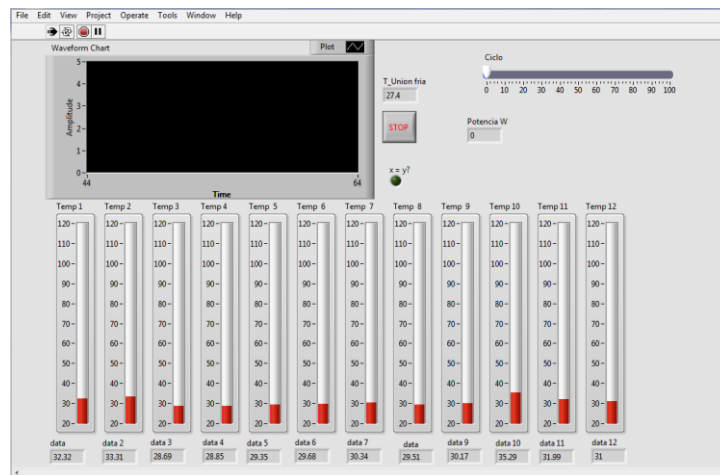


Figura 19. Entorno grafico del programa para la adquisición de los datos, diseñado en LabView [28].

4.2.2 IMPLEMENTACIÓN DE TERMOCUPLA EN PORTA INSERTOS

Para obtener medidas de temperatura lo más confiables, se implementó también una termocupla a través del porta-insertos y tocando la herramienta muy cerca de la punta de corte como lo recomienda la referencia [29] para garantizar así la obtención de los datos de temperatura a las que puede llegar la herramienta en el momento del mecanizado. En la Figura 20 se muestra el montaje.



Figura 20. Porta insertos con termocupla incrustada.

4.2.3 SELECCIÓN DE PARAMETROS DE CORTE

De acuerdo a la literatura [26] y las recomendaciones del fabricante de los insertos de corte [25], se han planteado valores de velocidad y profundidad de corte, manteniendo el avance constante con un valor de 0,2 mm/rev para todas las pruebas de torneado a realizar. En la *Tabla 4* se muestran los parámetros seleccionados para las distintas pruebas.

Tabla 4 Parámetros de mecanizado.

Profundidad (mm)	Velocidad de corte (m/min)
1	120
2	90
1	90
2	120

4.2.4 IMPLEMENTACIÓN GENERAL PARA EL MECANIZADO Y AQUISICION DE DATOS

Para la evaluación de las temperaturas y el desgaste de la herramienta en el mecanizado se usaron los siguientes componentes:

- Junta rotativa

- Porta insertos
- Tarjeta adquisidora de datos NATIONAL INSTRUMENTS NI USB-6210
- Torno manual PINACHO MODELO A-47
- Cilindros de acero SAE 1020 como material a mecanizar
- Computador con programa LabView
- Cable USB para la transmisión de los datos
- Termocuplas tipo K
- Pegante instantáneo SUPER GLUE

4.2.4.1 MONTAJE EN PIEZA DE TRABAJO

Para llevar a cabo el procedimiento, primero que todo se realiza el montaje de la junta rotativa en los cilindros de acero SAE 1020 con sus respectivas termocuplas adheridas en la cara interna del material, de esta misma manera lo hace el autor [3] obteniendo así temperaturas más precisas en el mecanizado. La junta rotativa es fijada a presión dentro del cilindro de acero y con la ayuda de pines de ajuste. Las termocuplas se encuentran adheridas con pegante instantáneo y garantizando que su contacto sea sólido. En la Figura 21 se muestra el esquema del montaje que se realizó para cada una de las pruebas efectuadas.

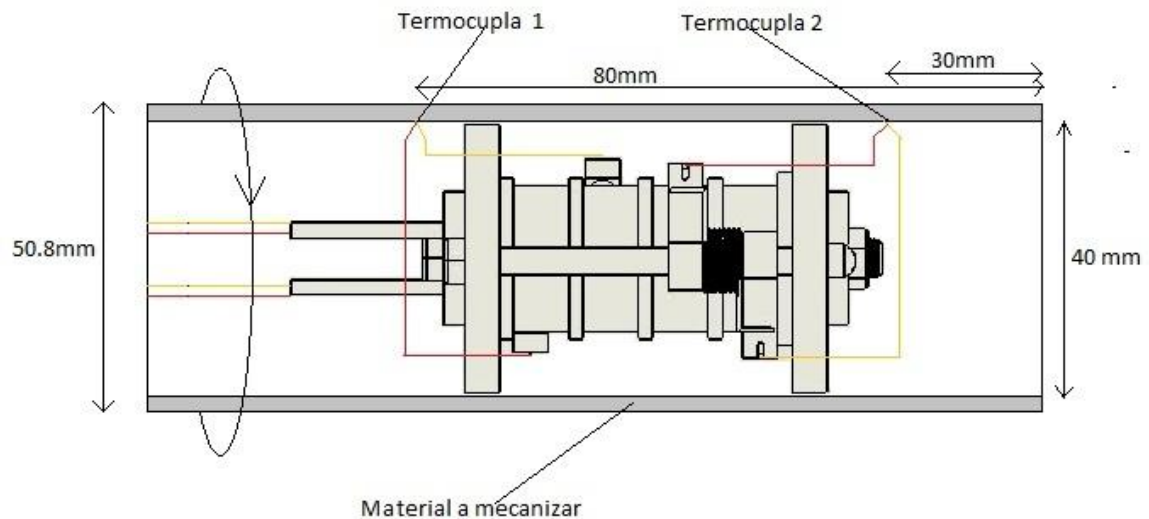


Figura 21. Esquema del montaje realizado en la pieza de trabajo.

4.2.4.2 MONTAJE EN TORNO

Teniendo el montaje en la pieza de trabajo, se procede a implementar todos los componentes nombrados anteriormente empezando con la pieza de trabajo con sus respectivas conexiones como se muestra en la Figura 22. Luego se tiene en cuenta el montaje del porta-insertos el cual se recubrió con una lámina de metal Figura 23, para que en el mecanizado con el desprendimiento de la viruta no ocasionara enredos con los cables

de termocupla que se encontraban presentes en la medición de temperatura en el inserto ya que se obtuvo una viruta continua .



Figura 22. Pieza de trabajo en el torno.

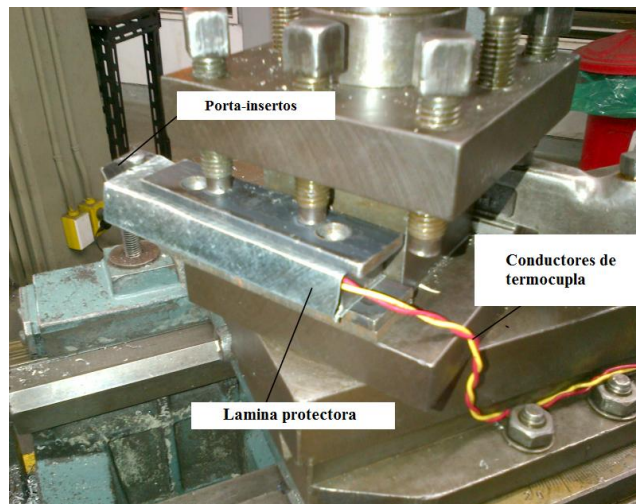


Figura 23. Porta insertos en torno.

Posteriormente, se conectaron las termocuplas provenientes de la pieza de trabajo y del porta insertos a la tarjeta adquisidora de datos *National Instruments NI USB-6210* la cual cuenta con doce canales para la medición de temperaturas, de los cuales se usaron solo tres que son, los dos provenientes de la junta rotativa y un tercero del porta insertos. Los nueve canales restantes de la tarjeta se le conectaron termocuplas que solo miden la temperatura ambiente, como se muestra en la Figura 24.

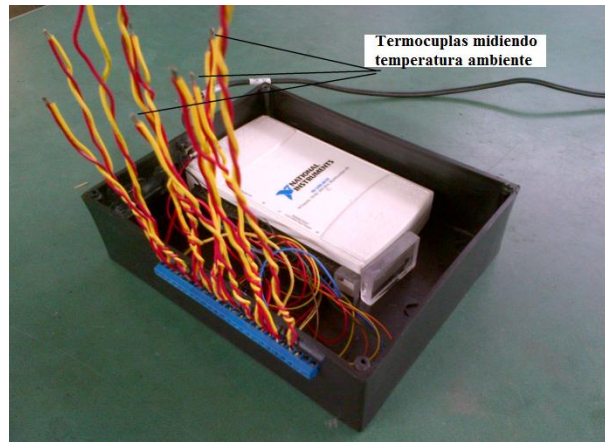


Figura 24. Tarjeta de adquisición de datos *National Instrument NI USB-6210*.

Por último se conectó el computador a la tarjeta, por medio de cable USB para almacenar y registrar los datos obtenidos en todas las pruebas, también se colocó el inserto con la punta de corte para dicha condición como está mostrado en la Figura 22. Se realizan todos los ajustes a las conexiones efectuadas, se revisan los parámetros a los cuales se va a maquinar dependiendo la condición y se da inicio a la prueba. En la Figura 25 se muestra el montaje completo con todos los componentes para la ejecución.

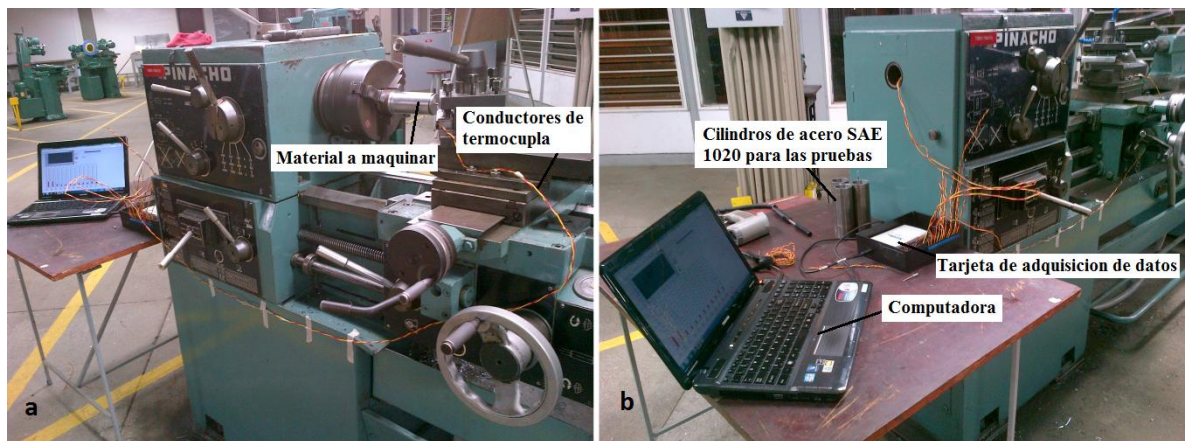


Figura 25. a) Vista de montaje en la herramienta, b) Vista del montaje en el computador.

4.2.5 RUGOSIDAD

Para la evaluación de los valores de las irregularidades se utiliza el rugosímetro MITUTOYO SJ-201P (Figura 26) de la escuela de Ingeniería mecánica, que es un aparato que realiza un seguimiento del perfil en línea recta, mediante una fina punta llamada palpador y que traduce las variaciones de altura de la superficie en señales eléctricas que se registran y procesan en una unidad de control.

Se midió la rugosidad en la superficie de los cilindros de acero SAE 1020 tomando tres valores de cada muestra y promediando para sacar un solo valor, donde se **midio** la rugosidad superficial R_a con unidades de micras (μm).



Figura 26. Rugosímetro MITUTOYO SJ-201P.

4.2.6 METALOGRAFIA

Se estudia las características micro estructurales del material SAE 1020 mediante la utilización del microscopio Advanced Optical con lentes de aumento (100X, 250X y 400X) de la Escuela de Ingeniería Mecánica. Previamente a esto se realiza su primera fase denominada desbaste grueso, se desbasta la superficie de la muestra con papel de lija, de manera uniforme y así sucesivamente disminuyendo el tamaño de grano desde N° 80 (N° de papel de lija) hasta llegar al papel tamaño de grano N°. 1200. Para el desbaste fino, se requiere de una superficie plana libre de rayaduras la cual se obtienen mediante una rueda giratoria húmeda cubierta con un paño especial cargado con partículas abrasivas, para este caso alúmina con tamaño de partículas de $1\mu\text{m}$ y $0.3\mu\text{m}$. Por último, al obtener una superficie totalmente pulida, se procede a atacarla con Nital 5% durante 5 segundos y posteriormente lavada con abundante agua, para revelar el grano de la microestructura y poderla observar en el microscopio.

4.2.7 METALOGRAFIA DESPUES DEL MECANIZADO

Después de haber realizado el proceso de mecanizado al material de trabajo, se toman pequeñas muestras de este, las cuales son sometidas al proceso de recubrimiento de níquel y posteriormente embutidas en resina mediante la embutidora BUEHLER y por último se realiza el lijado como se nombra anteriormente en el ítem 4.2.5.

4.2.8 RECUBRIMIENTO DE NIQUEL

Este proceso se realizó en el laboratorio de análisis de falla de la Escuela de Ingeniería Mecánica, que consiste en agregar una capa delgada de níquel mediante un proceso químico de adherencia alrededor de una muestra a la cual se le realiza el análisis metalográfico. Todo esto, con el fin de proteger la superficie a analizar evitando que sufra fracturas o deformación en los bordes, perjudicando la observación de cambios micro estructurales en el mecanizado.

Para este proceso se requiere de una serie de pasos a seguir para obtener una aplicación apropiada de este, más detalladamente lo podemos encontrar en [30].

- 1- Se calcula la totalidad del área que se necesita recubrir medidas en pulgadas. Para nuestro caso se tienen 4 muestras de cada material sometido a una prueba diferente y se saca el área de la superficie de cada una y se suma de todas para un área total, nuestra área obtenida fue $A_T = 5.58 \text{ pulg}^2$.
- 2- Según la teoría observada en el manual del procedimiento, es suficiente tener un espesor de recubrimiento de $12.4\mu\text{m}$, por lo tanto para este rango de recubrimiento se requieren 30 minutos de permanencia de las muestras en la composición de níquel a una temperatura determinada.
- 3- La cantidad de níquel para este tipo de procesos se mide en cantidad de créditos, y los créditos de níquel necesarios para esa área y ese espesor de recubrimiento es de 470,4 en la solución.
- 4- En el proceso se colocan las muestras previamente desengrasadas en un recipiente resistente al calor y se vierten 525,7ml agua destilada más el 80% de la cantidad total de níquel calculado y se eleva a la temperatura establecida. A los 15 min de estar las muestras en el níquel, se aumenta el 20% faltante de la solución de níquel y se espera hasta que se cumplan los 30min.

Durante el proceso de los 30 minutos, dentro del recipiente se adicionan unas esferas de plástico, siendo necesarias para que retengan el calor dentro del recipiente y este sea aproximadamente constante y garantizar que el recubrimiento se aplique satisfactoriamente.

4.2.9 MEDICION DEL DESGASTE DEL FLANCO DE LA HERRAMIENTA DE CORTE

Para el análisis del desgaste en la herramienta, se enumeraron todos los insertos y se marcó cada punta de estos para poderlos tener en cuenta en cada condición de mecanizado y poder tener así una referencia, como se muestra en la Figura 27.



Figura 27. Insertos tipo TPUN como herramientas de corte.

La medición del desgaste se realizó teniendo en cuenta el flanco de corte de acuerdo a la norma ISO 3685 [31], la cual dice que criterios se deben tener en cuenta para la medición. En la Figura 28 se muestran las medidas de flanco de desgaste que se pueden obtener, para este proyecto de investigación se tiene en cuenta el criterio de la medida $VB_B max$, VB_B y el ancho del cráter medido desde el filo del flanco nombrado como KB .

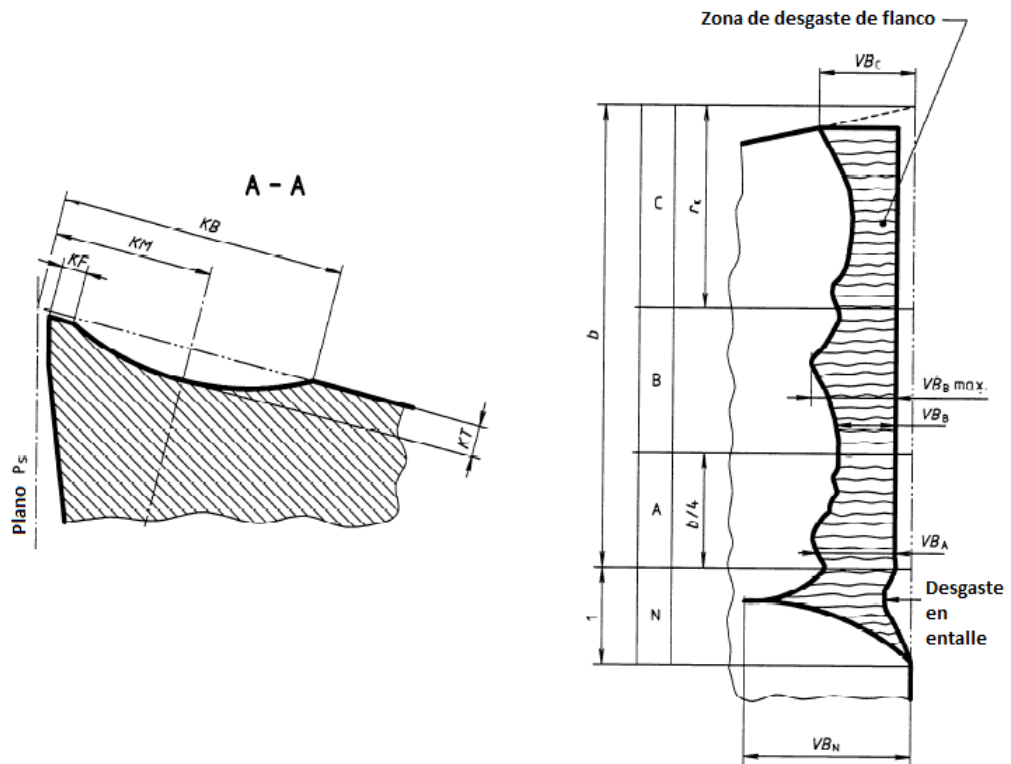


Figura 28. A lado derecho, desgaste de flanco de herramienta. A lado izquierdo corte en sección para una vista de la profundidad del cráter [31].

4.3 METODOLOGIA ESTADISTICA

4.3.1 ASPECTOS BÁSICOS DEL EXPERIMENTO

A continuación se hace la definición de los elementos que constituyen el diseño de experimentos, dado la información obtenida.

Unidad Experimental: pieza de acero SAE 1020.

Factores: El experimento cuenta con dos factores de experimentación:

- Factor A: Velocidad de corte
- Factor B: Profundidad de corte

Niveles: dos niveles

Niveles del Factor A:

- 120 m/min
- 90 m/min

Niveles del Factor B:

- 1mm
- 2mm

Variables de Respuesta: El interés de este trabajo se centra en obtener la máxima temperatura en un proceso de torneado en seco (la energía mecánica empleada en el proceso de corte, se transforma en calor, que provoca elevadas temperaturas en la zona, producto de la fricción entre la herramienta y la pieza) una vez definidos los elementos que intervienen en este modelo, se considera conveniente el ajuste de un Diseño Factorial de dos factores.

Tabla 5. Variables de interés y sus medidas.

Variable	Tipo de variable	Medida
Temperatura	Respuesta	Grados centígrados
Velocidad de corte	Predictora	m/min
Profundidad de corte	Predictora	milímetros

Muestreo y conducción del experimento

Se determinó la cantidad de réplicas para la recolección de datos y validez de la prueba para este estudio el cual es un análisis factorial de dos factores completo. El tamaño de muestra se evaluó a través de una curva característica, donde se validó la potencia de la prueba para diferentes tamaños escogiendo la mayor potencia, esto se llevó a cabo con el programa Minitab 16 mediante el trabajo de consultoría donde se puede apreciar los cálculos realizados [32].

La selección de las piezas de acero SAE 1020, así como la ejecución de los experimentos será completamente aleatoria explicando en la sección (**Aleatorización**) como se realizó con la ayuda del programa Minitab 16.

Para la toma de mediciones se estructuró una planilla para cada experimento, se realizaron las respectivas pruebas y mediciones con los equipos correspondientes (torno manual, tarjeta de adquisición de datos, computador y termocuplas).

Control local

Teniendo en cuenta que este experimento se llevó a cabo en el laboratorio de procesos de manufactura, podría decirse que en estas condiciones existe gran control sobre el experimento, por lo tanto es de esperarse un valor pequeño (menor al 10%) del CV (coeficiente de Variación) en situaciones como estas, pues aquí los factores de descontrol están bajo supervisión, aún nos basaremos en el coeficiente de variación para determinar si se presentó o no alta o baja variabilidad.

Aleatorización

Teniendo en cuenta que para el experimento se tienen 12 unidades experimentales que en este caso son las piezas de metal de acero SAE 1020 que se van a maquinar, se enumeraron de 1 a 12 estas piezas, y fueron aleatorizadas para cada uno de los cuatro tratamientos del experimento de la siguiente forma:

1. Se escoge un número al azar para cada una de las 12 piezas de metal en este caso un número de 1 a 12.
2. Se escoge un número al azar para el tratamiento en este caso un número de 1 a 4 tratamientos.
3. Se asigna la réplica (pieza de acero SAE 1020) al tratamiento correspondiente.

Tabla 6. Aleatorización de las réplicas.

Orden de corrida	Velocidad de corte	Profundidad de corte	R1	R2	R3
1	90 m/min	1mm	$y_{1,1,1}$	$y_{1,1,2}$	$y_{1,1,3}$
2	120 m/min	1 mm	$y_{2,1,1}$	$y_{2,1,2}$	$y_{2,1,3}$
3	90 m/min	2 mm	$y_{1,2,1}$	$y_{1,2,2}$	$y_{1,2,3}$
4	120 m/min	2 mm	$y_{2,2,1}$	$y_{2,2,2}$	$y_{2,2,3}$

Tamaño del experimento

Se determinó el tamaño de réplicas para la recolección de datos y validez de la prueba, por lo tanto, el tamaño de muestra se evaluó a través de una curva característica por medio de la cual se validó la potencia de la prueba para diferentes tamaños (2, 3, 4, 5). Cabe resaltar que la potencia que se requiere es del 95%, esto se llevó a cabo con el programa estadístico Minitab 16.

Con los datos obtenidos de la variable respuesta en el tratamiento más crítico, se obtuvo una desviación estándar de 4,3, y se decidió utilizar una desviación de 5. Pues una desviación de entre 4 y 5 grados está acorde a la realidad del problema. En este estudio se utilizó un tamaño de 3 réplicas.

En la *Tabla 7* se puede observar la potencia de la prueba para los diferentes tamaños de réplicas, por lo tanto, se obtuvieron los siguientes resultados: con un tamaño de 2 réplicas la potencia es de 57%, con 3 réplicas la potencia es de 85% y con 4 réplicas la potencia es de 95% y con 5 réplicas la potencia es de 98%.

Tabla 7. Potencia y tamaño de muestra.

Replicas	Corridas totales	Potencia
2	8	0,571609
3	12	0,857290
4	16	0,955776
5	20	0,987142

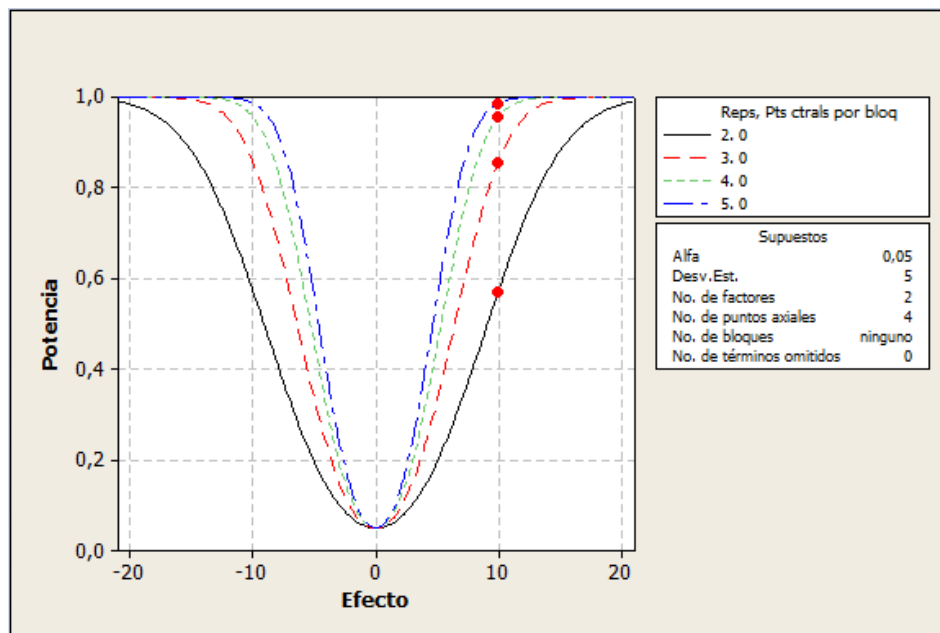


Figura 29. Curva de potencia para diseño factorial de dos niveles.

Según la curva de potencia (Figura 29) es posible alcanzar una potencia del 0,955 con 4 réplicas por tratamiento, es decir un total de corridas para todo el experimento de 16 réplicas que simplemente será agregar una réplica más en el modelo propuesto.

Definición del Diseño del Experimento

Teniendo en cuenta la información y estructura de los datos se plantea un diseño completamente al azar con estructura factorial, con el fin de dar respuesta a los objetivos planteados inicialmente.

Diseño Factorial con 2 factores:

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \epsilon_{ijk} \begin{cases} i = 1, \dots, a \\ j = 1, \dots, b \\ k = 1, \dots, n \end{cases}$$

Dónde:

• Y_{ijk} : Valor de la temperatura máxima, debido a la i-ésima velocidad de corte, a la j-ésima profundidad de corte y a la k-ésima interacción. Por el j-ésimo nivel del factor B y la k-ésima interacción.

- μ : Media global, sin tener en cuenta los tratamientos.
- τ_i : Es el efecto de la i-ésima velocidad de corte, sobre el valor de la temperatura.
- β_j : Es el efecto de la j-ésima profundidad de corte, sobre el valor de la temperatura.
- $(\tau\beta)_{ij}$: Es el efecto debido a la interacción de primer orden entre la i-ésima velocidad de corte y la j-ésima profundidad de corte, sobre el valor de la temperatura.
- ϵ_{ijk} : Error aleatorio debido a factores no controlados o no controlables.

Supuestos del modelo

- Normalidad: $\epsilon_{ijk} \sim N(0, \sigma^2 I)$
- $E[\epsilon_{ijk}] = 0; \forall i, j, k.$
- Homocedasticidad: $\text{Var}[\epsilon_{ijk}] = \sigma^2 I; \forall i, j, k.$
- Independencia: $\text{Cov}[\epsilon_{ijk}, \epsilon_{i'j'k'}] = 0; \forall i \neq i', j \neq j', k \neq k'$

Hipótesis a contrastar

Específicamente, el interés se encuentra en probar la hipótesis para determinar si los tratamientos de los renglones y las columnas interaccionan.

$$H_0: (\tau\beta)_{ij} = 0 \text{ para todas las } i, j$$

$$H_1: \text{al menos una } (\tau\beta)_{ij} \neq 0$$

Análisis de varianza

Teniendo en cuenta que el análisis de varianza se realiza por medio del software estadístico R, que usa la función Rcmdr para el diseño factorial 2^2 . En la *Tabla 8* se muestra las variables y los tratamientos que se involucran para la estimación de los parámetros del anova.

Tabla 8. Análisis de varianza, diseño factorial de 2 factores.

FV	Suma de cuadrados	gl	Cuadrado medio	F_0	ECM
A tratos	SS_A	$a - 1$	$MS_A = \frac{SS_A}{a - 1}$	$F_0 = \frac{MS_A}{MS_E}$	$bn \sum_i \frac{A_i - \bar{A}}{a - 1} + \sigma^2$
B tratos	SS_B	$b - 1$	$MS_B = \frac{SS_B}{b - 1}$	$F_0 = \frac{MS_B}{MS_E}$	$bn \sum_i \frac{B_i - \bar{B}}{b - 1} + \sigma^2$
Interac- ciones	SS_{AB}	$(a - 1)(b - 1)$	$MS_{AB} = \frac{SS_{AB}}{(a - 1)(b - 1)}$	$F_0 = \frac{MS_{AB}}{MS_E}$	$n \sum_i \sum_j \frac{AB_{ij} - \bar{AB}}{(a - 1)(b - 1)} + \sigma^2$
Error	SS_E	$ab(n - 1)$	$MS_E = \frac{SS_E}{ab(n - 1)}$		σ^2
Total	SS_T	$abn - 1$			

Estadístico de Prueba

$$F_{cal} = \frac{MS_{AB}}{MS_E}$$

Regla de Decisión

Con un nivel de significancia $\alpha = 0.05$, se tiene Fcrit (0.05; (a-1)(v-1); av(n-1)).

El valor Fcrit se encuentra en las tablas de la distribución F-Snecor, con un nivel de significancia de 0,05 y los grados de libertad definidos anteriormente, con un

Si $F_{cal} > F_{crit}$ Se Rechaza H_0
Si $F_{cal} < F_{crit}$ No Se Rechaza H_0

Validación de Supuestos

- Para el supuesto de Normalidad, debido al tamaño de la muestra, se tiene un $n < 30$, por lo tanto e hará uso de la prueba formal Shapiro Wilks.

Las hipótesis a contrastar de interés son:

H_0 : La muestra procede de una población normal.
 H_a : La muestra no procede de una población normal.

En el desarrollo del test de normalidad propuesto por Shapiro, se necesita lo siguiente [14]:

1. Se ordena la muestra de menor a mayor
2. Se calcula el estadístico

$$W = \frac{1}{ns^2} \left[\sum_{i=1}^h a_{in} (w_{(n-i+1)} - w_{(i)}) \right]^2$$

Siendo s^2 la varianza muestral

$$h = \begin{cases} \frac{n}{2} & \text{si } n \text{ es par} \\ n - 1/2 & \text{si } n \text{ es impar} \end{cases}$$

Donde a_{in} es un valor tabulado y la distribución del estadístico W se encuentra también tabulado para cada nivel de significación. Finalmente la hipótesis de normalidad será rechazada cuando el valor W observado en la muestra, sea menor que el valor crítico dado en la tabla.

- Para el supuesto de Homogeneidad de varianza, se hará uso de la prueba formal de Levene, debido a que esta es robusta al supuesto de normalidad.

El estadístico de prueba de Levene se define como:

$$W = \frac{(N - k) \sum_{i=1}^k n_i (\bar{Z}_i - \bar{Z}_{..})^2}{(k - 1) \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (Z_{ij} - \bar{Z}_i)^2}$$

Donde Z_{ij} puede tener una de las siguientes tres definiciones:

1. $Z_{ij} |X_{ij} - \bar{X}_i|$ donde $\bar{X}_i$ es la media del i-ésimo subgrupo.
2. $Z_{ij} |X_{ij} - \hat{X}_i|$ donde $\hat{X}_i$ es la mediana del i-ésimo subgrupo.
3. $Z_{ij} |X_{ij} - \bar{X}_{i.}|$ donde $\bar{X}_{i.}$ es la media recortada al 10% del i-ésimo subgrupo.

$\bar{Z}_{..}$ es la media global de Z_{ij} y $\bar{Z}_i$ del i-ésimo subgrupo de los Z_{ij} .

La prueba de Levene rechaza la hipótesis de que las varianzas son iguales con un nivel de significancia α si $W > F_{\alpha, k-1, N-k}$ donde $F_{\alpha, k-1, N-k}$ es el valor crítico superior de la distribución F con k-1 grados de libertad en el numerador y N-k grados de libertad en el denominador a un nivel de significancia α . La prueba de Levene ofrece una alternativa más robusta que el procedimiento de Bartlett, ya que es poco sensible a la desviación de la normalidad. Eso significa que será menos probable que rechace una verdadera hipótesis de igualdad de varianzas sólo porque las distribuciones de las poblaciones muestreadas no son normales.

- Para el supuesto de independencia de los errores, se propone usar la prueba formal Wald y Wolfowitz que evalúa la hipótesis de que una sucesión de valores proviene de una muestra aleatoria a través de las rachas. El test contrasta la existencia o no de auto correlación de modo no paramétrico, es decir sin necesidad de conocer exactamente los parámetros que caracterizan el modelo.

Se define una racha como una sucesión de símbolos iguales entre dos distintos y se calculan respecto a la mediana, para ello:

1. Se consideran como 1 los valores mayores que la mediana, y 0 los menores y se eliminan los iguales
2. Se cuenta el número de rachas.

Para interpretar el sentido de las rachas es conveniente analizar el comportamiento de los residuos OLS (*ordinary least squares*) bajo auto correlación.

Para la realización de esta prueba, se procede a examinar la sucesión y se cuenta el número de rachas R dentro de ella. Se rechaza la hipótesis nula de aleatoriedad si el valor de R excede cae por fuera de la zona de rechazo dada por la distribución de referencia.

4.3.2 PRUEBA POST-ANOVA

Una vez que el ANOVA ha mostrado que un valor de F es significativo (rechazo de la hipótesis nula), se puede aplicar la prueba de comparación múltiple de Duncan, explicada en el marco teórico. El procedimiento es el siguiente:

- Se prueban las diferencias observadas entre las medias, empezando con la más grande contra la menor, la cual se compara con el rango mínimo de significación R_{α} .
- Después se calcula la diferencia de la mayor y la segunda menor y se compara con el rango mínimo de significación $R_{\alpha-1}$. Estas comparaciones se continúan hasta que todas las medias se han comparado con la media mayor.
- Este proceso se continúa hasta que se han considerado las diferencias entre todos los $a(a-1)/2$ pares de medias posibles.

5 RESULTADOS

5.1 RUGOSIDAD

5.1.1 RUGOSIDAD ANTES DEL MECANIZADO

Las mediciones fueron hechas a las doce réplicas y para cada uno se realizaron tres mediciones las cuales se promediaron, dado que la superficie de todas estas fue uniforme por su acabado de fábrica, todo esto para observar el cambio de rugosidad antes y después del mecanizado. Los parámetros que se usaron en el rugosímetro para las mediciones se muestran en la *Tabla 9*.

Tabla 9. Parámetros de rugosímetro.

Rango R_a	Cutoff	Recorrido	Velocidad de recorrido
0,1 – 2	0,8x5	4mm	0,5mm/seg

A continuación en la *Tabla 10* se muestra los valores de rugosidad promedio de la superficie inicial para cada replica y el intervalo de confianza con el 95%.

Tabla 10. Valores de rugosidad para cada replica.

Número de inserto	Número de mediciones	Promedio de rugosidad (μm)	Intervalo de confianza al 95%
1	3	0,74	$\pm 0,02$
2	3	0,39	$\pm 0,019$
3	3	0,58	$\pm 0,029$
4	3	0,6	$\pm 0,03$
5	3	0,45	$\pm 0,03$
6	3	0,48	$\pm 0,024$
7	3	0,47	$\pm 0,023$
8	3	0,79	$\pm 0,039$
9	3	0,58	$\pm 0,029$
10	3	0,40	$\pm 0,02$
11	3	0,53	$\pm 0,026$
12	3	0,42	$\pm 0,021$

Podemos observar que la rugosidad se encuentran entre 0,39 y 0,79 μm , entre estas dado a que algunas conservan un buen acabado superficial y otras presentan inicios de corrosión, aunque todas las muestras son tomadas de un mismo lote de material.

5.1.2 RUGOSIDAD DESPUÉS DEL MECANIZADO

Después de realizar el mecanizado a todas las réplicas variando las condiciones de corte encontramos que hubo cambios de rugosidad para cada condición de mecanizado establecida. Así lo muestra también *Mahapatra y Kumar [19]* quienes realizaron ensayos de mecanizado variando los parámetros de corte, obteniendo que a menor velocidad y a mayor profundidad de corte, la rugosidad superficial del material tiende a aumentar. En la *Tabla 11* se han promediado los valores de rugosidad de las réplicas en cada condición.

Tabla 11. Rugosidades promedio por cada condición establecida.

Velocidad de Corte (m/min)	Profundidad de corte (mm)	Rugosidad Promedio (μm)	Intervalo de confianza al 95%
90	1	1,61	$\pm 0,07$
120	1	2,21	$\pm 0,33$
90	2	2,32	$\pm 0,13$
120	2	2,1	$\pm 0,27$

Podemos notar que se presenta un valor mayor de rugosidad a una velocidad de corte de 90m/min y profundidad de 2mm mostrado en la *Tabla 11*. En esta condición tenemos un valor menor de velocidad y una profundidad mayor, que es el comportamiento que reporta en la literatura.

5.2 METALOGRAFIA

5.2.1 METALOGRAFIA ANTES DEL MECANIZADO

Se realizó un análisis metalográfico para una muestra de material antes del mecanizarlo, para tener referencia de su microestructura en caso de obtener cambios después del proceso de torneado.

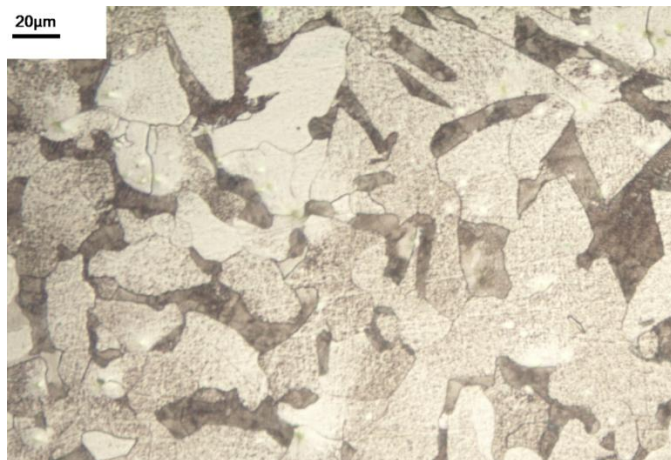


Figura 30. . Microestructura de acero SAE 1020 antes de maquinado. Con zoom de 250X.

En la Figura 30 se observa una típica microestructura de granos equiaxiales de ferrita como granos blancos y otros con una tonalidad más oscura de perlita.

5.2.2 METALOGRAFIA DESPUES DEL MECANIZADO

En las imágenes mostradas en la Figura 31 se muestran las fronteras de cada metalografía para cada condición de mecanizado, en las cuales se observa la microestructura del material, la región afectada por el mecanizado, una franja oscura perteneciente al recubrimiento de níquel y la parte gris perteneciente a la baquelita en la cual se embutió la muestra.

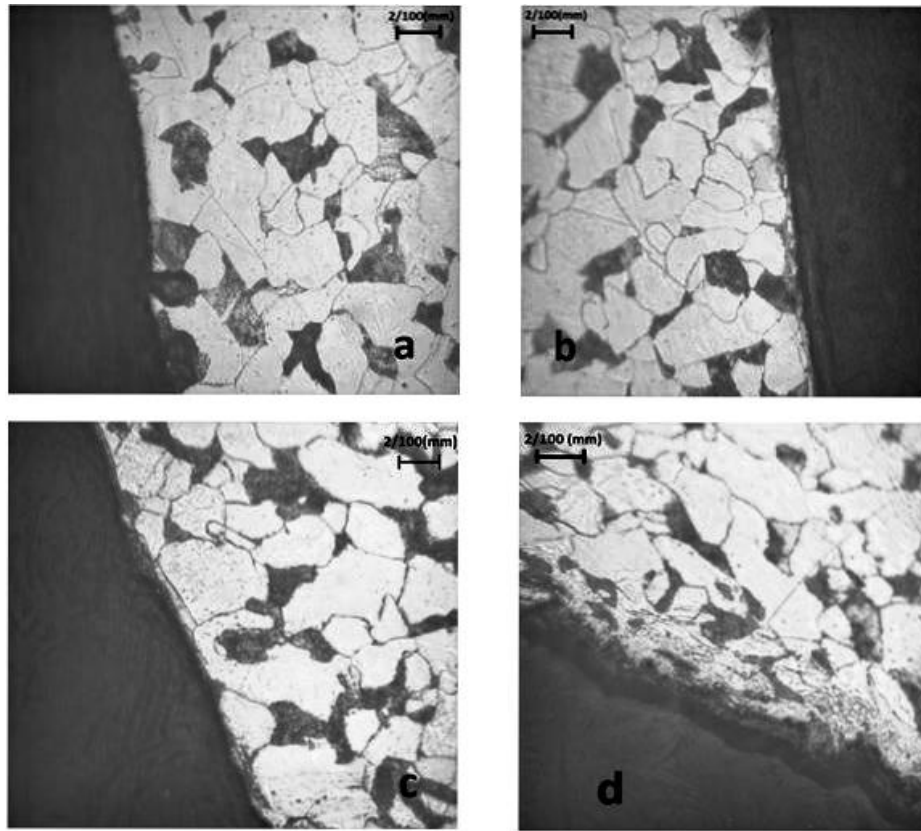


Figura 31. Metalografía a 400X de cada condición del material luego del mecanizado a) $V_c=90\text{m/min}$, $P_c=1\text{mm}$ b) $V_c=120\text{m/min}$, $P_c=1\text{mm}$ c) $V_c=90\text{m/min}$, $P_c=2\text{mm}$ d) $V_c=120\text{m/min}$, $P_c=2\text{mm}$

En la Figura 31(a) hasta la (c) se observa que la microestructura del material en la frontera y en el resto no se encuentra ningún cambio con respecto al material base ya que el tamaño de grano en estas superficies sigue siendo equiaxial al igual que la composición de la matriz. En la Figura 31(d) se encuentran cambios en la frontera mostrando evidencia de deformación plástica por la forma de granos alargados en la superficie afectada por el mecanizado, debido a la región de deformación tan estrecha no fue posible realizar mediciones de micro dureza.

5.3 TEMPERATURAS EN EL MECANIZADO

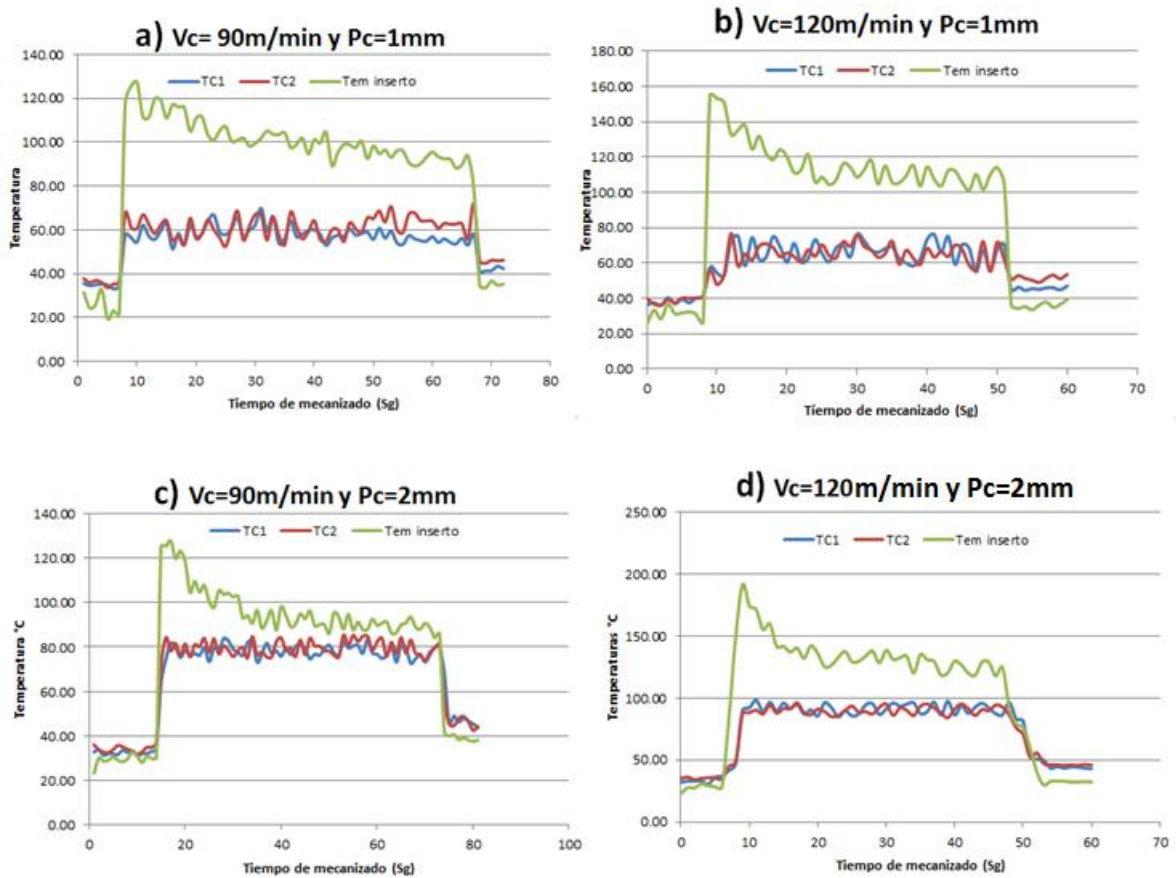


Figura 32. Temperaturas obtenidas para cada condición de mecanizado.

En la Figura 32 se muestran los resultados de la temperatura por cada condición. Con respecto a la temperatura generada en la pieza de trabajo se observa que esta no sobrepasó los 100°C para ninguna de las condiciones ensayadas, teniendo como temperatura máxima aproximadamente los 90°C para la condición ($V_c=120\text{m/min}$ y $P_c=2\text{mm}$).

Realizando una comparación con los resultados de *Wallbank y Da Silva [18]*, quienes encuentran que las temperaturas en la superficie de la pieza maquinada se estabilizan a los 30 segundos después del iniciado del corte obteniendo mediciones cada segundo y la temperatura final fue de 89°C en condiciones de mecanizado similares a este trabajo (Figura 33). En las pruebas realizadas, la temperatura promedio de estabilización fue de 80°C aproximadamente y el tiempo de estabilización a partir del inicio de corte fue de 10 segundos y de una manera casi inmediata lo que determina que la respuesta a las mediciones del dispositivo construido es eficiente comparado con el método de radiación usado en la literatura.

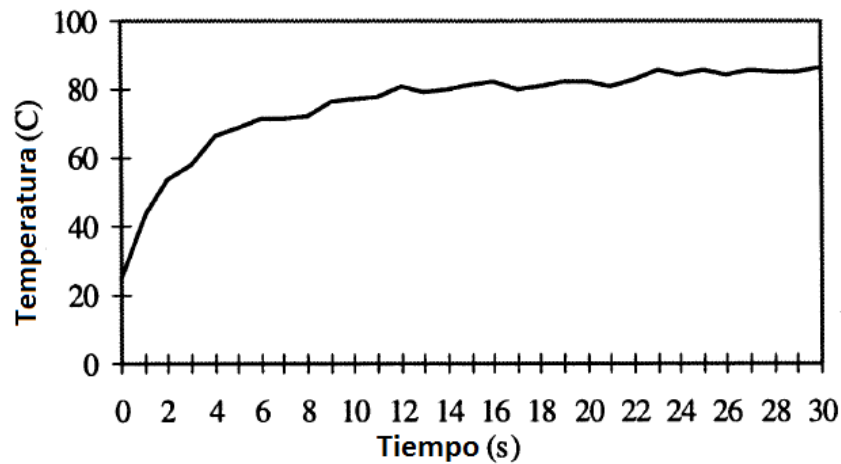


Figura 33. Temperatura de la pieza durante el corte a 0.15 mm/rev y a 1 y 3 mm de profundidad [18].

Por otra parte, en la temperatura registrada en la herramienta de corte, se obtuvieron unos picos significativos al inicio de cada prueba que oscilan entre 120-190°C, logrando una estabilización a lo largo del mecanizado en un tiempo de 30 segundos. La temperatura registrada cuando se logra la estabilización es mucho mayor a la temperatura de la pieza de trabajo. Resultado el cual es muy similar al estudio que encuentra *Wallbank y Da Silva* [18] y con una temperatura en la herramienta de 113°C.

Cabe resaltar que en la condición de mecanizado con $V_c=120\text{m/min}$ y $P_c=2\text{mm}$ las temperaturas en el inserto y en la pieza de trabajo fueron mayores que con las otras pruebas realizadas. Se asocia a la energía que está involucrada con la relación velocidad de la viruta, el máximo espesor de ésta y la fuerza de fricción [19], pues esta condición es la más crítica en niveles de velocidad y profundidad de corte de las pruebas realizadas. Los picos obtenidos en el inicio de la medición de las temperaturas en la herramienta de corte se relacionan al choque entre la pieza y la herramienta cuando empieza el mecanizado hasta que se logra una estabilización en el corte y es donde también se estabiliza la temperatura.

5.4 EFECTO DE LA VELOCIDAD DE CORTE Y PROFUNDIDAD DE CORTE EN LAS TEMPERATURAS GENERADAS EN HERRAMIENTA Y PIEZA

5.4.1 TEMPERATURAS EN HERRAMIENTA Y PIEZA CON RESPECTO A LA PROFUNDIDAD DE CORTE

Como se muestra en la Figura 34, la profundidad de corte también hace su aporte en la generación de temperatura, se varió en dos niveles, obteniendo que para el nivel de mayor profundidad, la temperatura fue mayor. La explicación es que a mayor profundidad hay una mayor fricción, es como lo determina *Kumar y Mahapatra* [19] en sus resultados y determinan que al tener una mayor profundidad de corte se aumenta la fuerza de mecanizado ocasionando también una generación de más calor.

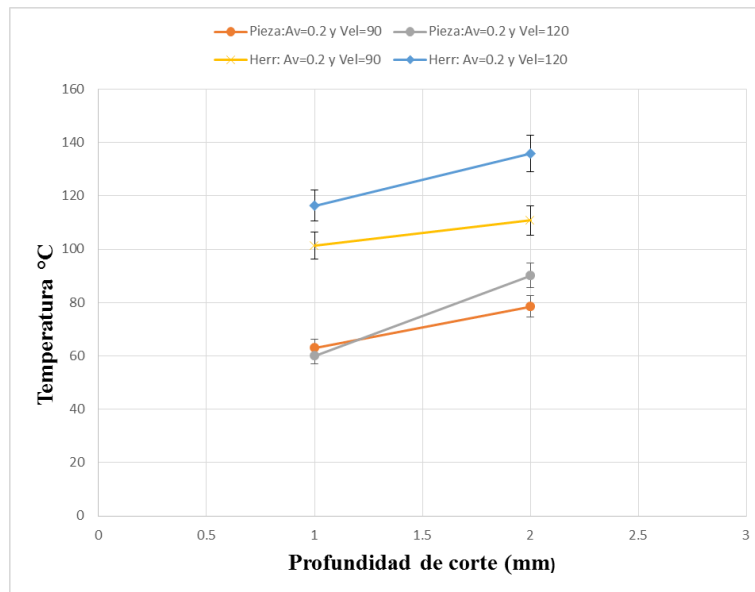


Figura 34. Efecto de la profundidad de corte con las temperaturas máximas en cada condición.

5.4.2 TEMPERATURA EN LA HERRAMIENTA Y PIEZA CON RESPECTO A LA VELOCIDAD DE CORTE

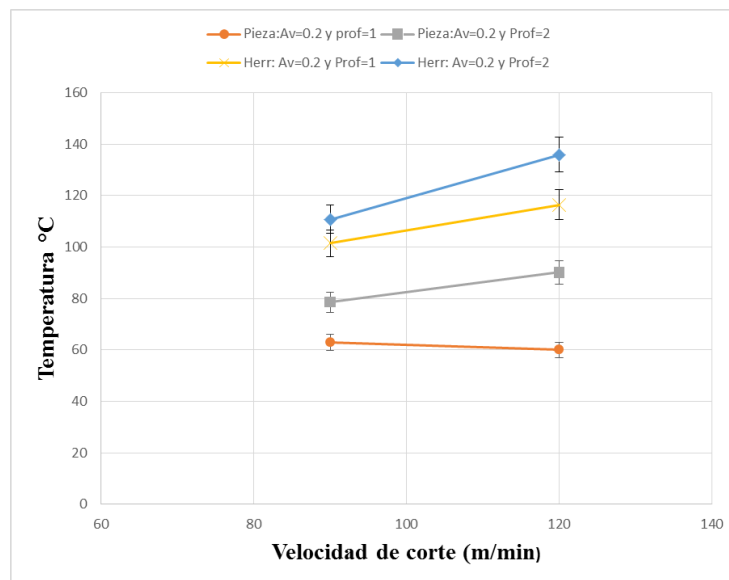


Figura 35. Efecto de la velocidad de corte con las temperaturas máximas en cada condición.

Relacionando la temperatura con la velocidad de corte en la Figura 35 se observa que hay una tendencia a incrementar la temperatura con el aumento de la velocidad. *Wallbank y Da Silva [18]* en sus métodos de predicción encuentran que uno de los parámetros más significativos en las temperaturas es la velocidad de corte, como también los autores *Chao*

et al referenciados por [33] basando de un método analítico para estimar la temperatura de corte, encuentra los valores de temperatura contra velocidad para distintos materiales maquinados (entre ellos acero), y se observa que entre mayor sea la velocidad de corte, mayor será la temperatura generada. Concluye también que el avance tiene una relación similar en las temperaturas pero su efecto no es tan pronunciado como la velocidad de corte.

Tomando en cuenta las conclusiones de otros autores como *Cotterell y O'Sullivan* [3], encuentran en sus resultados experimentales que la temperatura en la superficie maquinada decrece con el aumento en la velocidad de corte, a razón de la tasa de remoción de material llevándose la mayor cantidad de calor en la viruta. También afirman que a mayor desgaste de la herramienta de corte la temperatura y fuerza de corte aumentan, viéndose reflejado también en una menor calidad de acabado superficial. En esta investigación los resultados se encuentran a favor con respecto a lo que nombra la literatura que la temperatura en la superficie maquinada fue menor cuando velocidad de corte era mayor. En otro punto de vista se encontró que la temperatura en la herramienta fue mayor cuando la velocidad se aumenta debido a la cantidad de material removido.

De acuerdo a los resultados presentados se considera que la variable con más influencia en el aumento de la temperatura en la superficie del material es la profundidad de corte, por tener asociada a ella factores como, mayor fricción y mayor fuerza y por ende genera más calor, aunque la velocidad también tiene un gran aporte.

5.5 DESGASTE DE LA HERRAMIENTA

Con la ayuda de un microscopio estéreo se tomaron las siguientes fotografías con un aumento de 5X del desgaste obtenido en la herramienta de corte.

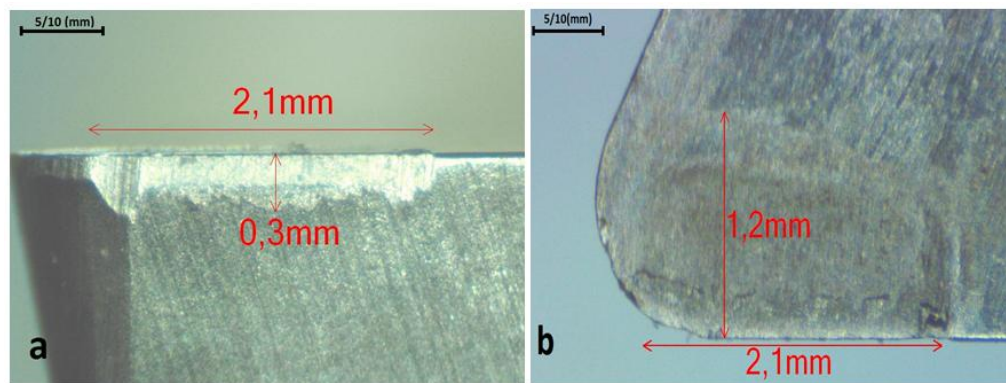


Figura 36. Condición $V_c=120\text{m/min}$ y $P_c=2\text{mm}$. (a) Desgaste del flanco, (b) formación de cráter en cara superior.

En la Figura 36 se muestra el resultado del desgaste en una de las puntas de inserto usadas, sometida a la condición de mecanizado más crítica que es $V_c = 120 \text{ m/min}$ y $P_c = 2\text{mm}$, en el flanco se observan rayas causadas por abrasión.

Para el desgaste en el flanco (Figura 36-a) basándose en la norma ISO 3685 y con respecto a los tipos de desgaste mostrados en la Figura 28 se observa que se genera un $VB_B \text{ max} = 0.3\text{mm}$. De esta manera si el $VB_B \text{ max}$ excediera los 0.6mm de ancho, la herramienta nos produciría un mal acabado en la superficie del material mecanizado y así mismo la vida útil de la herramienta terminaría [31].

Lin y Khrais [34], realizaron ensayos con herramientas recubiertas de TiAlN PVD aplicado sobre carburo cementado y material de trabajo acero AISI 4140 realizaron cortes a diferentes velocidades entre 210 m/min y 410 m/min , y midieron la vida de la herramienta respecto al ancho de $VB_B \text{ max}$ (Figura 37). Encontraron que a medida que la velocidad de corte es mayor, la vida útil disminuye considerablemente, además de que el corte sin líquido refrigerante da mayor vida de la herramienta especialmente a 210m/min , a mayores velocidades de corte la vida es similar bajo las dos condiciones. Además que con el uso de refrigerante se encontraron micro-mecanismos de desgaste como micro-fatiga aportando mayor desgaste en la herramienta.

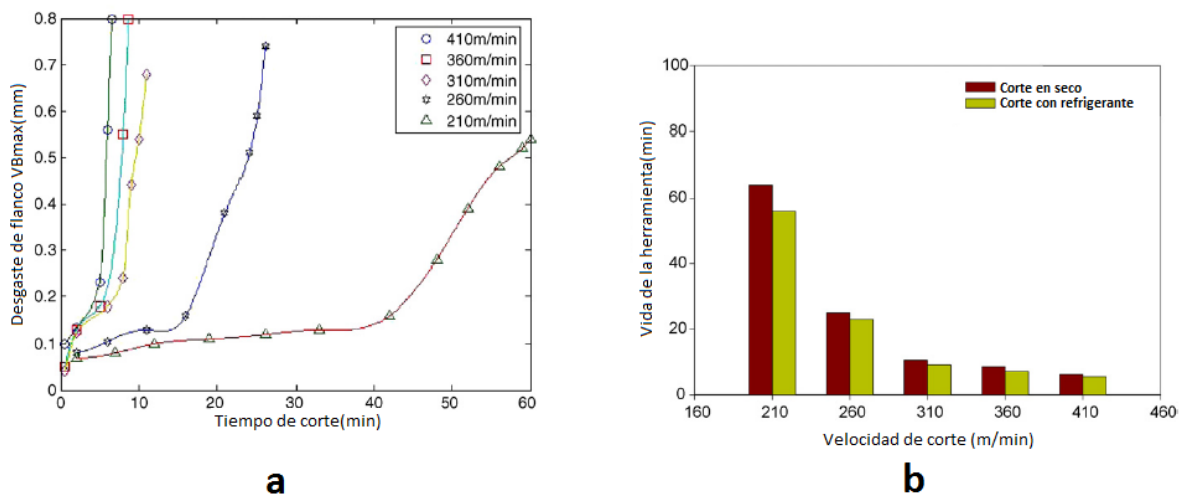


Figura 37. a) Ancho de flanco en función del tiempo de corte bajo corte en seco, b) Vida de la herramienta bajo el corte con fluido de corte y seco [34].

En la Figura 36-b, se muestra la cara superior (superficie de desprendimiento) de la punta de inserto afectada por la fricción del desprendimiento de viruta, causando así la iniciación de la formación de cráter. En este inserto se obtuvo una mayor dimensión de cráter, lo cual se le atribuye un poco a la morfología de la viruta, pues está siempre fue continua durante la prueba, de esta misma manera lo relaciona [29] cuando dice que el flujo de viruta en

esta zona genera presión dependiendo de su área, además de la velocidad y profundidad de corte más críticas de los demás experimentos.

A continuación se muestra la metalografía del desgaste obtenido en la herramienta sometida a las otras tres condiciones de mecanizado. Observando desgastes de menor magnitud, comparado con la herramienta de la Figura 36.

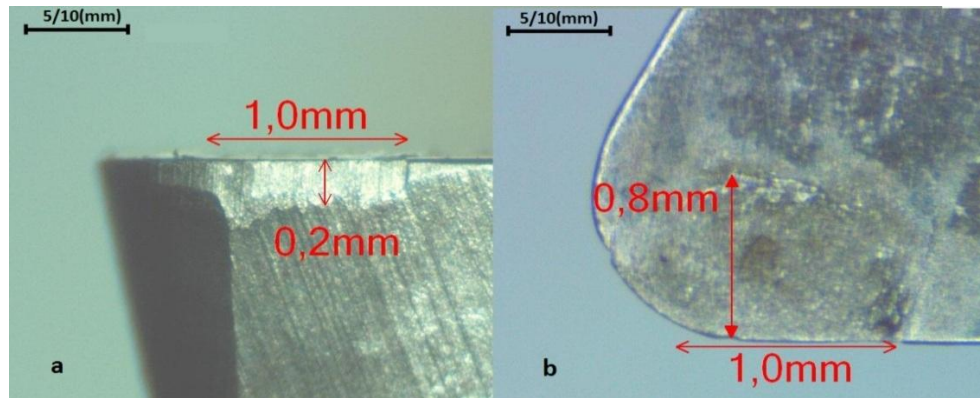


Figura 38. Desgaste de la herramienta con $V_c=120\text{m/min}$, $P_c=1\text{mm}$. a) Vista lateral flanco, b) Cara superior cráter.

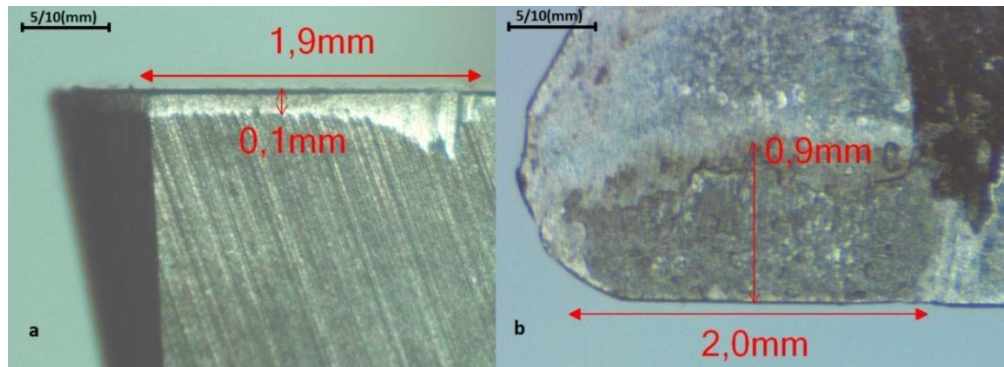


Figura 39. Desgaste de la herramienta con $V_c=90\text{m/min}$, $P_c=2\text{mm}$. a) Vista lateral flanco, b) Cara superior cráter.

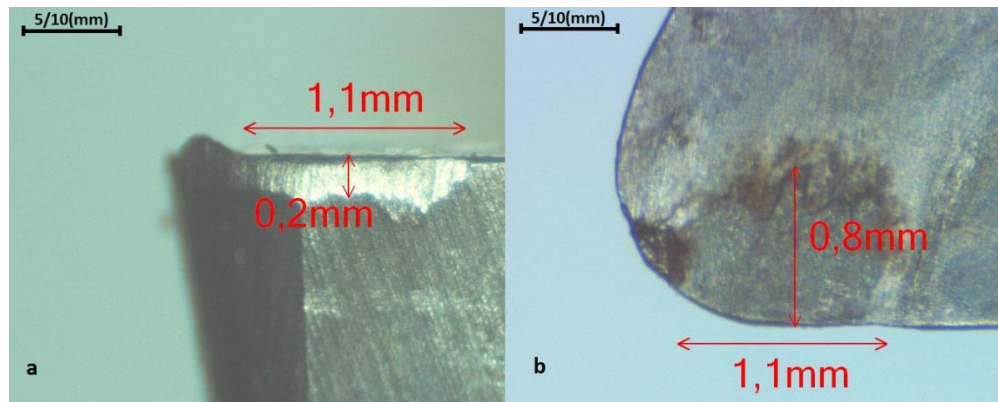


Figura 40. Desgaste de la herramienta con $V_c=90\text{m/min}$, $P_c=1\text{mm}$. a) Vista lateral flanco, b) Cara superior cráter.

5.5.1 RELACIÓN DE LAS TEMPERATURAS CON EL DESGASTE Y LA RUGOSIDAD

En la Figura 41 muestra una gráfica que relaciona el desgaste de la herramienta en el flanco con la temperatura generada en la misma, se encuentra que al aumentar el desgaste del flanco se presenta aumento en la temperatura, a excepción de la condición ($V_c=90\text{m/min}$ y $P_c=2\text{mm}$), este comportamiento se cree que es a razón al deterioro del arista del flanco de corte lo que aumenta el área de contacto y genera más fricción. Lo que también afirma [10], que al realizar pruebas en material AISI 316L con herramientas con desgaste de flanco, aumenta la temperatura en un 29% concluyendo que la temperatura está relacionada directamente con el desgaste en la herramienta y si el ancho de flanco supera los 0.4 mm en adelante la las variaciones de temperatura son poco significativas.

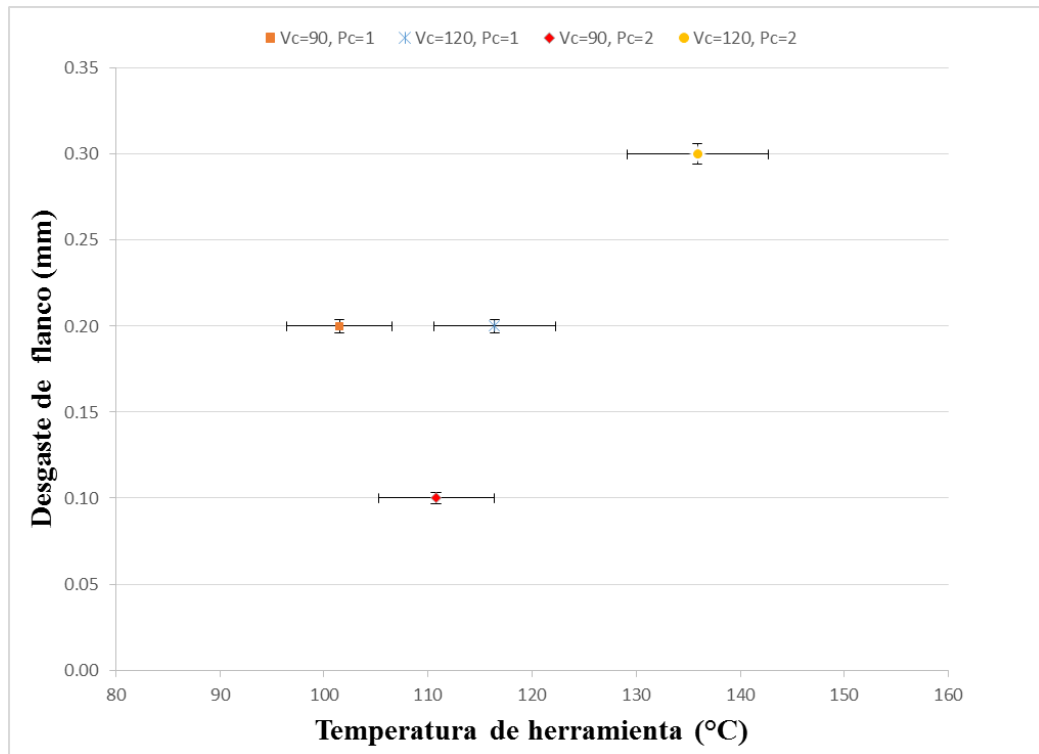


Figura 41. Relación del desgaste de la herramienta de corte con las temperaturas obtenidas.

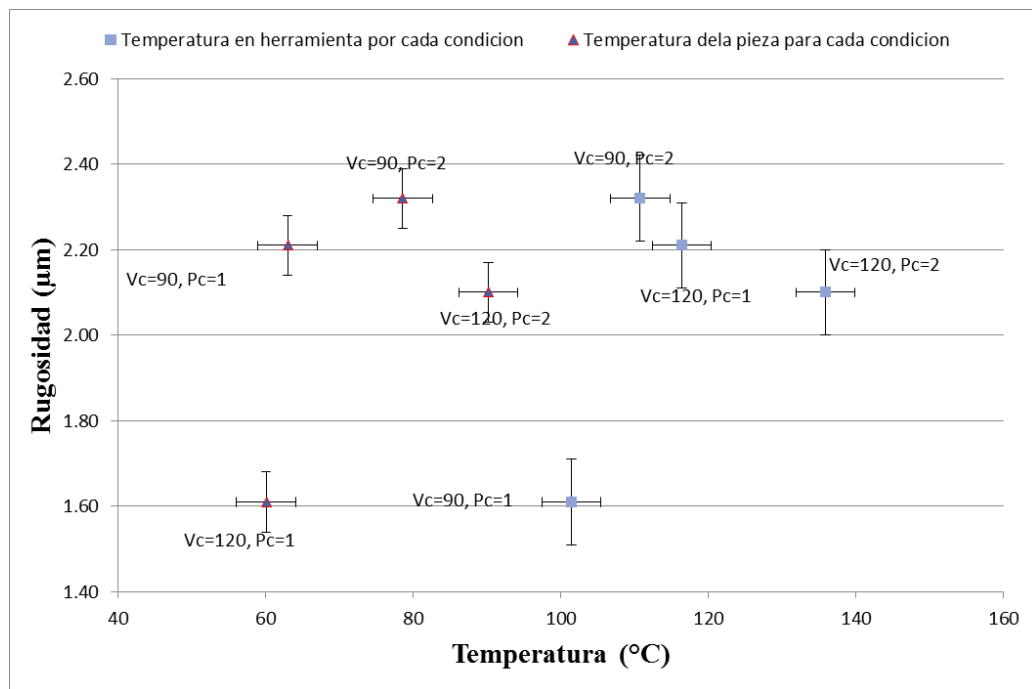


Figura 42. Rugosidad superficial en la pieza de trabajo con respecto a las temperaturas máximas generadas.

En la rugosidad generada respecto a las temperaturas, en la Figura 42 se muestra resultados dispersos asociando que la temperatura en la herramienta y en la pieza no genera influencias notorias en el acabado superficial de la pieza de trabajo. De otra manera en lo que si se encuentra una mayor rugosidad es en la condición $V_c=90$ y $P_c=2$ siendo una condición de baja velocidad y avance alto comparado con la otras condiciones usadas en este trabajo, lo que fue igual para las temperaturas de pieza y herramienta. Blanco *et al* [35] encuentran una disminución en la rugosidad con la disminución de la profundidad de corte, y más aún si esta es combinada con velocidades de corte altas dejando acabados finos.

5.6 VALORES GENERALES OBTENIDOS

A continuación en la Tabla 12 se muestra los valores de todas las variables involucradas en el proceso de mecanizado que se obtuvieron en las pruebas llevadas a cabo. Donde se observa que en la condición $V_c=120$, $P_c=2$ se presentan los valores más altos en temperatura de la pieza, temperatura de la herramienta y desgaste en el flanco, Mientras que la mayor rugosidad se obtuvo en la condición $V_c=90$, $P_c=2$.

Tabla 12. Valores obtenidos en las pruebas.

Condición de mecanizado	Temperatura de pieza (°C)	Int. de confianza 95%	Temperatura de inserto (°C)	Int. confianza 95%	Desgaste de flanco (mm)	Int. confianza 95%	Rugosidad de pieza (μm)	Int. confianza 95%
Vc=90, Pc=1	63	±4,2	101,48	±3	0,2	±0,01	2,21	±0,08
Vc=120, Pc=1	60,11	±4,9	116,41	±4,3	0,2	±0,01	1,61	±0,07
Vc=90, Pc=2	78,61	±2,3	110,78	±4,1	0,1	±0,01	2,32	±0,04
Vc=120, Pc=2	90,02	±2,3	135,91	±2,9	0,3	±0,01	2,11	±0,05

5.7 RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO ACERCA DEL EFECTO DE LA TEMPERATURA

ANÁLISIS DE VARIANZA

Tabla 13. Varianza de los experimentos.

FV	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Vel c	1	1385,14	1385,14	1075,197	4,10E-13
prof_c	1	541,38	541,38	420,236	1,05E-10
Vel c: Prof. c	1	34,25	34,25	26,587	0,0002385
Residuals	12	15,46	1,29		

$F_{\text{tab}} = 26,587$

$F_{\text{crit}} = F(0.05; 1; 11) = 4,84$

Por tanto $F_{\text{tab}} > F_{\text{crit}}$

De acuerdo a la *Tabla 13* se puede decir que existe evidencia suficiente para rechazar H_0 , es decir que la interacción entre los factores es significativa, por lo tanto la velocidad de corte y la profundidad de corte tienen efectos sobre la temperatura máxima registradas en el proceso de torneado en seco.

De estas dos variables que tienen efectos significativos en la temperatura máxima tiene más influencia la velocidad de corte dado que tiene el menor valor P comparado con un nivel de significancia $\alpha = 0.05$.

6 CONCLUSIONES

A partir de los métodos para la medición de la temperatura realizados en este trabajo, los métodos para el análisis de los resultados, las herramientas y los resultados obtenidos se puede concluir lo siguiente.

- En la fabricación de la junta rotativa como una metodología para la obtención de los datos de temperatura, el uso de escobillas en esta, sometidas a fricción con los anillos y el uso de termopares tipo k, existía la preocupación que hubiese variaciones prominentes o interferencias con respecto a la transmisión de la información desde el termopar, a través de la junta rotativa y por ultimo a la tarjeta de adquisición. Lo que no fue así, obteniendo datos con variaciones moderadas y lógicas con respecto a las pérdidas generadas en el dispositivo que concuerdan y fueron aproximadamente corregidas en la calibración de este. Además se presentó una estabilización temprana de la temperatura medida en los experimentos.
- Se observó que las temperaturas generadas en la pieza de trabajo no sobrepasaron los 100 °C, el acero SAE 1020 a esas temperaturas no genera cambios micro estructural en la superficie afectada. Aunque en una de las condiciones de mecanizado con una velocidad de corte de 120m/min, una profundidad de 2mm y un avance de 0,2 mm/rev mostró un cambio en la superficie comparado de las demás, cuando se realizó el análisis de la metalografía observando rastros de deformación plástica.
- Se observó que la velocidad de corte es una variable bastante influyente en el aumento de temperatura de herramienta, pues de acuerdo a esta se encontró asociada una de las variables de respuesta importante como es el desgaste de la herramienta al medir el ancho del flanco, concluyendo que cuanto más alta sea la velocidad de corte, se estará reduciendo la vida de la herramienta.
- La profundidad de corte es una variable influyente en la generación de calor en la pieza de trabajo, puesto que con esta se ven involucradas variables como la fricción y fuerza que aunque esta última no se la haya estudiado, tiene mucho que ver con el fenómeno, que entre mayor sea el espesor de la viruta, mayor será la energía involucrada en el proceso.
- La vida del inserto aumenta con velocidades inferiores combinado con profundidades bajas, pues en las pruebas de este trabajo se pudo evidenciar que esto reflejado en el desgaste tuvo una influencia baja, ya que para poder obtener un

efecto notorio se tendría que someter a mucho trabajo continuo en estas condiciones.

- En cuanto a la rugosidad superficial de la pieza mecanizada se notaron mayores valores de ésta cuando la velocidad fue baja y los de profundidad de corte fue alta. Por tanto, cuanto mayor sea la profundidad ocurrirá más fricción entre herramienta y pieza presentándose mayor rugosidad.

7 RECOMENDACIONES

Para una mejor precisión en la obtención de los datos de temperatura se recomienda el uso de una junta rotativa a base de mercurio que se encuentra en el mercado, ya que brindan una mejor eficiencia en la transmisión de datos.

La utilización de un método auxiliar como una cámara termografica para medir la temperatura en la superficie de la pieza mecanizada, serviría como soporte y comparación con los datos obtenidos mediante la junta rotativa.

Usar torno CNC para mejorar la precisión en cuanto a los parámetros de corte, un mejor control de ellos y contar con una mayor rigidez en el montaje y el sistema en general.

8 ESTUDIOS FUTUROS

Algunos de los estudios futuros basados en este podrían ser:

Realizar medición de fuerzas de corte, combinar los tres parámetros de corte y relacionarlas con las temperaturas alcanzadas, ya que este parámetro tiene gran influencia en cuanto a todas las variables de respuesta como son el desgaste y la rugosidad.

Con las temperaturas obtenidas y los parámetros usados en este trabajo se podría realizar un modelo en elementos finitos que simule y compruebe los resultados obtenidos ahora y así dar soporte a investigaciones futuras.

9 BIBLIOGRAFIA

- [1] F. J. Trujillo, "Análisis paramétrico del mecanizado en seco de la aleación UNS A97075," Málaga (España) , Tesis doctoral 2013.
- [2] R. E. Ávila, "Comparación de torneado húmedo y seco con la utilización de insertos de la serie GC 400 de SANDVIK," Mexico, Tesis maestría 2004.
- [3] M.cotterell D. O'Sullivan, "Temperature measurement in single point turning," Elsevier, pp. 301-308, 2001.
- [4] D. Ararat, Evaluación del desgaste de insertos de corte de acero h13 con recubrimiento duro de nitruro de titanio cromo, 2013.
- [5] L. R. A. Fernández, Análisis por el método de elementos finitos de modelo simplificado de corte en aleaciones ligeras de interés aeroespacial, 2009, Tesis.
- [6] J. M. Moralejo, Estudio paramétrico del proceso de corte ortogonal mediante el método de los elementos finitos.
- [7] M. Rodríguez, "Solución de la ecuación de energía para la determinación de los campos de temperaturas en el corte ortogonal," energética, vol. Vol. XXIII, no. 1, pp. 53-60, Septiembre 2001.
- [8] Gustavo M. Flores, Diego Vicente Rogelio l. Hecker, Sistema para el monitoreo de fuerza y temperatura en torneado, 2011.
- [9] J. Martínez Mercado, Análisis termomecánico mediante elementos finitos de procesos de torneado, 2011.
- [10] N. C. Calvo, Análisis termomecánico de la influencia del desgaste geométrico de las herramientas en procesos de corte ortogonal de aceros inoxidables austeníticos, 2010.
- [11] S. Kalpakjian, Manufactura, ingeniería y tecnología, Cuarta ed., GUillermo rujano Mendoza, Ed. Mejico, Mexico: Pearson, 2002.
- [12] A. Garay Araico, L M^a. Iriarte Gurutzeta, P.J. Arrazola Arriola D. Soler Mallol, Incertidumbre en la medición de temperatura en el corte ortogonal de aleaciones de Titanio.

- [13] D. Montgomery., Diseño y análisis de experimentos. México DF: grupo editorial iberoamérica, 2002.
- [14] Siqueiros, Aplicación de la Metodología de Superficies de Respuesta, para el Mejoramiento, 2004.
- [15] J. C., Ira, I. R. & Rojas Correa, "Estudio de potencia de pruebas de homogeneidad de varianza," Revista Colombiana de Estadística, pp. 57–76, 2006.
- [16] R. H. & Bautista Mendoza. (2002) Diplomado Probabilidad y Estadística Fundamental, para no. [Online]. <http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/ciencias/2000352/>
- [17] D. Umbrello, S. Beccari , F. Micari L. Filice a, "On the FE codes capability for tool temperature calculation in machining processes," Journal of Materials Processing Technology, pp. 286-292, January 2006.
- [18] J Wallbank, M. B. Da Silva, "Cutting temperature: prediction and measurement methods—a review," Materials Processing Technology, pp. 195-202, November 1999.
- [19] M.M. Mahapatra, P.K. Jha A. Kumar, "Effect of machining parameters on cutting force and surface roughness of in situ Al–4.5%Cu/TiC metal matrix composites," Measurement, pp. 325-332, 2014.
- [20] López, Determinación de los factores que influyen en el desempeño de los insertos de la serie 4000 de Sandvik en un proceso de torneado en seco para acero inoxidable tipo 304 y acero aleado AISI 4140, 2004.
- [21] W. Hernández L. González, Efecto del volumen de metal cortado y de la velocidad de corte en el desgaste de la herramienta durante el torneado de alta velocidad del acero AISI 1045, Enero 2011.
- [22] R. Pérez Rodríguez L.W. Hernández-González, "Estudio del rendimiento del torneado de alta velocidad utilizando el coeficiente de dimensión volumétrica de la fuerza de corte resultante," revista de metalurgia, pp. 245-256, 2013.
- [23] Y. T. Morales, "Comportamiento del desgaste del flanco en el torneado en seco de alta velocidad del acero AISI 316L," Ingeniería Mecánica, pp. 238-245, 2013.
- [24] SACK. (2014, Aug.) Scribd. [Online]. <http://es.scribd.com/doc/205173298/Ficha->

- [25] Brassinter. (2014, June) Insertos para torneado. [Online]. http://www.brassinter.com.br/downloads/pastilhas_torneamento.pdf
- [26] Ph.D E. Isakov, Cutting data for turning of steel, 2009.
- [27] United Equipment Accessories, Inc. (2014, July) United Equipment Accessories, Inc. [Online]. <http://www.uea-inc.com/products/slip-rings>
- [28] LabVIEW. (2014, Aug.) Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench. Plataforma y entorno de desarrollo para diseñar sistemas, con un lenguaje de programación visual gráfico.
- [29] M. Nouari B. Haddag, "Tool wear and heat transfer analyses in dry machining based on multi-steps numerical modelling and experimental validation," *Wear*, pp. 1158-1170, 2013.
- [30] Caswell, The Caswell Plating Manual, Version X, Pags 41-52.
- [31] Internacional Standard, Tool-life testing with single-point turning tools, 1993.
- [32] A. F. Navarro, I. Hernandez, "Evaluación de las temperatura en un proceso de torneado en seco," Universidad Del Valle, Cali, Informe final 2014.
- [33] M. P. Groover, "Operaciones de maquinado y maquinas herramientas", fundamentos de manufactura moderna. Mexico, Mexico: Pearson educacion, 1997, ch. 23, pp. 595 - 645.
- [34] Y.J. Lin Samir K. Khrais, "Wear mechanisms and tool performance of TiAlN PVD coated inserts during machining of AISI 4140 steel," *Wear*, pp. 64-69, 2007.
- [35] J.M. Blanco, L. Iurman y D. Ziegler N.E. Mazini, "Relación entre la rugosidad y las variables de mecanizado en una operación de torneado con insertos," IV Coloquio Latinoamericano de Fractura y Fatiga, pp. 475-482, 2000.
- [36] Balzers. Youtube. [Online]. <http://www.youtube.com/watch?v=7OPmnbr1clQ>
- [37] P.J. Arrazola, "The effect of machinability on thermal fields in orthogonal cutting of," *Manufacturing Technology*, no. 57, pp. 65-68, 2008.

- [38] S. Basavarajappa R. Suresh, "Machinability investigations on hardened AISI 4340 steel using coated carbide insert," *Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, vol. 33, pp. 75–86, 2012.
- [39] S. Basavarajappa R. Suresh, "Some studies on hard turning of AISI 4340 steel using multilayer coated carbide tool," *Measurement*, 2012.
- [40] M. Chen, S. Kanti Sikdar, "Relationship between tool flank wear area and component forces in single point turning," *Journal of Materials Processing Technology*, no. 128, pp. 210–215, 2002.
- [41] R. O. & Osuna Kuehl, "Diseño de experimentos: principios estadísticos de diseño y análisis," Thomson Learning, pp. 175–231, 2001.
- [42] Cid, *Cinetica de disolucion farmacocinetica biodisponibilidad*, 1992.
- [43] J. Zambrano, *Caracterización de muestras planas de acero inoxidable austenitico 316 l mediante espectroscopía ultrasónica*, 2009.
- [44] L. B. Varela Jiménez D. A. Flórez Orrego, "effect of the variation of cutting parameters in surface integrity in turning processing of an aisi 304 austenitic stainless steel," pp. 4340 - 446, 2010.

ANEXO A

PLANOS DE JUNTA ROTATIVA

Se adjunta um documento adicional donde se muestran los planos de dispositivo de medicino (Junta rotativa).

Hacemos constar que la información que se encuentra en este documento fue leída, es totalmente veraz y va acorde con los objetivos del proyecto.

John Jairo Coronado Marín
Director del proyecto

Uriel Albeiro Noguera Peña
Estudiante pregrado

