UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

TEMA:

"ANÁLISIS DE LA EVOLUCIÓN DEL DESGASTE EN EL FLANCO DE LA HERRAMIENTA DE CORTE PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL MECANIZADO EN MATERIALES METÁLICOS."

Trabajo de titulación previo a la obtención del título en Ingeniero en Mecatrónica

Línea de investigación: Producción Industrial y tecnología sostenible.

AUTOR:

Evelin Fernanda Gallegos Morales

DIRECTOR:

PhD. Fernando Renato Ramírez Paredes

Ibarra – Ecuador 2026

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
DIRECCIÓN DE BIBLIOTECA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO	
APELLIDOS Y NOMBRES:	Gallegos Morales Evelin Fernanda

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	Análisis de la evolución del desgaste en el flanco de la herramienta de corte para la optimización del mecanizado en materiales metálicos.
AUTOR (ES):	Gallegos Morales Evelin Fernanda
FECHA: DD/MM/AAAA	26/08/2026
PROGRAMA:	■ **PREGRADO** ☐ **POSGRADO**
TITULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero en Mecatrónica
DIRECTOR /ASESOR:	PhD. Fernando Ramírez / MSc. Víctor Erazo

2. CONSTANCIAS

El autor (es) manifiesta (n) que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto la obra es original y que es (son) el (los) titular (es) de los derechos patrimoniales, por lo que asume (n) la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá (n) en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 26 días del mes de agosto de 2026

EL AUTOR:

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
EVELIN FERNANDA GALLEGOS MORALES

Nombre: Gallegos Morales Evelin Fernanda

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Ibarra, 26 de agosto de 2026

PhD. Fernando Renato Ramírez Paredes

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICA:

Haber revisado el presente informe final del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que se ajusta a las normas vigentes de la Universidad Técnica del Norte; en consecuencia, autorizo su presentación para los fines legales pertinentes.

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
FERNANDO RENATO RAMIREZ PAREDES

(f)……

PhD. Fernando Renato Ramírez Paredes
C.C.: 1709992703

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR

El Comité Calificado del trabajo de Integración Curricular "ANÁLISIS DE LA EVOLUCIÓN DEL DESGASTE EN EL FLANCO DE LA HERRAMIENTA DE CORTE PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL MECANIZADO EN MATERIALES METÁLICOS" elaborado por EVELIN FERNANDA GALLEGOS MORALES, previo a la obtención del título de INGENIERO EN MECATRÓNICA, aprueba el presente informe de investigación en nombre de la Universidad Técnica del Norte:

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
FERNANDO RENATO RAMIREZ PAREDES

(f)……

PhD. Fernando Renato Ramírez Paredes
C.C.: 1709992703

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
VICTOR ALFONSO ERAZO ARTEAGA

(f)……

MSc. Víctor Alfonso Arteaga Erazo
C.C.: 1719188029

DEDICATORIA

Dedico este trabajo, en primer lugar, a Dios, por brindarme la fortaleza, la sabiduría y la oportunidad de culminar una etapa tan importante de mi vida. A mis padres, por su amor, esfuerzo y apoyo incondicional a lo largo de mi formación académica. Gracias por creer siempre en mí, por sus consejos y por motivarme a seguir adelante incluso en los momentos más difíciles. A mi familia, quienes con su comprensión, paciencia y palabras de aliento fueron un pilar fundamental durante este proceso. Este logro también les pertenece, pues su apoyo constante me impulsó a alcanzar esta meta. Finalmente, dedico este trabajo a todas las personas que, de una u otra manera, confiaron en mis capacidades y me motivaron a crecer tanto en lo personal como en lo profesional.

Evelin Fernanda Gallegos Morales

AGRADECIMIENTO

Expreso mi sincero agradecimiento a la Universidad Técnica del Norte, por la formación académica recibida y por brindarme las herramientas necesarias para mi desarrollo profesional. Agradezco de manera especial al MSc. Patricio Javier Fuentes Rosero, Técnico encargado del Laboratorio de Investigación, Desarrollo e Innovación en Nuevas Tecnologías de Diseño, Manufactura y Producción (LABINTECDIMP) de la Escuela Politécnica Nacional EPN, por su valioso apoyo técnico, su disposición y la colaboración brindada durante el desarrollo de los ensayos experimentales, contribuyendo de manera significativa a la realización de esta investigación. Asimismo, expreso mi reconocimiento al MSc. Jhon Alexander Luna Jaén, Técnico de Laboratorio del área de Ciencia de Materiales perteneciente a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, por su orientación en el manejo del microscopio y del software de medición, así como por compartir sus conocimientos y brindar un acompañamiento constante durante la evaluación del desgaste de flanco. Finalmente, agradezco a mi director y asesor de trabajo de titulación, a los docentes que formaron parte de mi preparación académica y a todas las personas que, con su apoyo, orientación y confianza, hicieron posible la culminación de esta investigación.

Evelin Fernanda Gallegos Morales

RESUMEN

El desgaste de la herramienta de corte constituye uno de los principales factores que influyen en la calidad superficial de las piezas mecanizadas, la estabilidad del proceso y los costos de producción. Entre los diferentes mecanismos de deterioro, el desgaste de flanco es uno de los indicadores más utilizados para evaluar el desempeño y la vida útil de las herramientas de corte, debido a su relación directa con las condiciones de mecanizado y la precisión dimensional obtenida. La presente investigación tuvo como objetivo analizar la evolución del desgaste de flanco de una herramienta de corte durante el mecanizado del acero AISI 1018, con el propósito de identificar las condiciones de corte más favorables. Para ello, inicialmente se realizó una revisión bibliográfica sobre los fundamentos del desgaste de herramientas, los parámetros de corte y los criterios de evaluación establecidos en la norma ISO 3685. La metodología empleada consistió en el desarrollo de un diseño experimental factorial con dos factores de estudio: velocidad de corte y avance. Se evaluaron tres niveles de velocidad de corte (120, 160 y 186 m/min) y tres niveles de avance (0,10; 0,14 y 0,15 mm/rev), obteniéndose un total de nueve condiciones experimentales. Los ensayos se realizaron mediante una operación de tronzado en un torno CNC utilizando insertos GTN-3 con aplicación de refrigerante. Posteriormente, el desgaste de flanco fue medido mediante microscopía óptica y software especializado de medición, obteniendo los valores de desgaste correspondientes a cada condición de corte. Los resultados experimentales evidenciaron que la velocidad de corte fue el parámetro con mayor influencia sobre el desgaste de flanco. A medida que la velocidad aumentó de 120 a 186 m/min se observó un incremento progresivo del desgaste, atribuible al aumento de la temperatura en la zona de corte y a la aceleración de los mecanismos de desgaste. En cuanto al avance, su efecto fue menos pronunciado dentro del rango evaluado, aunque se identificaron ligeras variaciones en los valores obtenidos. La condición de corte con menor desgaste de flanco correspondió a una velocidad de corte de 120 m/min y un avance de 0,10 mm/rev, registrando un desgaste promedio aproximado de 156 µm, mientras que la condición con mayor desgaste fue la de 186 m/min y 0,10 mm/rev, con un

desgaste cercano a 272 µm. A partir del análisis de los resultados experimentales se concluye que la selección adecuada de los parámetros de corte permite reducir el desgaste de la herramienta y favorecer un proceso de mecanizado más estable. Asimismo, el estudio proporciona información experimental que puede servir como referencia para futuras investigaciones relacionadas con la optimización de parámetros de mecanizado y el análisis del comportamiento de herramientas de corte en materiales metálicos.

PalabraClave: desgaste de flanco, herramienta de corte, acero AISI 1018, mecanizado, velocidad de corte, avance, torno CNC.

ABSTRACT

Tool wear is one of the main factors influencing the surface quality of machined parts, process stability, and production costs. Among the different wear mechanisms, flank wear is one of the most widely used indicators for evaluating the performance and service life of cutting tools due to its direct relationship with machining conditions and the dimensional accuracy achieved.

The objective of this research was to analyze the evolution of flank wear in a cutting tool during the machining of AISI 1018 steel in order to identify the most favorable cutting conditions. To achieve this, a literature review was first conducted on the fundamentals of tool wear, cutting parameters, and the evaluation criteria established in the ISO 3685 standard.

The methodology consisted of a full factorial experimental design with two study factors: cutting speed and feed rate. Three cutting speed levels (120, 160, and 186 m/min) and three feed rate levels (0.10, 0.14, and 0.15 mm/rev) were evaluated, resulting in a total of nine experimental conditions. The tests were carried out through a parting operation on a CNC lathe using GTN-3 inserts with coolant application. Subsequently, flank wear was measured using optical microscopy and specialized measurement software, obtaining the corresponding wear values for each cutting condition.

The experimental results showed that cutting speed was the parameter with the greatest influence on flank wear. As the cutting speed increased from 120 to 186 m/min, a progressive increase in flank wear was observed, which was attributed to the rise in temperature in the cutting zone and the acceleration of wear mechanisms. Regarding feed rate, its effect was less pronounced within the evaluated range, although slight variations in the measured wear values were identified. The cutting condition with the lowest flank wear corresponded to a cutting speed of 120 m/min and a feed rate of 0.10 mm/rev, with an average wear of approximately 156 μm, whereas the condition with the highest wear was obtained at 186 m/min and 0.10 mm/rev, reaching approximately 272 μm.

Based on the analysis of the experimental results, it was concluded that the appropriate selection of cutting parameters reduces tool wear and promotes a more stable machining process. Furthermore, this study provides experimental information that may serve as a reference for future research related to the optimization of machining parameters and the analysis of cutting tool behavior in metallic materials.

keywords: flank wear, cutting tool, AISI 1018 steel, machining, cutting speed, feed rate, CNC lathe.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

0.1 IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA II
0.2 CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DE INTEGRACIÓN CURRICULAR . . III
0.3 APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR IV
DEDICATORIA V
AGRADECIMIENTO VI
RESUMEN VII
ABSTRACT IX
ÍNDICE DE FIGURAS XII
ÍNDICE DE TABLAS XII
CAPÍTULO I
1.1 Planteamiento del problema 1
1.2 Objetivos 2
1.2.1 General 2
1.2.2 Específicos 2
1.3 Alcance y delimitación 2
1.4 Justificación 3
1.5 Contexto 3

CAPÍTULO II

2.1 Antecedentes 5
2.1.1 Introducción al mecanizado 5
2.1.2 Antecedentes históricos del estudio del proceso de corte 6
2.1.3 Progresos actuales en la investigación del corte 7
2.1.4 Proceso de torneado CNC 7
2.1.4.1 Principio de funcionamiento 7
2.1.4.2 Aplicaciones 8
2.1.4.3 Operación de tronzado 8
2.1.4.4 Características 9
2.1.5 Corte ortogonal 9
2.1.6 Parámetros de corte 10
2.1.6.1 Velocidad de corte (V_c) 10
2.1.6.2 Avance (f) 11
2.1.6.3 Profundidad de corte (a_p) 12
2.1.6.4 Tiempo de mecanizado 12
2.2 Herramientas de corte 13

2.2.0.1 Herramientas de corte para torneado 13
2.2.0.2 Inserto GTN-3 14
2.2.1 Desgaste de la herramienta de corte 16
2.2.2 Desgaste de flanco (VB) 16
2.2.2.1 Causas del desgaste de flanco 17
2.2.3 Medición del desgaste de flanco 18
2.2.4 Consecuencias del desgaste de flanco 19
2.2.5 Refrigeración en el mecanizado 19
2.2.5.1 Funciones del refrigerante 20
2.2.6 Vida útil de la herramienta 21
2.2.7 Ecuación de Taylor 21
2.2.8 Acero AISI 1018 22
2.2.8.1 Propiedades mecánicas. 22
CAPÍTULO III
3.1 Diseño de la investigación 24
3.2 Materiales y equipos 25
3.2.1 Material de la pieza de trabajo 25
3.2.2 Herramienta de corte 26
3.3 Equipos utilizados 27

3.3.1 Torno CNC 27
3.3.2 Microscopio para la medición del desgaste. 28
3.3.2.1 Refrigerante empleado 28
3.3.3 Diseño experimental 29
3.3.4 Selección de los parámetros de corte 29
3.3.4.1 Factores y niveles del experimento 30
3.3.5 Matriz experimental 30
3.3.6 Procedimiento experimental 31
3.3.6.1 Elaboración de las probetas 31
3.3.6.2 Ensayos de desgaste de flanco 31
3.3.6.3 Medición del desgaste de flanco 31
3.4 Descripción del problema experimental 32
3.5 Datos experimentales 32
3.6 Cálculo del tiempo de corte 33
3.7 Exploración gráfica tridimensional 35
3.8 Formulación de los modelos 36
3.8.1 Modelo potencial. 36
3.8.2 Modelo lineal con interacción. 37
3.8.3 Modelo cuadrático de superficie de respuesta. 37
3.9 Criterios de evaluación 38
CAPÍTULO IV
4.1 Resultados experimentales 39
4.1.1 Resultados obtenidos. 39
4.2 Análisis del desgaste de flanco 40

4.2.1 Relación entre el desgaste de flanco y el tiempo de mecanizado 40
4.2.2 Comparación de resultados entre VB medido en app en relación al tiempo. . . . 41
4.2.3 Influencia de la velocidad de corte y Avance 42
4.3 Comparación con investigaciones previas 44
4.3.1 Comparación de resultados entre VB experimental y Modelo A 44
4.4 Determinación de la condición de corte más favorable 46
4.4.1 Condición con menor desgaste de flanco 46
4.5 Resultados de ajuste 47
4.6 Modelos potenciales obtenidos 48
4.7 Modelo final seleccionado 49
4.8 Interpretación de los coeficientes 49
4.9 Mapa de contornos del modelo final 51
4.10 Valores observados y predichos 52
4.11 Análisis de residuos 52
4.12 Análisis dimensional 53
4.13 Índice adimensional de severidad 55
4.14 Interpretación física de los resultados 56
4.15 Limitaciones del modelo 57
4.16 Síntesis de resultados del modelado 58
CONCLUSIONES 59
RECOMENDACIONES 60
ANEXOS 61
4.17 ANEXO A. PROTOCOLO PARA LA OBTENCIÓN DE PROBETAS DE ENSAYO 61

4.17.1 OBJETIVO 61
4.17.2 PERSONAS A CARGO DE LA PRUEBA 61
4.17.3 ACTIVIDADES 61
4.18 ANEXO B. PROTOCOLO PARA LA OBTENCIÓN DEL DESGASTE DE FLANCO DURANTE EL PROCESO DE TRONZADO 65
4.18.1 OBJETIVO 65
4.19 ANEXO C. PROTOCOLO PARA LA MEDICIÓN DEL DESGASTE DE FLANCO EN LOS INSERTOS GTN-3 69
4.19.1 OBJETIVO 69
4.20 Imágenes del desgaste de flanco optimizadas mediante IA 76
4.21 Medición y verificación del desgaste de flanco mediante Tool Wear Analyzer . 78

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Parámetros de proceso básico del torneado. Extraído de [8] 8
Figura 2.2 Geometría del inserto y portaherramientas de tronzado. Extraído de [10] 9
Figura 2.3 Modelo 2D (Corte Ortogonal). Extraído de [15] 10
Figura 2.4 Parámetros de mecanizado. Extraído de [16] 11
Figura 2.5 Parámetros de corte en el mecanizado. Extraído de [17] 11
Figura 2.6 Herramientas de corte para el mecanizado. Extraído de [19] 14
Figura 2.7 Geometría y parámetros dimensionales del inserto. Extraído de [19] . . 15
Figura 2.8 Inserto GTN-3 montado en el portaherramientas de tronzado mediante sistema de sujeción por auto apriete. Extraído de [21] 16
Figura 2.9 Banda de desgaste de flanco (VB) en el filo de una herramienta de corte. Extraído de [23] 17
Figura 2.10 Factores que influyen en el desgaste de herramientas al cortar metales. Extraído de [25] 18
Figura 2.11 Ejemplo de medición del Desgaste de Flanco. Extraído de [27] 19
Figura 2.12 Aplicación de fluido de corte durante una operación de tronzado/ranurado en un torno CNC. Extraído de [28] 20

Figura 3.1 Ejes macizos de acero AISI 1018 utilizados como material de trabajo.Extraído de [26] 25
Figura 3.2 Torno CNC utilizado durante el mecanizado de las probetas.Extraído de [36] 27
Figura 3.3 Microscopio óptico utilizado para la medición del desgaste de flanco. Extraído de [37] 28
Figura 3.4 Refrigerante Valvoline PROMAX utilizado durante el mecanizado de las probetas. Extraído de [40] 29
Figura 3.5 Superficies de respuesta del desgaste máximo. 35
Figura 3.6 Superficies de respuesta del desgaste mínimo. 35
Figura 3.7 Superficies de respuesta del desgaste medio. 36

Figura 4.1 Relación entre el Desgaste de Flanco (VB) y el Tiempo (t). 40
Figura 4.2 Relación entre el Desgaste de Flanco medido en la app (VB) y el Tiempo (t). 41
Figura 4.3 Relación entre la Velocidad de corte (Vc) y Desgaste de flanco experimental (VB) 42
Figura 4.4 Relación entre la Velocidad de corte (Vc) y Desgaste de flanco experimental (VB). 43
Figura 4.5 Relación del Desgaste de Flanco (VB) con investigaciones previas y el Tiempo (t). 44

Figura 4.6 Comparación multicriterio de los modelos potencial, lineal con interacción y cuadrático para las variables de desgaste de flanco. Un valor mayor de R^2 indica mejor ajuste, mientras que valores menores de RMSE, MAE y $\text{RMSE}_{\text{LOOCV}}$ indican menor error. 47
Figura 4.7 El modelo cuadrático para $\text{VB}_{\text{medio,2}}$ presenta el mejor desempeño global, con $R^2 = 0{,}9236$, RMSE de $11{,}72\,\mu$m, MAE de $10{,}13\,\mu$m y $\text{RMSE}_{\text{LOOCV}}$ de $35{,}93\,\mu$m. 48
Figura 4.8 Mapa de contornos del modelo cuadrático final para VB_{med}. Los números identifican los ensayos experimentales. 51
Figura 4.9 Comparación entre valores observados y predichos por el modelo final. La línea discontinua representa predicción perfecta. 52
Figura 4.10 Residuos del modelo final en función del desgaste predicho. 53
Figura 4.11 Mapa del índice adimensional empírico de severidad del desgaste. . . . 56
Figura 4.12 Diagrama de actividades para la obtención de probetas de ensayo. 63
Figura 4.13 Probetas mecanizadas antes de los ensayos de desgaste. 64
Figura 4.14 Flujograma de actividades para la obtención del desgaste de flanco. . . . 67
Figura 4.15 Operación de mecanizado de la probeta. 68
Figura 4.16 Probetas mecanizadas con geometría final. 68
Figura 4.17 Forma de colocación del inserto para la medición. 71
Figura 4.18 Montaje del inserto en el microscopio para la medición. 71
Figura 4.19 Flujograma de actividades para la medición del desgaste de flanco. . . . 72
Figura 4.20 Desgaste de flanco del ensayo 1. 74
Figura 4.21 Desgaste de flanco del ensayo 2. 74
Figura 4.22 Desgaste de flanco del ensayo 3. 74
Figura 4.23 Desgaste de flanco del ensayo 4. 74
Figura 4.24 Desgaste de flanco del ensayo 5. 75
Figura 4.25 Desgaste de flanco del ensayo 6. 75
Figura 4.26 Desgaste de flanco del ensayo 7. 75
Figura 4.27 Desgaste de flanco del ensayo 8. 75
Figura 4.28 Desgaste de flanco del ensayo 9. 76
Figura 4.29 Desgaste de flanco del ensayo 1 (imagen mejorada con IA). 76
Figura 4.30 Desgaste de flanco del ensayo 2 (imagen mejorada con IA). 76
Figura 4.31 Desgaste de flanco del ensayo 3 (imagen mejorada con IA). 76
Figura 4.32 Desgaste de flanco del ensayo 4 (imagen mejorada con IA). 77
Figura 4.33 Desgaste de flanco del ensayo 5 (imagen mejorada con IA). 77
Figura 4.34 Desgaste de flanco del ensayo 6 (imagen mejorada con IA). 77
Figura 4.35 Desgaste de flanco del ensayo 7 (imagen mejorada con IA). 77
Figura 4.36 Desgaste de flanco del ensayo 8 (imagen mejorada con IA). 78
Figura 4.37 Desgaste de flanco del ensayo 9 (imagen mejorada con IA). 78
Figura 4.38 Medición y verificación del desgaste de flanco del ensayo 1 mediante aplicación. 78
Figura 4.39 Medición y verificación del desgaste de flanco del ensayo 2 mediante aplicación. 79
Figura 4.40 Medición y verificación del desgaste de flanco del ensayo 3 mediante aplicación. 79
Figura 4.41 Medición y verificación del desgaste de flanco del ensayo 4 mediante aplicación. 80

Figura 4.42 Medición y verificación del desgaste de flanco del ensayo 5 mediante aplicación. 80
Figura 4.43 Medición y verificación del desgaste de flanco del ensayoc6 mediante aplicación. 81
Figura 4.44 Medición y verificación del desgaste de flanco del ensayo 7 mediante aplicación. 81
Figura 4.45 Medición y verificación del desgaste de flanco del ensayo 8 mediante aplicación.. 82
Figura 4.46 Medición y verificación del desgaste de flanco del ensayo 9 mediante aplicación.. 82

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Criterios de fin de vida útil por desgaste de flanco según la norma ISO 3685 [23] 17
Tabla 2.2 Funciones principales de los fluidos de corte y su efecto directo sobre el proceso de mecanizado [31] 20
Tabla 2.3 Composición química de ASTM AISI 1018 [33] 22
Tabla 2.4 Propiedades mecánicas del acero AISI 1018 [34] 23

Tabla 3.1 Niveles de los factores del diseño experimental [26], [35], [28] 24
Tabla 3.2 Características del material de trabajo, [26] 25
Tabla 3.3 Ficha técnica del inserto GTN-3 utilizado en la investigación [36] 26
Tabla 3.4 Especificaciones del torno CNC [36] 27
Tabla 3.5 Especificaciones del microscopio 28
Tabla 3.6 Especificaciones del refrigerante empleado. [39] 29
Tabla 3.7 Factores y niveles del diseño experimental 30
Tabla 3.8 Matriz del diseño experimental 30
Tabla 3.9 Datos experimentales de velocidad de corte, avance y desgaste de flanco. 32
Tabla 3.10 Tiempo de corte calculado para cada condición experimental. 34

Tabla 4.1 Resultados experimentales obtenidos para cada condición de corte. . . . 39
Tabla 4.2 Resultados experimentales y de medición en la app obtenidos para cada condición de corte. 41
Tabla 4.3 Resultados experimentales para validación con el modelo matemático de investigaciones previas 44
Tabla 4.4 Resultados de porcentajes de error entre valores experimentales y del modelo A. 45
Tabla 4.5 Comparación de modelos para las cuatro variables de desgaste. 47

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del problema

En la industria manufacturera, uno de los principales desafíos en los procesos de mecanizado de materiales metálicos es el desgaste de flanco en la herramienta de corte. este se produce por la fricción entre la superficie mecanizada de la pieza y el área del flanco en contacto con ella. Este tipo de desgaste afecta directamente la eficiencia del proceso y la calidad del producto final. El desgaste en el flanco puede provocar errores dimensionales, deficiencias en el acabado superficial y una reducción significativa en la vida útil de la pieza mecanizada y de la herramienta, lo que perjudica a la producción de las industrias manufactureras [1]. A pesar de su impacto, en muchas aplicaciones industriales en el país, no se realizan estudios adecuados que permitan optimizar los parámetros de corte. Esta falta de control afecta la capacidad de mejorar la eficiencia del mecanizado. Tradicionalmente, la predicción del desgaste en el flanco se ha abordado mediante modelos empíricos basados en datos experimentales [2] . Sin embargo, estas investigaciones tienen limitaciones para representar con precisión el comportamiento de la herramienta bajo distintas condiciones de operación. En este contexto, la presente investigación incluye un caso de estudio experimental mediante operaciones de mecanizado del acero AISI 1018 bajo condiciones controladas y con aplicación de refrigerante.. [1]. Por tanto, el análisis experimental propuesto tiene como objetivo responder la siguiente pregunta de investigación:

¿Cómo evoluciona el desgaste de flanco en una herramienta sin recubrimientos bajo distintas condiciones de corte de acero AISI 1018?

1.2 Objetivos

1.2.1 General

Evaluar el fenómeno de desgaste en el flanco de la herramienta de corte durante el mecanizado de materiales metálicos, mediante la utilización de ensayos experimentales

1.2.2 Específicos

- Definir los parámetros relacionados con el desgaste de flanco y la estimación de la vida útil de la herramienta con normativa especializada y modelos predictivos.
- Realizar ensayos experimentales para las herramientas de corte bajo diferentes condiciones.
- Modelizar la evolución del desgaste de flanco en función de los parámetros de corte utilizados en la experimentación.

1.3 Alcance y delimitación

Esta investigación se centra en la evaluación del desgaste en el flanco de herramientas de corte utilizadas en procesos de mecanizado de materiales metálicos, particularmente en condiciones de tronzado del acero. El estudio contempla la ejecución de ensayos experimentales bajo diferentes combinaciones de parámetros de corte, como velocidad de corte y avance. La investigación tiene como enfoque el análisis del desgaste en el flanco, sin abordar otros tipos de desgaste como el cráter o la deformación plástica [3] Se aplica la normativa ISO 3685 para evaluar la evolución del desgaste, y se consideran modelos predictivos para estimar la vida útil de la herramienta. El presente proyecto de titulación no contempla la implementación de sistemas automatizados de monitoreo ni el análisis económico de la producción, centrándose únicamente en la caracterización del fenómeno de desgaste bajo condiciones controladas de laboratorio

. Los resultados obtenidos permitirán identificar condiciones de operación más favorables para minimizar el desgaste en el flanco y optimizar el rendimiento de las herramientas de corte, contribuyendo a una mejora en la precisión del mecanizado y a la eficiencia de los procesos productivos.

1.4 Justificación

El desgaste de flanco en herramientas de corte influye en la duración de la herramienta y en la calidad del mecanizado, afectando la productividad y los costos de producción. Evaluar este fenómeno mediante ensayos experimentales permite observar cómo los parámetros de corte afectan la herramienta durante el mecanizado de materiales metálicos [1].

Definir y aplicar parámetros relacionados con el desgaste, apoyándose en normativa especializada y modelos predictivos, facilita estimar la vida útil de la herramienta y comparar los resultados obtenidos en los ensayos. La modelización de la evolución del desgaste a partir de los datos experimentales permite comprender las tendencias y relaciones entre las condiciones de corte y el desgaste de flanco [4].

Esta investigación se centra en analizar el desgaste de flanco mediante ensayos experimentales y modelos predictivos, con el objetivo de proponer estrategias que optimicen la durabilidad de las herramientas y la eficiencia del mecanizado de acero.

1.5 Contexto

El mecanizado de materiales metálicos, especialmente el acero, influye en la precisión dimensional, la calidad del acabado superficial y la eficiencia del proceso productivo. El desgaste progresivo de la herramienta de corte puede afectar el rendimiento del mecanizado.

El desgaste en flanco, uno de los modos más comunes de deterioro, se relaciona con los parámetros de corte como velocidad y avance. Por ello, se requiere un análisis experimental que per-

mita comprender su evolución y establecer condiciones de corte adecuadas. Esta investigación se centra en estudiar este fenómeno, apoyándose en normativa técnica y modelos predictivos para estimar la vida útil de la herramienta [5].

Diversos estudios han empleado métodos experimentales midiendo el desgaste de flanco, lo que ha permitido evaluar el efecto de las condiciones de corte sobre la herramienta. Algunos de estos trabajos aplicaron modelos basado en condiciones prácticas de mecanizado y recomendaciones del fabricante, enfocado en el acero AISI 1018, logrando estimar la velocidad de corte, el tiempo de vida del inserto y proponiendo una ecuación para el costo mínimo del proceso de torneado [5] . La optimización de los parámetros del torneado afecta la calidad del producto, la productividad y los costos. Investigaciones previas aplicaron herramientas estadísticas, como el análisis de componentes principales, para determinar combinaciones de parámetros que optimicen el proceso. Estos estudios muestran que una mayor velocidad y profundidad de corte pueden aumentar la producción, reducir el desgaste de la herramienta y mejorar el acabado superficial [1], [6].

En estudios sobre los mecanismos de desgaste, se ha identificado que la adherencia es una de las principales causas del deterioro de herramientas en el mecanizado de aceros bajo ciertas condiciones de corte. La ISO 3685 es una referencia para evaluar la maquinabilidad en procesos de torneado. Esta norma recomienda el uso de insertos de metal duro sin recubrimiento, debido a su geometría de corte predefinida, lo que permite estandarizar las condiciones experimentales [3].

Se han desarrollado modelos predictivos que, mediante técnicas estadísticas y la metodología de superficies de respuesta, permiten estimar el desgaste superficial a partir de parámetros de corte controlados. Estos enfoques pueden complementar los estudios experimentales, proporcionando herramientas de predicción confiables [6].

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

2.1.1 Introducción al mecanizado

El mecanizado es un proceso utilizado en la industria para retirar material sobrante de una pieza mediante herramientas de corte, ya sea de forma manual o con máquinas. Estas herramientas generan deformaciones por cizalladura que permiten dar forma a distintos componentes. Este proceso se aplica ampliamente debido a que posibilita obtener piezas con geometrías complejas y precisión dimensional, aspectos necesarios en diversos sectores productivos. Actualmente, alrededor del 75 % de la manufactura global se basa en operaciones de mecanizado, con un valor superior a los 50 billones de dólares [7].

El mecanizado se clasifica en dos grupos: convencional y no convencional. El mecanizado convencional, también conocido como arranque de viruta, remueve el material de manera progresiva mediante herramientas que definen la forma, tamaño y acabado de la pieza en operaciones como torneado, fresado y taladrado. Por otro lado, el mecanizado no convencional no emplea herramientas de corte tradicionales, sino principios térmicos, químicos o eléctricos para separar el material, como ocurre en la electro erosión (EDM), el corte láser o el chorro de agua abrasivo [7], [8].

2.1.2 Antecedentes históricos del estudio del proceso de corte

Hacia mediados del siglo XIX, el desarrollo en la fabricación de acero y materiales relacionados para el mecanizado presentó nuevos retos en cuanto al uso de herramientas de corte, ya que una aplicación inadecuada podía arruinar incluso los mejores materiales destinados a su elaboración. Esta problemática impulsó la creación de una base teórica sobre el proceso de corte. Frederick W. Taylor, reconocido como el pionero del mecanizado científico, fue uno de los primeros en investigar estas interacciones, y hacia finales del siglo XIX formuló la conocida "Ecuación de Taylor", la cual establece una relación entre la velocidad de corte y la vida útil de la herramienta, contribuyendo así a mejorar las condiciones del proceso de mecanizado [9].

Durante la década de 1940, Merchant introdujo un modelo analítico para el corte ortogonal que establecía relaciones clave entre los ángulos de corte, las fuerzas actuantes, la fricción entre la herramienta y la viruta, así como la energía requerida en el proceso. Aunque se trataba de un enfoque simplificado, resultó fundamental para el entendimiento teórico y experimental de la mecánica del corte. Posteriormente, Lee y Shaffer propusieron un nuevo modelo fundamentado en la teoría de la plasticidad ideal, con el objetivo de describir el comportamiento del flujo del material durante el mecanizado [10].

A medida que los procesos de mecanizado se volvieron más complejos, comenzaron a desarrollarse modelos empíricos sustentados en métodos estadísticos y experimentales, los cuales permiten ajustar curvas de comportamiento a partir de datos obtenidos en condiciones reales. Si bien estos modelos presentan la ventaja de ser más sencillos de aplicar, su capacidad de generalización resulta limitada. Un ejemplo destacado lo constituyen los trabajos de Karpat y Özel, quienes propusieron ecuaciones para estimar el desgaste de la herramienta y la temperatura de corte, considerando variables como la velocidad, el avance y la geometría de la herramienta [9], [10].

2.1.3 Progresos actuales en la investigación del corte

Durante la década de 1970, los avances en computación permitieron el desarrollo de métodos para estudiar el corte de metales mediante modelos numéricos, diseñados para complementar los datos experimentales y apoyar la interpretación de resultados en el mecanizado. Estos enfoques no sustituyen las teorías existentes, sino que proporcionan herramientas adicionales para comparar y analizar los fenómenos observados en los ensayos.

En 2008, Molinary y Fouki cuestionaron la validez universal del modelo propuesto por Merchant, basado en la hipótesis de la energía mínima, ya que no siempre predice con precisión el ángulo de corte observado en ensayos experimentales. Propusieron un enfoque alternativo basado en el análisis de la morfología de la viruta [11].

Anteriormente, en 1998, estos autores junto con Dudzinski desarrollaron una versión mejorada del modelo incorporando leyes de fricción dependientes de la temperatura, lo que permitió ajustar las predicciones del modelo a condiciones de mecanizado más cercanas a la práctica. Estos avances históricos muestran la evolución de los modelos de corte y su utilidad para interpretar fenómenos como el desgaste de flanco y el comportamiento de las herramientas durante los ensayos experimentales, aportando un marco teórico para estudios como el presente [7], [11].

2.1.4 Proceso de torneado CNC

2.1.4.1 Principio de funcionamiento

El torneado CNC se basa en la remoción progresiva de material en forma de viruta, lograda mediante la rotación continua de la pieza combinada con el desplazamiento controlado de la herramienta sobre los ejes de la máquina. Las variables fundamentales del proceso son la velocidad de corte, el avance y la profundidad de pasada [8]. La combinación de estos parámetros condiciona la tasa de remoción de material, las fuerzas involucradas, la temperatura en la zona de corte, la tasa de desgaste del filo y el acabado superficial final. El sistema de control numé-

rico coordina la trayectoria de la herramienta a través de servomotores, lo que asegura una alta repetibilidad dimensional según las especificaciones del diseño [8], [12].

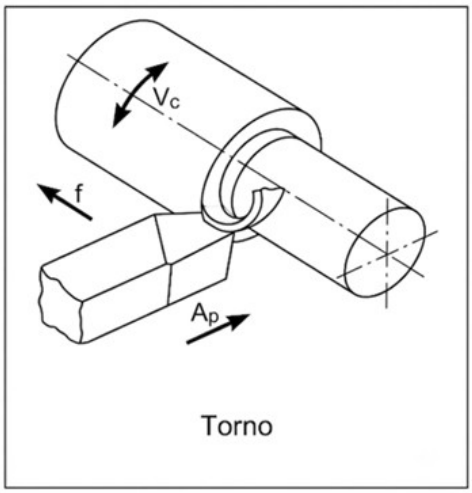


Fig. 2.1. Parámetros de proceso básico del torneado. Extraído de [8]

2.1.4.2 Aplicaciones

Esta tecnología se utiliza en la fabricación de piezas simétricas de revolución, tales como ejes, bujes, casquillos, discos, poleas y elementos roscados. Asimismo, en un mismo ciclo de trabajo permite ejecutar operaciones variadas como cilindrado, refrentado, ranurado, tronzado, roscado y mandrinado mediante el cambio programado de herramientas [9].

2.1.4.3 Operación de tronzado

El tronzado es un proceso de torneado donde un inserto específico avanza hacia el centro de la pieza en rotación para cortarla o separarla. El ancho del corte es igual al espesor del inserto y el material se elimina en forma de viruta [10].

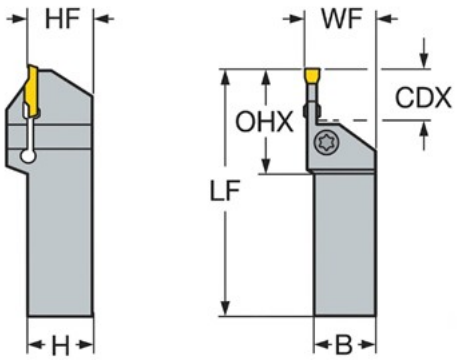


Fig. 2.2. Geometría del inserto y portaherramientas de tronzado. Extraído de [10]

2.1.4.4 Características

Esta operación se realiza en un espacio de corte estrecho, lo que concentra altos esfuerzos en el filo del inserto y dificulta la evacuación de la viruta a medida que la herramienta avanza hacia el centro. Por ello, la estabilidad del sistema, la geometría del inserto y la correcta elección del avance y la velocidad de corte son determinantes para controlar el desgaste de la herramienta y garantizar un buen acabado superficial. Asimismo, cuando el corte no llega hasta el centro de la pieza, este procedimiento se emplea para el mecanizado de ranuras [13], [14].

2.1.5 Corte ortogonal

El corte ortogonal es un modelo simplificado en dos dimensiones donde la arista de la herramienta se coloca de forma totalmente perpendicular a la dirección del movimiento de corte. Durante este proceso, la herramienta penetra en la pieza y remueve una capa de metal de espesor uniforme, transformándola en viruta mediante un esfuerzo de cizallamiento continuo. Al concentrar las fuerzas de corte y las deformaciones del material en un solo plano, este concepto permite estudiar de forma clara y directa los fenómenos fundamentales del mecanizado, como la formación de la viruta, las fuerzas involucradas y la progresión del desgaste en la herramienta [15].

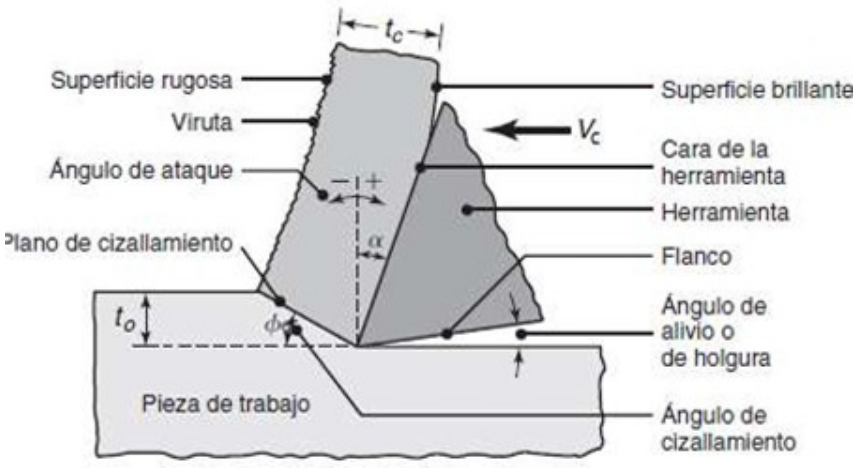


Fig. 2.3. Modelo 2D (Corte Ortogonal). Extraído de [15]

2.1.6 Parámetros de corte

2.1.6.1 Velocidad de corte (V_c)

La velocidad de corte es la velocidad relativa entre el filo del inserto y la superficie de la pieza en rotación. Se expresa en metros por minuto (m/min) y se determina según el material a mecanizar, el tipo de herramienta y las condiciones de la operación. Al aumentar la velocidad de corte, la energía acumulada en la zona de contacto incrementa la temperatura de trabajo. Esta elevación térmica acelera el desgaste del inserto principalmente el desgaste en el flanco, lo que reduce la vida útil de la herramienta [15], [16]. La velocidad de corte se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$n = \frac{V_c \cdot 1000}{\pi \cdot D_m} \quad \text{(rpm)} \tag{2.1}$$

Donde: D_m: Diámetro mecanizado (mm). n: Velocidad del husillo (rpm). 1000: Factor de conversión.

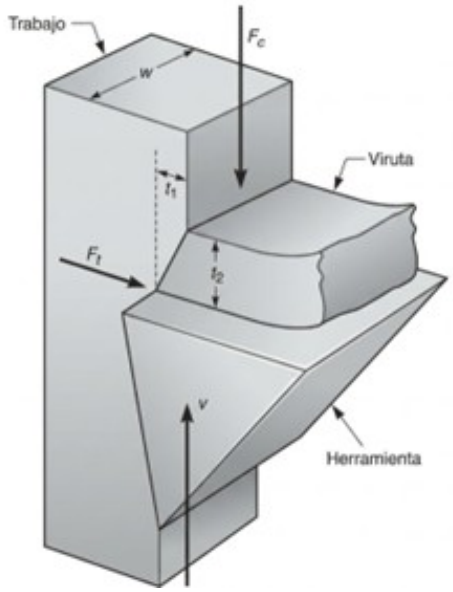


Fig. 2.4. Parámetros de mecanizado. Extraído de [16]

2.1.6.2 Avance (f)

El avance es la distancia que recorre la herramienta por cada vuelta completa de la pieza, expresándose en milímetros por revolución (mm/rev). Este parámetro determina el grosor de la viruta, las fuerzas de corte y el acabado superficial de la pieza. Al incrementar el avance, aumenta la cantidad de material removido en cada pasada, lo que genera mayores fuerzas sobre el filo e incrementa la velocidad de desgaste del inserto [17].

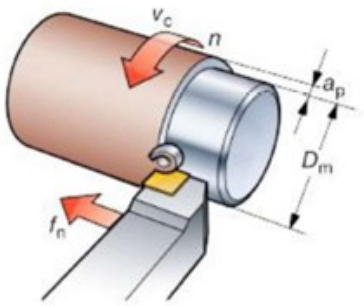


Fig. 2.5. Parámetros de corte en el mecanizado. Extraído de [17]

2.1.6.3 Profundidad de corte (a_p)

La profundidad de corte es la distancia radial que penetra el inserto en la pieza durante el mecanizado. En el torneado, se calcula como la mitad de la diferencia entre el diámetro inicial y el diámetro final de la pieza, y se expresa en milímetros (mm), como se expresa en la siguiente ecuación [18]:

$$a_{pag} = \frac{D_i - D_f}{2} \tag{2.2}$$

Dónde:

- a_{pag}: Profundidad de corte (mm).
- D_i: Diámetro inicial de la pieza antes de la pasada (mm).
- D_f: Diámetro final de la pieza después de la pasada (mm).

Este parámetro determina la cantidad de material removido y el área de contacto entre la herramienta y la pieza. Un aumento en la profundidad de corte genera una viruta más grande, lo que se traduce en mayores fuerzas de corte y una carga mecánica superior sobre el filo del inserto [17].

2.1.6.4 Tiempo de mecanizado

La ecuación 3.5 corresponde al periodo durante el cual la herramienta permanece en contacto con la pieza hasta alcanzar un nivel de desgaste establecido. El desgaste progresivo modifica la geometría del filo y afecta el desempeño del proceso de mecanizado. Esta fricción continua activa mecanismos de abrasión, adhesión y difusión que degradan la cara de incidencia [9]. Monitorear el tiempo permite graficar la curva del desgaste de flanco para determinar el momento

exacto de cambio de la herramienta [9]. El tiempo de corte efectivo (T_{min}) por cada pasada se determina mediante la relación cinemática de la operación:

$$T_{min} = \frac{L_{mm}}{N_{rpm} \cdot F} \tag{2.3}$$

Dónde:

- T: Tiempo de corte efectivo (min).
- L: Profundidad de corte o penetración radial (μm).
- N: Velocidad máxima de rotación del husillo (rev/min).
- F: Avance por revolución (mm/rev).

2.2 Herramientas de corte

2.2.0.1 Herramientas de corte para torneado

Las herramientas de torneado están compuestas por un portaherramientas y un inserto intercambiable. La geometría del inserto condiciona la formación de la viruta, la magnitud de las fuerzas de corte, el acabado superficial y la progresión del desgaste [9].

Los insertos de carburo cementado se utilizan por su dureza y estabilidad a altas temperaturas de corte. Estas plaquitas varían en forma y sistema de fijación según la operación realizada, como cilindrado, ranurado, roscado o tronzado.

En el tronzado se emplean insertos de sección estrecha para penetrar la pieza de forma radial. El ancho del filo fija la dimensión de la ranura, mientras que la rigidez del ensamblaje portaherramientas-inserto influye en la estabilidad del proceso y en la vida útil de la herramienta [9], [19].

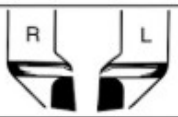
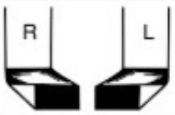
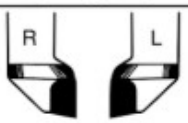
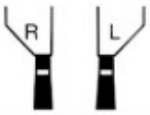
Aplicación	Forma del cabezal (R=derecha; L=izquierda)
Herramienta de desbaste recta	
Herramienta de desbaste acodada	
Herramienta de cilindrar y refrentar	
Herramienta de pala para acanalar	
Herramienta de refrentar acodada	
Herramienta de cilindrar acodada	
Herramienta de tronzar	

Fig. 2.6. Herramientas de corte para el mecanizado. Extraído de [19]

2.2.0.2 Inserto GTN-3

El GTN-3 es un inserto de carburo cementado diseñado para el tronzado y ranurado radial de piezas en revolución. Sus características operativas incluyen:

- Geometría de corte: Permite realizar ranuras estrechas reduciendo el volumen de material removido.
- Propiedades del material: El carburo cementado soporta la abrasión y la temperatura en la interfaz de corte [19].
- Mecanismo de falla: La penetración radial concentra las fuerzas en la punta, por lo que el monitoreo del desgaste de flanco determina el fin de su vida útil.

Las dimensiones del filo y el sistema de montaje de este inserto se muestran en las Figuras 2.7 y 2.8.

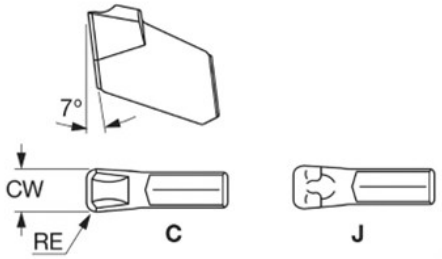


Fig. 2.7. Geometría y parámetros dimensionales del inserto. Extraído de [19]

Donde:

- CW (Ancho de corte): Ancho nominal de corte. Define el ancho de la ranura y el volumen de material removido.
- RE (Radius Edge): Radio de esquina o punta. Refuerza el filo contra despostillamientos y determina el acabado superficial en las paredes de la ranura.
- Ángulo 7°: Ángulo de incidencia (desahogo frontal). Evita el rozamiento entre la cara de incidencia y la pieza para reducir el calor y el desgaste [20].
- C (Geometría Neutra / Recta): El filo es completamente recto (0°). Distribuye las fuerzas de forma simétrica y es la opción requerida para corte ortogonal.
- J (Geometría Inclinada): El filo tiene un ángulo de inclinación frontal. Sirve para evacuar la viruta hacia un costado y evitar la formación de rebabas al finalizar el tronzado [21].



Fig. 2.8. Inserto GTN-3 montado en el portaherramientas de tronzado mediante sistema de sujeción por auto apriete. Extraído de [21]

2.2.1 Desgaste de la herramienta de corte

El desgaste de la herramienta de corte es la pérdida progresiva de material en sus superficies activas debido a la interacción mecánica, térmica y química entre el filo, la pieza y la viruta durante el mecanizado. Este proceso altera la geometría inicial del filo y degrada su capacidad para cortar.

Su evolución depende de las propiedades de los materiales en contacto, los parámetros operativos (velocidad de corte, avance y profundidad de pasada), el tiempo de mecanizado y el tipo de refrigeración empleada. El incremento del desgaste eleva las fuerzas de corte y la temperatura en la zona de trabajo, además de empeorar la rugosidad superficial de la pieza hasta superar el límite de vida útil de la herramienta [22].

2.2.2 Desgaste de flanco (VB)

El desgaste de flanco (VB) se produce en la cara de incidencia de la herramienta por el roce continuo contra la pieza mecanizada. Su avance es gradual, por lo que es el parámetro principal para medir el deterioro del filo y calcular su tiempo de uso útil [22], [23].

La fricción constante entre el inserto y la pieza desgasta gradualmente el material del filo. La

velocidad con que crece este desgaste depende de la velocidad de corte, el avance, el tiempo de mecanizado y el material trabajado [23].

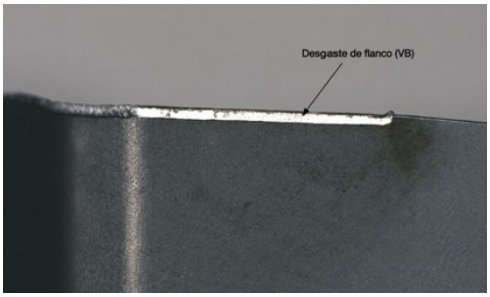


Fig. 2.9. Banda de desgaste de flanco (VB) en el filo de una herramienta de corte. Extraído de [23]

Al crecer la banda de desgaste (VB), la herramienta pierde desahogo, lo que aumenta la fricción, las fuerzas de corte y la temperatura local. Esto degrada la precisión dimensional y la rugosidad de la pieza. Por su comportamiento predecible, la norma ISO 3685 establece el desgaste de flanco (VB) como el criterio oficial para determinar el fin de la vida útil del inserto [11], como se muestra en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Criterios de fin de vida útil por desgaste de flanco según la norma ISO 3685 [23]

Descripción	Acrónimo	Criterio límite (ISO 3685)	Aplicación / Condición de mecanizado
Desgaste medio de flanco	VB	0.3 mm	Condición general (acabado y desbaste regular)
Desgaste máximo de flanco	VB máx.	0.6 mm	Si el desgaste es irregular o localizado

2.2.2.1 Causas del desgaste de flanco

Las principales causas son:

- **Abrasión:** Micro-mecanizado por la fricción de partículas duras e impurezas del acero contra el filo, lo que genera surcos o estrías en la cara de incidencia.
- **Adhesión:** Formación y rotura de microsoldaduras entre el material mecanizado y la herramienta por la alta presión, desprendiendo partículas del filo (común en corte en seco).

- **Difusión:** Migración de átomos entre el acero y la herramienta activada por las altas temperaturas, lo que degrada la estructura de los insertos, especialmente los no recubiertos [24].
- **Oxidación:** Degradación química del material de la herramienta por contacto con el oxígeno a elevadas temperaturas, generando capas frágiles de óxido que se desprenden [25].

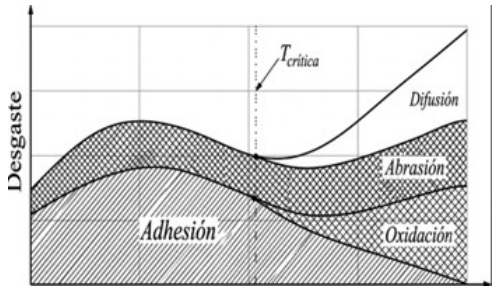


Fig. 2.10. Factores que influyen en el desgaste de herramientas al cortar metales. Extraído de [25]

2.2.3 Medición del desgaste de flanco

La medición del desgaste de flanco permite evaluar el deterioro de la herramienta al determinar el ancho de la zona desgastada en la cara de incidencia. Este procedimiento se realiza habitualmente mediante microscopía óptica o sistemas digitales de medición, registrando los valores en milímetros (mm) o micrómetros (μm) [26].

Según la norma ISO 3685, la evaluación requiere determinar el ancho promedio de la banda de desgaste (VB) y, en caso de presentar un perfil irregular, el desgaste máximo localizado ($VB_{\text{máx}}$) [27]. El registro de estos parámetros cuantitativos permite comparar el comportamiento de la herramienta y la evolución del desgaste en función de los parámetros de corte, tales como la velocidad de corte (V_c) y el avance (f).

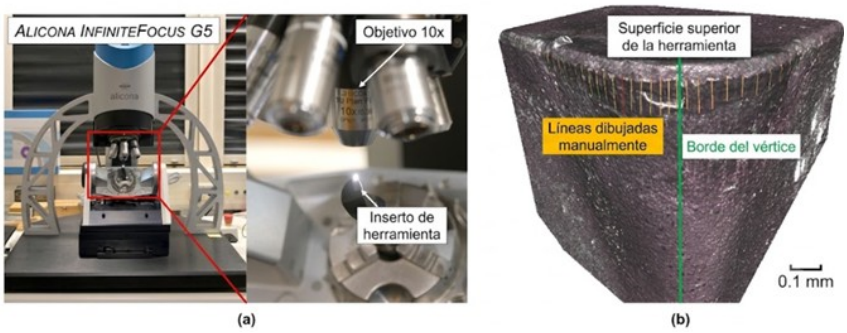


Fig. 2.11. Ejemplo de medición del Desgaste de Flanco. Extraído de [27]

2.2.4 Consecuencias del desgaste de flanco

Cuando el desgaste aumenta se producen efectos negativos como [27], [28]:

- Mayor fuerza y potencia de corte.
- Peor acabado superficial.
- Dimensiones fuera de tolerancia.
- Incremento de vibraciones.
- Riesgo de ruptura del inserto.

2.2.5 Refrigeración en el mecanizado

La refrigeración en el mecanizado consiste en aplicar un fluido de corte sobre la zona de contacto entre la herramienta, la pieza y la viruta. Su principal propósito es controlar la temperatura, reducir la fricción y facilitar la evacuación de la viruta durante el proceso.

Según la operación y el material trabajado, los fluidos de corte se aplican habitualmente mediante inundación, pulverización o sistemas de mínima cantidad de lubricante (MQL). Además de disipar el calor generado, el uso de refrigerante mejora la estabilidad del proceso, disminuye las fuerzas de corte y previene el deterioro prematuro de la herramienta [9].

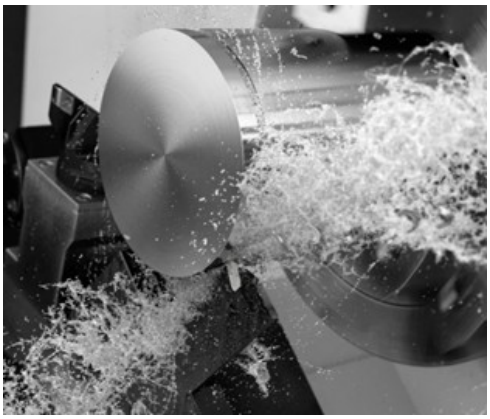


Fig. 2.12. Aplicación de fluido de corte durante una operación de tronzado/ranurado en un torno CNC. Extraído de [28]

2.2.5.1 Funciones del refrigerante

Su función es disipar el calor generado en la zona de corte, disminuyendo la temperatura en la herramienta y la pieza. Además, lubrica la interfaz entre la herramienta y la viruta, reduciendo el rozamiento y las fuerzas de corte. También evacúan la viruta de la zona de trabajo para evitar que se acumule o deteriore el filo. Asimismo, protegen la pieza y la máquina contra la corrosión y previenen deformaciones térmicas que afectan la precisión dimensional [29].

Sin embargo, la efectividad del fluido depende del material de la herramienta, de la pieza mecanizada y de los parámetros de corte. En procesos como el mecanizado en seco, la falta de refrigeración eleva la temperatura en la interfaz herramienta–pieza, lo que acelera el desgaste y modifica los mecanismos de falla predominantemente [29], [30].

Tabla 2.2. Funciones principales de los fluidos de corte y su efecto directo sobre el proceso de mecanizado [31]

Función	Efecto durante el mecanizado
Refrigeración	Reduce la temperatura en la zona de corte.
Lubricación	Disminuye la fricción entre herramienta, pieza y viruta.
Evacuación de viruta	Facilita la salida de la viruta y evita obstrucciones.
Protección	Reduce la corrosión de la pieza y la máquina.

2.2.6 Vida útil de la herramienta

La vida útil de la herramienta es el tiempo o volumen de material mecanizado durante el cual el filo mantiene la precisión dimensional y la calidad de acabado requeridas, antes de alcanzar un límite de desgaste preestablecido. Su duración depende del material de la herramienta, del material mecanizado, de los parámetros de corte de velocidad de corte (V_c), avance (f) y del uso de refrigerante [31].

Durante el corte, el desgaste evoluciona progresivamente, alterando la geometría del filo. Esta modificación incrementa la fricción, las fuerzas de corte, la temperatura en la interfaz y la rugosidad de la pieza. Al alcanzar el límite de desgaste, la herramienta pierde su capacidad operativa y debe ser reemplazada.

En el torneado, la vida útil se evalúa mediante el desgaste de flanco (VB). La norma ISO 3685 define el ancho de esta banda de desgaste como el criterio cuantitativo para determinar el fin de la vida útil de la herramienta en ensayos estandarizados [15].

2.2.7 Ecuación de Taylor

La relación entre la velocidad de corte y la vida útil de la herramienta fue establecida por Frederick W. Taylor mediante un modelo empírico que permite estimar el tiempo de funcionamiento de una herramienta bajo condiciones de mecanizado constantes [32]:

$$VT^n = C \tag{2.4}$$

Donde:

- $V =$ Velocidad de corte (m/min).
- $T =$ Vida de la herramienta (min).

- $n =$ Constante experimental.
- $C =$ Constante de material.

2.2.8 Acero AISI 1018

El acero AISI 1018 es un acero de bajo carbono (0.18 % C) utilizado en la industria por su buena maquinabilidad, soldabilidad y ductilidad. Su microestructura de ferrita y perlita le otorga una resistencia mecánica moderada y permite procesarlo fácilmente en frío. Por su buen comportamiento en operaciones de mecanizado como el torneado, se emplea en la fabricación de ejes, pernos y componentes mecánicos de precisión [33].

La composición química del acero AISI 1018 determina sus propiedades mecánicas y su comportamiento en los procesos de fabricación. El carbono aporta una resistencia moderada manteniendo una alta ductilidad, mientras que el manganeso incrementa la tenacidad y actúa como desoxidante durante la colada. Por su parte, el fósforo y el azufre favorecen la maquinabilidad al facilitar la fragmentación de la viruta, manteniéndose en concentraciones reducidas para no comprometer la tenacidad del material.

Tabla 2.3. Composición química de ASTM AISI 1018 [33]

Elemento	**%**
Carbono (C)	0.15 – 0.20
Manganeso (Mn)	0.60 – 0.90 %
Fósforo (P)	0.04
Azufre (S)	0.05 %
El resto es hierro (Fe)	–

2.2.8.1 Propiedades mecánicas

En la Tabla se muestran diferentes propiedades mecánicas del acero AISI 1018.

Tabla 2.4. Propiedades mecánicas del acero AISI 1018 [34]

Propiedad	**Valor**
Resistencia a la tracción	370 – 440 MPa (hasta 480 MPa)
Límite elástico	290 – 370 MPa (hasta 420 MPa)
Elongación / Alargamiento	15 – 20 % (hasta 25 %)
Dureza	126 HB (≈ 71 HRB / 130 HV)
Módulo de elasticidad	200 – 205 GPa
Módulo de corte	80 GPa
Relación de Poisson	0.29

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Diseño de la investigación

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo y un diseño de tipo experimental, al evaluar el efecto de distintas condiciones de mecanizado sobre el desgaste de flanco (VB) de un inserto GTN-3 durante el tronzado del acero AISI 1018. Las variables de entrada fueron controladas y manipuladas experimentalmente, mientras que la variable de respuesta (VB) se midió y analizó cuantitativamente.

El diseño experimental corresponde a un arreglo factorial completo (3^2). Los factores independientes evaluados fueron la velocidad de corte (Vc) y el avance (f). La combinación de estos niveles definió los 9 ensayos analizados en las pruebas de tronzado.

Los niveles de los factores se seleccionaron a partir de la revisión de trabajos relacionados con el mecanizado del acero AISI 1018 y de las recomendaciones de operación del inserto GTN-3 empleado en la investigación.

Tabla 3.1. Niveles de los factores del diseño experimental [26], [35], [28]

Factor	Símbolo	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Velocidad de corte (m/min)	(Vc)	120	160	186
Avance (mm/rev)	(f)	0,10	0,14	0,15

3.2 Materiales y equipos

3.2.1 Material de la pieza de trabajo

Para las pruebas se utiliza acero AISI 1018. Se elige este material porque es común en la industria, fácil de mecanizar y se usa habitualmente como referencia en investigaciones de desgaste de herramientas.Tabla 3.2

Tabla 3.2. Características del material de trabajo, [26]

Característica	Especificación
Material	Acero AISI 1018
Forma	Eje macizo
Diámetro	2 in (50,8 mm)
Longitud	140 mm
Cantidad	3 ejes



Fig. 3.1. Ejes macizos de acero AISI 1018 utilizados como material de trabajo.Extraído de [26]

3.2.2 Herramienta de corte

Para la ejecución de los ensayos se emplea un inserto de carburo cementado GTN-3 Iron Root, diseñado para operaciones de tronzado y ranurado. El inserto es seleccionado de acuerdo con las condiciones de mecanizado establecidas para el acero AISI 1018 y las recomendaciones del fabricante.[26]

El inserto se montó en un portaherramienta modelo ZQ2525R-03, compatible con insertos GTN-3 de 3 mm de ancho de corte, garantizando una adecuada sujeción y estabilidad durante el proceso de mecanizado [36]. Tabla 3.3

Tabla 3.3. Ficha técnica del inserto GTN-3 utilizado en la investigación [36]

Característica	**Especificación**
Fabricante	Iron Root
Modelo	GTN-3
Designación comercial	SP300
Calidad del inserto	TG1025
Material del inserto	Carburo cementado (WC-Co)
Tipo de operación	Tronzado y ranurado
Ancho nominal de corte	3 mm
Geometría	GTN-3
Clasificación ISO de aplicación	P y M
Materiales recomendados	Aceros y aceros inoxidables
Velocidad de corte recomendada	120–330 m/min
Tipo de montaje	Mecánico mediante tornillo
Portaherramienta compatible	ZQ2525R-03
Refrigeración	En seco o con refrigerante, según la aplicación
Aplicación principal	Ranurado y tronzado de piezas cilíndricas

3.3 Equipos utilizados

3.3.1 Torno CNC

Tabla 3.4. Especificaciones del torno CNC [36]

Característica	Especificación
Equipo	**Torno CNC**
Marca	ROMI
Modelo	C420
Controlador	Siemens Sinumerik 828D
Ubicación	LABINTECDIMP – Escuela Politécnica Nacional



Fig. 3.2. Torno CNC utilizado durante el mecanizado de las probetas.Extraído de [36]

3.3.2 Microscopio para la medición del desgaste

Tabla 3.5. Especificaciones del microscopio

Característica	Especificación
Equipo	Microscopio óptico
Modelo	IM7200
Objetivos	10×, 20×, 50× y 100×
Cámara	PAXcam
Software	PAX-it versión 2026.50
Ubicación	Laboratorio de Ciencias de los Materiales, ESPE



Fig. 3.3. Microscopio óptico utilizado para la medición del desgaste de flanco. Extraído de [37]

3.3.2.1 Refrigerante empleado

Durante el mecanizado se utiliza un fluido de corte Valvoline PROMAX, empleado para las operaciones de tronzado de las probetas. La Figura 3. muestra el refrigerante utilizado y la Tabla 3.6 presenta sus principales características [38].

Tabla 3.6. Especificaciones del refrigerante empleado. [39]

Característica	Especificación
Marca	Valvoline
Producto	PROMAX
Tipo	Fluido de corte para mecanizado*
Mezcla	20:1 (agua : refrigerante)**
Aplicación	Refrigeración durante el mecanizado

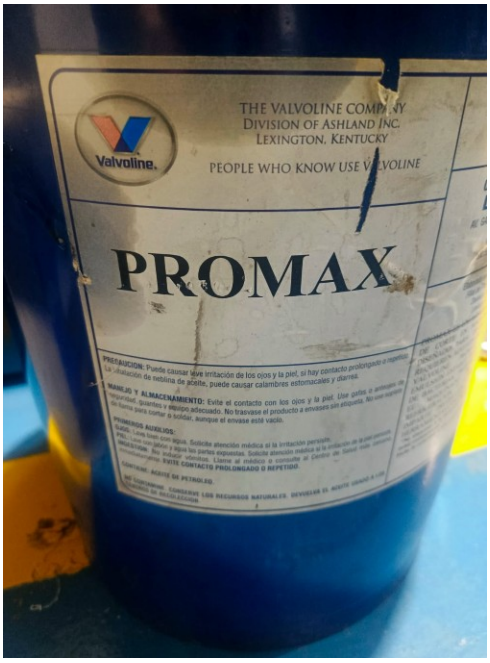


Fig. 3.4. Refrigerante Valvoline PROMAX utilizado durante el mecanizado de las probetas. Extraído de [40]

3.3.3 Diseño experimental

3.3.4 Selección de los parámetros de corte

En la Tabla 3.7. Se muestran los valores de velocidad de corte y avance se seleccionan a partir de la revisión de artículos científicos relacionados con el mecanizado del acero AISI 1018 mediante herramientas de carburo, considerando además el rango de operación recomendado para el inserto GTN-3 empleado en la investigación. Con base en esta información, se establecen

tres niveles para cada parámetro, procurando que sean representativos de las condiciones de mecanizado utilizadas en trabajos similares .

3.3.4.1 Factores y niveles del experimento

El diseño experimental considera dos factores de estudio: la velocidad de corte (Vc) y el avance (f). Cada factor se evalúa en tres niveles, como se muestra en la Tabla 3.8.

Tabla 3.7. Factores y niveles del diseño experimental

Factor	Símbolo	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Velocidad de corte (m/min)	Vc	120	160	186
Avance (mm/rev)	f	0,10	0,14	0,15

3.3.5 Matriz experimental

La combinación de los niveles de los dos factores da lugar a nueve condiciones experimentales, correspondientes a un diseño factorial completo 3*3. La distribución de los ensayos se presenta en la Tabla 3.9.

Tabla 3.8. Matriz del diseño experimental

Ensayo	Velocidad de corte (m/min)	Avance (mm/rev)
1	120	0,10
2	120	0,14
3	120	0,15
4	160	0,10
5	160	0,14
6	160	0,15
7	186	0,10
8	186	0,14
9	186	0,15

3.3.6 Procedimiento experimental

3.3.6.1 Elaboración de las probetas

Las probetas utilizadas en los ensayos se obtienen a partir de tres ejes macizos de acero AISI 1018. El proceso comprende el mecanizado de los ejes hasta obtener la geometría requerida para las pruebas de tronzado, verificando las dimensiones establecidas antes de su utilización en los ensayos experimentales. El procedimiento completo para la elaboración de las probetas se presenta en el Anexo A.

3.3.6.2 Ensayos de desgaste de flanco

Los ensayos experimentales se realizan mediante operaciones de tronzado en un torno CNC, utilizando un inserto GTN-3 y un portaherramienta ZQ2525R-03. Cada ensayo se ejecuta de acuerdo con la matriz de diseño experimental definida, variando la velocidad de corte y el avance. Durante las pruebas se emplea refrigerante y se registran las condiciones correspondientes a cada ensayo para su posterior análisis. El protocolo detallado de los ensayos se presenta en el Anexo B.

3.3.6.3 Medición del desgaste de flanco

Al finalizar cada ensayo, el inserto se retira para medir el desgaste de flanco (VB) mediante un microscopio óptico. Las imágenes obtenidas se analizan con el software del equipo para determinar el ancho del desgaste, aplicando el mismo procedimiento en todos los ensayos. El procedimiento detallado para la medición del desgaste se presenta en el Anexo C.

3.4 Descripción del problema experimental

El proceso estudiado corresponde a una operación de tronzado parcial utilizada como configuración de corte ortogonal. En cada ensayo se empleó un inserto nuevo y se realizó un único recorrido radial desde un radio inicial de $R_i = 50{,}8$ mm hasta un radio final de $R_f = 27$ mm.

La pieza mecanizada fue acero AISI 1018 y el mecanizado se realizó con refrigerante. El ancho efectivo de corte fue $w = 2{,}5$ mm.

Las variables dependientes son: $\mathrm{VB}_{\mathrm{máx}}$, $\mathrm{VB}_{\mathrm{mín}}$, $\mathrm{VB}_{\mathrm{med}}$, todas expresadas en micrómetros.

3.5 Datos experimentales

La presenta los valores utilizados para el modelado.

Tabla 3.9. Datos experimentales de velocidad de corte, avance y desgaste de flanco.

Ensayo	V_c (m/min)	f (mm/rev)	$\mathrm{VB}_{\mathrm{máx}}$ (μm)	$\mathrm{VB}_{\mathrm{mín}}$ (μm)	$\mathrm{VB}_{\mathrm{med}}$ (μm)
1	120	0,10	234	37	154,13
2	120	0,14	284	225	234,71
3	120	0,15	203	84	185,96
4	160	0,10	309	237	260,66
5	160	0,14	312	241	264,09
6	160	0,15	362	147	258,50
7	186	0,10	337	253	277,70
8	186	0,14	266	178	226,38
9	186	0,15	225	94	171,53

3.6 Cálculo del tiempo de corte

La relación instantánea entre velocidad de corte, radio y revoluciones por minuto es

$$V_c = \frac{2\pi R n}{1000}, \tag{3.1}$$

donde R se expresa en milímetros, n en revoluciones por minuto y V_c en metros por minuto. Despejando,

$$n(R) = \frac{1000 V_c}{2\pi R}. \tag{3.2}$$

Como el avance está dado en milímetros por revolución, la velocidad radial instantánea de penetración es

$$v_f(R) = f\, n(R). \tag{3.3}$$

El tiempo diferencial correspondiente a una variación radial dR es

$$dt = \frac{-dR}{f\, n(R)}. \tag{3.4}$$

Integrando desde R_i hasta R_f se obtiene

$$\begin{aligned} t_c &= \int_{R_f}^{R_i} \frac{dR}{f n(R)} \\ &= \int_{R_f}^{R_i} \frac{2\pi R}{1000 V_c f}\, dR \\ &= \frac{\pi \left(R_i^2 - R_f^2\right)}{1000 V_c f}. \end{aligned} \tag{3.5}$$

Para la geometría utilizada,

$$t_c = \frac{\pi\,(50{,}8^2 - 27^2)}{1000 V_c f}. \tag{3.6}$$

Los tiempos calculados se muestran en la .

Tabla 3.10. Tiempo de corte calculado para cada condición experimental.

Ensayo	V_c (m/min)	f (mm/rev)	t_c (min)
1	120	0,10	0,48476
2	120	0,14	0,34626
3	120	0,15	0,32317
4	160	0,10	0,36357
5	160	0,14	0,25969
6	160	0,15	0,24238
7	186	0,10	0,31275
8	186	0,14	0,22339
9	186	0,15	0,20850

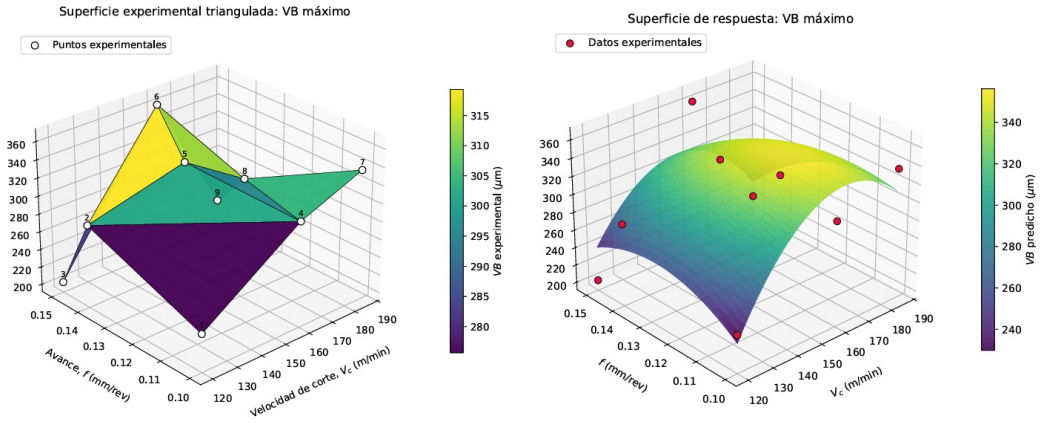
El tiempo no se incorpora como predictor independiente, porque está completamente determinado por V_c, f, R_i y R_f. En efecto,

$$V_c f\, t_c = \frac{\pi(R_i^2 - R_f^2)}{1000} = \text{constante}. \tag{3.7}$$

Por esta razón, introducir simultáneamente V_c, f y t_c produciría multicolinealidad matemática perfecta.

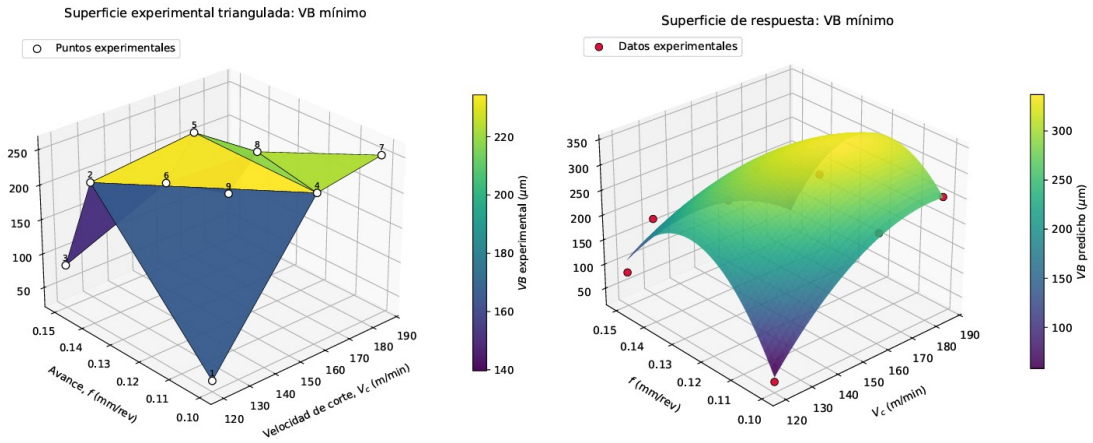
3.7 Exploración gráfica tridimensional

Se construyeron superficies tridimensionales de respuesta para cada variable de desgaste. Los puntos representan los datos experimentales y la superficie representa tanto la superficie triangulada como el modelo cuadrático ajustado.



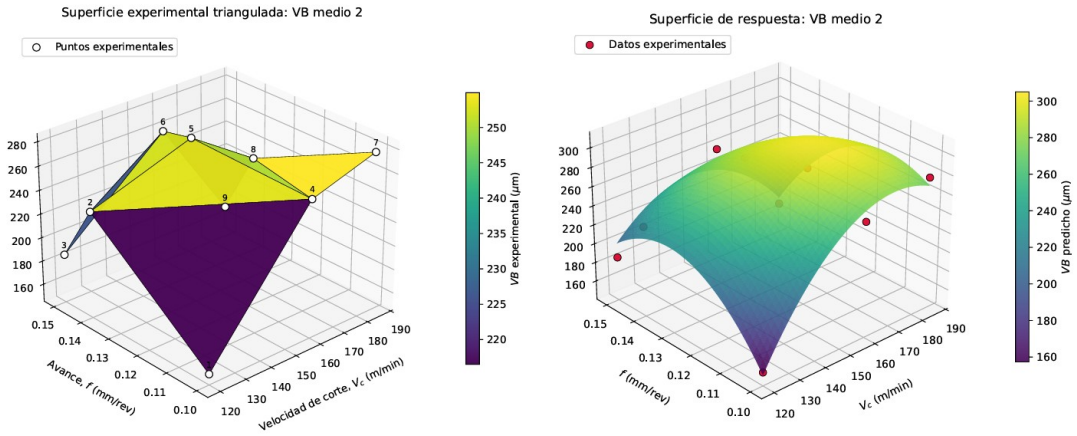
(a) Superficie para $VB_{máx}$. (b) Superficie para $VB_{mín}$.

Fig. 3.5. Superficies de respuesta del desgaste máximo.



(a) Superficie para $VB_{máx}$. (b) Superficie para $VB_{mín}$.

Fig. 3.6. Superficies de respuesta del desgaste mínimo.



(a) Superficie para $\mathrm{VB}_{\mathrm{med}}$. **(b)** Superficie para $\mathrm{VB}_{\mathrm{med}}$.

Fig. 3.7. Superficies de respuesta del desgaste medio.

Las superficies evidencian un comportamiento no monotónico respecto del avance. En particular, en varias combinaciones el desgaste aumenta al pasar de $f = 0{,}10$ a $f = 0{,}14$ mm/rev, pero disminuye al llegar a $f = 0{,}15$ mm/rev. Esta curvatura justifica evaluar modelos de superficie de respuesta, además de modelos potenciales simples.

3.8 Formulación de los modelos

3.8.1 Modelo potencial

El primer modelo considerado fue

$$VB = C\, V_c^{a} f^{b}. \tag{3.8}$$

Aplicando logaritmos naturales,

$$\ln(VB) = \ln(C) + a \ln(V_c) + b \ln(f). \tag{3.9}$$

Definiendo

el problema se convierte en una regresión lineal múltiple. Los exponentes a y b representan sensibilidades logarítmicas:

$$a = \frac{\partial \ln(VB)}{\partial \ln(V_c)}, \qquad b = \frac{\partial \ln(VB)}{\partial \ln(f)}. \tag{3.10}$$

La principal limitación de este modelo es que supone una respuesta monotónica respecto a cada predictor.

3.8.2 Modelo lineal con interacción

Para mejorar la estabilidad numérica, las variables se codificaron mediante

$$x_1 = \frac{V_c - 160}{33}, \tag{3.11}$$

$$x_2 = \frac{f - 0{,}13}{0{,}025}. \tag{3.12}$$

El modelo lineal con interacción es

$$VB = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2. \tag{3.13}$$

El término $\beta_{12} x_1 x_2$ permite que el efecto del avance dependa de la velocidad de corte y viceversa.

3.8.3 Modelo cuadrático de superficie de respuesta

El modelo cuadrático completo es

$$VB = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2. \tag{3.14}$$

Este modelo permite representar curvatura en ambas direcciones, interacción y la existencia de máximos o mínimos dentro del dominio experimental.

3.9 Criterios de evaluación

El coeficiente de determinación se calculó como

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} (VB_i - \widehat{VB}_i)^2}{\sum_{i=1}^{n} (VB_i - \overline{VB})^2}. \tag{3.15}$$

La raíz del error cuadrático medio fue

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (VB_i - \widehat{VB}_i)^2}. \tag{3.16}$$

El error absoluto medio fue

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} |VB_i - \widehat{VB}_i|. \tag{3.17}$$

También se utilizó validación cruzada dejando una observación fuera, LOOCV, debido al reducido tamaño de la muestra. El indicador correspondiente es $RMSE_{\text{LOOCV}}$.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 Resultados experimentales

4.1.1 Resultados obtenidos

La Tabla 4.1 presenta los resultados obtenidos en los nueve ensayos experimentales realizados bajo las condiciones de corte establecidas en el diseño experimental. Estos resultados constituyen la base para el análisis del comportamiento del desgaste de flanco.

Tabla 4.1. Resultados experimentales obtenidos para cada condición de corte.

Ensayo	V_c (m/min)	f (mm/rev)	RPM máx	VB_{max} (μm)	VB_{min} (μm)	Tiempo (min)	VB Exp. (μm)	Modelo A VB (μm)	VB Medido App (μm)	% Error Exp. vs App	% Error Exp. vs Mod. A	% Error Promedio
1	120	0,10	1415	234	37	0,09273	156	194,7227	154,13	1,20	24,82	10,99
2	120	0,14	1415	284	225	0,06623	231	191,2714	234,71	1,60	17,20	14,49
3	120	0,15	1415	203	84	0,06182	172	190,5673	185,96	8,10	10,79	9,88
4	160	0,10	1887	309	237	0,06955	256	239,6609	260,66	1,80	6,38	10,99
5	160	0,14	1887	312	241	0,04968	262	235,4036	264,09	0,80	10,15	14,49
6	160	0,15	1887	362	147	0,04636	256	234,5466	258,50	1,00	8,38	9,88
7	186	0,10	2194	337	253	0,05982	278	267,1775	277,70	0,10	1,77	10,99
8	186	0,14	2194	266	178	0,04273	226	262,4232	226,38	0,20	16,12	14,49
9	186	0,15	2194	225	94	0,03988	172	261,4671	171,53	0,30	10,46	9,88

Los tiempos de corte mostrados en la Tabla 3.10 y los utilizados en el capítulo 4 son equivalentes, están relacionados a través de las constantes mostradas en la Ec. 3.6. Son referencias para mostrar una evolución de desgaste, considerando que el tiempo no es una de las variables independientes en los modelos.

4.2 Análisis del desgaste de flanco

4.2.1 Relación entre el desgaste de flanco y el tiempo de mecanizado

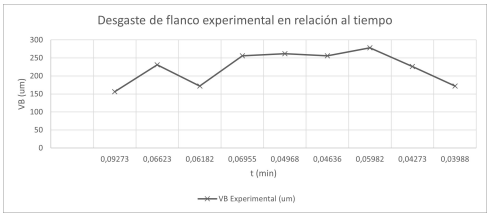


Fig. 4.1. Relación entre el Desgaste de Flanco (VB) y el Tiempo (t).

La Figura 4.1 presenta la evolución del desgaste de flanco experimental en función del tiempo de mecanizado para las nueve condiciones de corte evaluadas. De acuerdo con los resultados obtenidos, el mayor tiempo de mecanizado correspondió al ensayo realizado con una velocidad de corte de 120 m/min y un avance de 0,10 mm/rev (0,09273 min), registrando un desgaste de flanco de 156 µm. En contraste, el menor tiempo de mecanizado fue de 0,03988 min, correspondiente a la velocidad de corte de 186 m/min y un avance de 0,15 mm/rev, con un desgaste de 172 µm. Los resultados muestran que el tiempo de mecanizado disminuye al incrementar la velocidad de corte y el avance; sin embargo, el desgaste de flanco no presenta una relación lineal con el tiempo. Esto evidencia que el desgaste de la herramienta depende principalmente de las condiciones de corte, especialmente de la velocidad de corte y de las cargas mecánicas y térmicas generadas durante el proceso, más que del tiempo empleado en realizar la operación. En términos generales, los ensayos realizados con velocidades de corte intermedias y altas presentaron mayores valores de desgaste respecto a aquellos realizados con velocidades menores.

4.2.2 Comparación de resultados entre VB medido en app en relación al tiempo

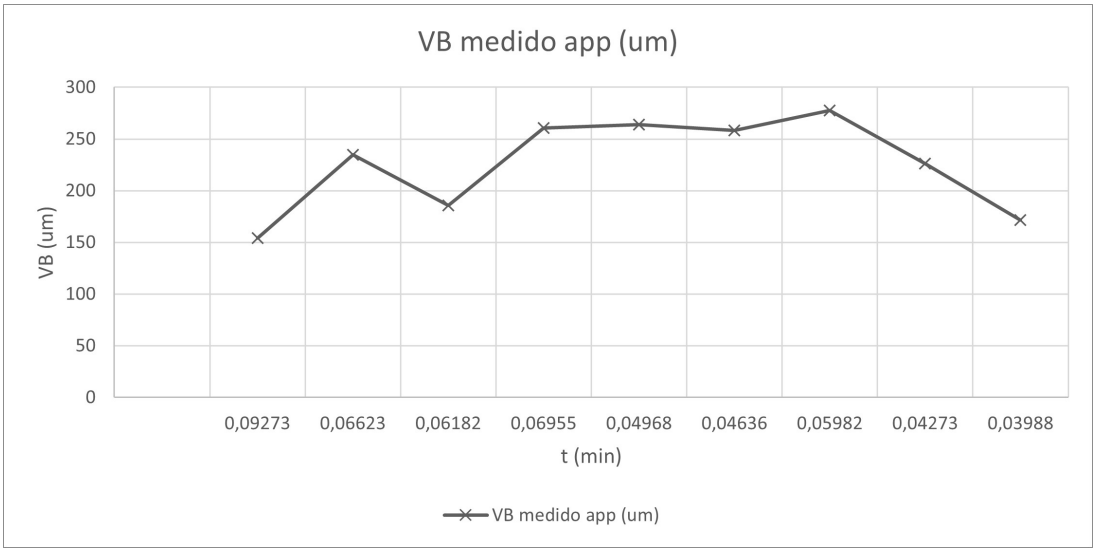


Fig. 4.2. Relación entre el Desgaste de Flanco medido en la app (VB) y el Tiempo (t).

Tabla 4.2. Resultados experimentales y de medición en la app obtenidos para cada condición de corte.

V_c **(m/min)**	f **(mm/rev)**	**Tiempo (min)**	VB **Exp.** (μ**m)**	VB **Medido App** (μ**m)**	**% Error Exp. vs App**
120	0,10	0,09273	156	154,13	1,20
120	0,14	0,06623	231	234,71	1,60
120	0,15	0,06182	172	185,96	8,10
160	0,10	0,06955	256	260,66	1,80
160	0,14	0,04968	262	264,09	0,80
160	0,15	0,04636	256	258,50	1,00
186	0,10	0,05982	278	277,70	0,10
186	0,14	0,04273	226	226,38	0,20
186	0,15	0,03988	172	171,53	0,30

La Figura 4.2 y la Tabla 4.2 comparan los valores de desgaste de flanco obtenidos experimentalmente mediante el microscopio con aquellos medidos mediante la aplicación móvil. Los resultados muestran que ambas mediciones presentan una tendencia muy similar para todas las

condiciones de corte evaluadas, observándose diferencias mínimas entre ambos métodos de medición.

Los porcentajes de error obtenidos varían entre 0,1 % y 8,1 %, siendo el mayor error registrado para la condición de 120 m/min y 0,15 mm/rev, mientras que el menor corresponde a la condición de 186 m/min y 0,10 mm/rev. Estos valores indican que la aplicación proporciona mediciones cercanas a las obtenidas mediante el microscopio, constituyéndose como una herramienta adecuada para verificar el desgaste de flanco cuando se dispone de una correcta calibración de la imagen. Las pequeñas diferencias observadas pueden atribuirse a la resolución de las imágenes, la calibración de la escala y la selección manual de los puntos de medición dentro de la aplicación.

4.2.3 Influencia de la velocidad de corte y Avance

Con el propósito de evaluar la influencia de la velocidad de corte sobre el desgaste de flanco, se analizaron los valores promedio de desgaste (VB) obtenidos para cada nivel de velocidad de corte empleado en los ensayos experimentales. La Figura 4.1 presenta la variación del desgaste de flanco en función de la velocidad de corte.

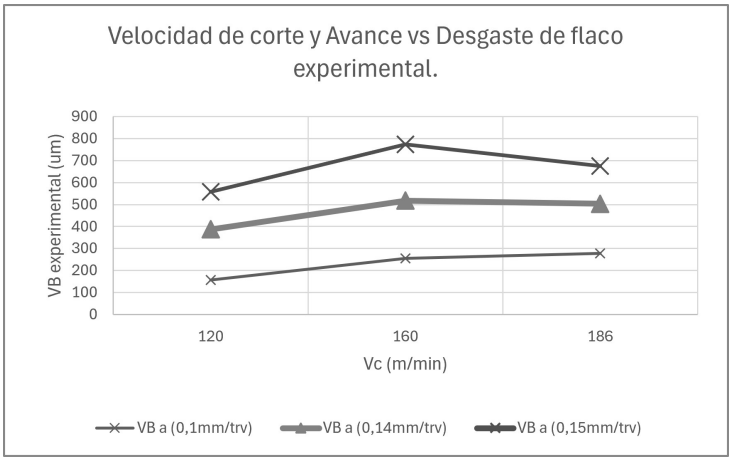


Fig. 4.3. Relación entre la Velocidad de corte (Vc) y Desgaste de flanco experimental (VB)

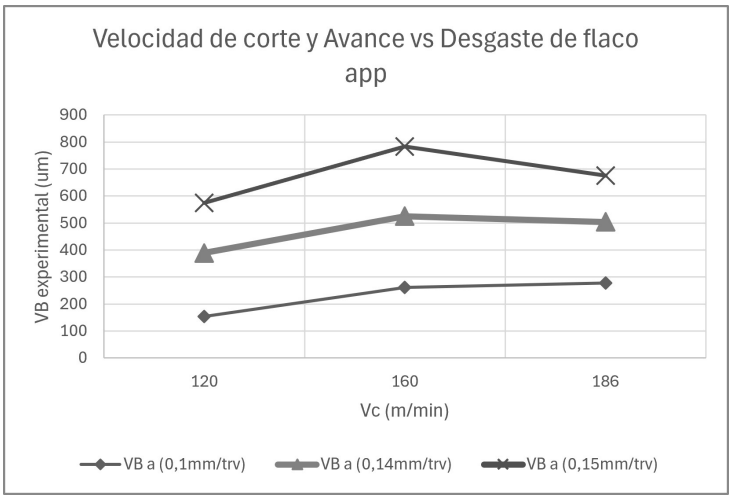


Fig. 4.4. Relación entre la Velocidad de corte (Vc) y Desgaste de flanco experimental (VB).

Para evaluar el comportamiento del desgaste de flanco (VB) en función de la velocidad de corte (Vc) y el avance (f), se analizaron los resultados obtenidos en las diferentes condiciones de mecanizado. Las Figuras 4.3 y 4.4 muestran los resultados experimentales y los valores obtenidos mediante la aplicación, respectivamente.

En la Figura 4.3 se observa que, para las diferentes velocidades de corte, el desgaste de flanco aumenta al pasar de un avance de 0,10 a 0,14 mm/rev. Los valores más altos de VB se presentan en 0,14 mm/rev, mientras que para 0,15 mm/rev se observa una ligera disminución. También se aprecia que, para un mismo valor de avance, las condiciones con mayor velocidad de corte presentan valores de desgaste más altos.

En la Figura 4.4 se presentan los resultados obtenidos mediante la aplicación. El comportamiento de las curvas mantiene una tendencia similar a la observada en los resultados experimentales. El VB aumenta hasta un avance de 0,14 mm/rev y presenta una ligera disminución al utilizar 0,15 mm/rev. De igual manera, los mayores valores de desgaste se presentan en las condiciones de mayor velocidad de corte.

Al comparar ambas figuras, se observa que la aplicación mantiene el comportamiento general de los resultados experimentales para las diferentes combinaciones de Vc y f. Aunque existen diferencias en los valores de VB, la tendencia de las curvas se conserva, lo que permite observar

la relación entre las condiciones de corte y el desgaste de flanco.

4.3 Comparación con investigaciones previas

4.3.1 Comparación de resultados entre VB experimental y Modelo A

Tabla 4.3. Resultados experimentales para validación con el modelo matemático de investigaciones previas

Tiempo (min)	VB Experimental (μm)	Modelo A VB (μm)
0,09273	156	194,7227
0,06623	231	191,2714
0,06182	172	190,5673
0,06955	256	239,6609
0,04968	262	235,4036
0,04636	256	234,5466
0,05982	272	267,1775
0,04273	226	262,4232
0,03988	172	261,4671

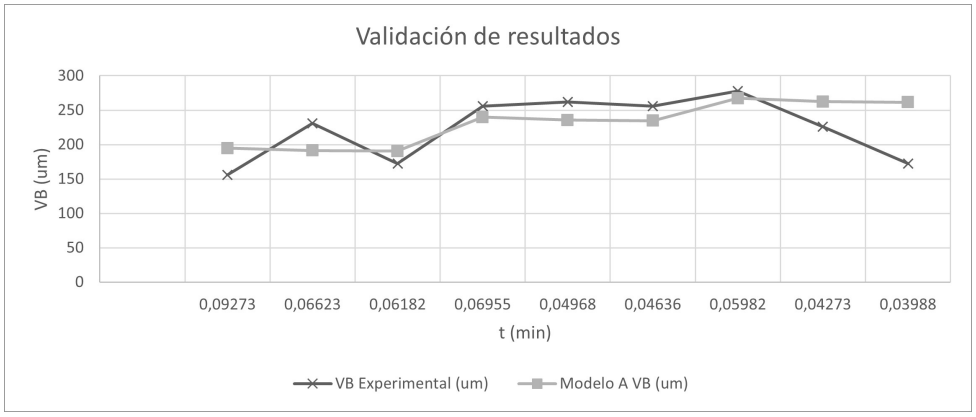


Fig. 4.5. Relación del Desgaste de Flanco (VB) con investigaciones previas y el Tiempo (t).

Tabla 4.4. Resultados de porcentajes de error entre valores experimentales y del modelo A.

V_c **(m/min)**	f **(mm/rev)**	**Tiempo (min)**	VB **Exp.** (μ**m**)	**Modelo A** VB (μ**m**)	**% Error Exp. vs Mod. A**	**% Error Promedio**
120	0,10	0,09273	156	194,7227	24,82	10,99
120	0,14	0,06623	231	191,2714	17,20	14,49
120	0,15	0,06182	172	190,5673	10,79	9,88
160	0,10	0,06955	256	239,6609	6,38	10,99
160	0,14	0,04968	262	235,4036	10,15	14,49
160	0,15	0,04636	256	234,5466	8,38	9,88
186	0,10	0,05982	278	267,1775	1,77	10,99
186	0,14	0,04273	226	262,4232	16,12	14,49
186	0,15	0,03988	172	261,4671	10,46	9,88

La Figura 4.7 compara los resultados experimentales obtenidos con los valores estimados mediante el Modelo A reportado en investigaciones previas. En términos generales, ambas curvas presentan una tendencia semejante, indicando que el modelo matemático reproduce adecuadamente el comportamiento del desgaste de flanco bajo las condiciones de corte evaluadas. Los porcentajes de error presentados en la Tabla 4.4 oscilan entre 1,77 % y 24,82 %, mientras que los errores promedio para cada velocidad de corte se encuentran entre 9,88 % y 14,49 %. Estas diferencias pueden atribuirse a variaciones propias del proceso experimental, como las características del material mecanizado, las condiciones reales de corte o la incertidumbre inherente a la medición del desgaste. En conjunto, los resultados obtenidos evidencian una concordancia aceptable entre el modelo matemático y los valores experimentales, validando la capacidad del modelo para estimar el desgaste de flanco dentro del rango de condiciones evaluadas.

4.4 Determinación de la condición de corte más favorable

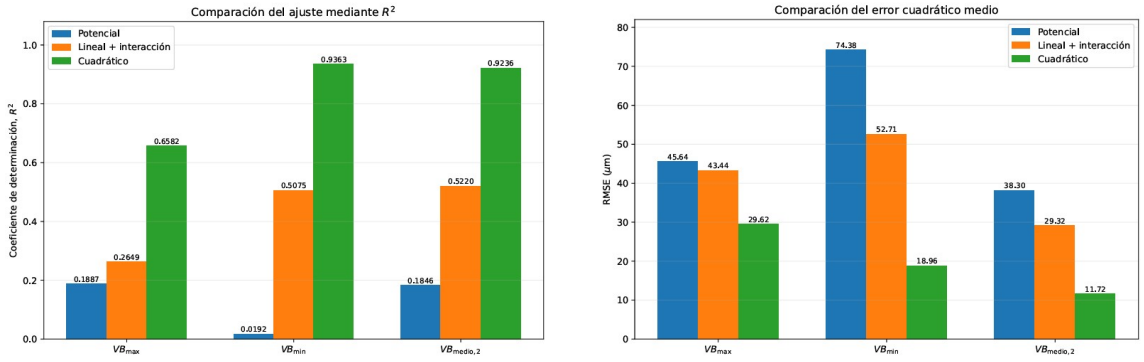
4.4.1 Condición con menor desgaste de flanco

Los resultados experimentales presentados en la Tabla 4.4 evidencian que la condición de corte correspondiente a una velocidad de corte de 120 m/min y un avance de 0,10 mm/rev produjo el menor desgaste de flanco, registrándose un valor de 156 μm. Este resultado indica que la combinación de una velocidad de corte moderada y un avance bajo favorece una menor degradación del filo de corte, al reducir las solicitaciones térmicas y mecánicas generadas durante el mecanizado. Asimismo, esta condición presentó el mayor tiempo de mecanizado (0,09273 min), debido a la menor velocidad de remoción de material. En contraste, las condiciones de mayor velocidad de corte redujeron el tiempo de mecanizado, pero incrementaron el desgaste de flanco, alcanzando un valor máximo de 278 μm. Este comportamiento evidencia que el aumento de la velocidad de corte acelera los mecanismos de desgaste de la herramienta, lo que puede disminuir su vida útil. En consecuencia, para las condiciones evaluadas en esta investigación, la combinación de 120 m/min de velocidad de corte y 0,10 mm/rev de avance representa la condición de corte más favorable cuando el criterio de evaluación es la minimización del desgaste de flanco. Estos resultados permiten establecer una condición de mecanizado que favorece la conservación del filo de corte y proporciona una base experimental para la selección de parámetros orientados a reducir el desgaste de la herramienta.

4.5 Resultados de ajuste

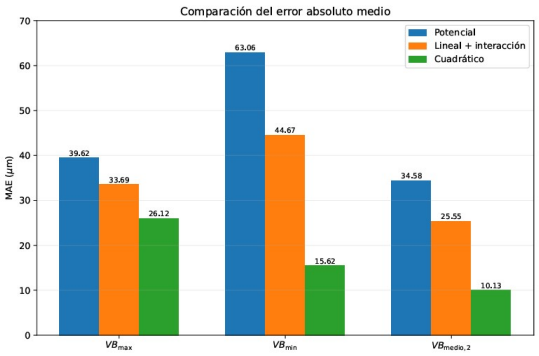
Tabla 4.5. Comparación de modelos para las cuatro variables de desgaste.

Respuesta	Modelo	R^2	RMSE (μm)	MAE (μm)	RMSE LOOCV (μm)
$VB_{máx}$	Potencial	0,1887	45,64	39,62	66,54
$VB_{máx}$	Lineal + interacción	0,2649	43,44	33,69	76,80
$VB_{máx}$	Cuadrático	0,6582	29,62	26,12	96,76
$VB_{mín}$	Potencial	0,0192	74,38	63,06	130,12
$VB_{mín}$	Lineal + interacción	0,5075	52,71	44,67	136,40
$VB_{mín}$	Cuadrático	0,9363	18,96	15,62	65,43
VB_{med}	Potencial	0,1846	38,30	34,58	65,66
VB_{med}	Lineal + interacción	0,5220	29,32	25,55	64,10
VB_{med}	Cuadrático	**0,9236**	**11,72**	**10,13**	**35,93**

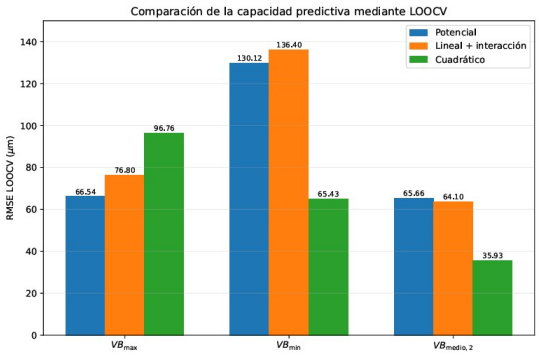


(a) Coeficiente de determinación R^2. **(b)** Raíz del error cuadrático medio.

Fig. 4.6. Comparación multicriterio de los modelos potencial, lineal con interacción y cuadrático para las variables de desgaste de flanco. Un valor mayor de R^2 indica mejor ajuste, mientras que valores menores de RMSE, MAE y $RMSE_{LOOCV}$ indican menor error. .



(c) Error absoluto medio.



(d) Error de validación cruzada LOOCV.

Fig. 4.7. El modelo cuadrático para $\mathrm{VB}_{\mathrm{medio},2}$ presenta el mejor desempeño global, con $R^2 = 0{,}9236$, RMSE de $11{,}72\,\mu$m, MAE de $10{,}13\,\mu$m y $\mathrm{RMSE}_{\mathrm{LOOCV}}$ de $35{,}93\,\mu$m.

El modelo cuadrático de $\mathrm{VB}_{\mathrm{med}}$ presenta el mayor R^2, el menor RMSE, el menor MAE y el menor error LOOCV entre los modelos ajustados a las dos mediciones medias. Por esta razón se seleccionó como modelo final.

4.6 Modelos potenciales obtenidos

Los modelos potenciales ajustados fueron:

$$\mathrm{VB}_{\mathrm{máx}} = 21{,}8875\, V_c^{0{,}411354}\, f^{-0{,}227701}, \tag{4.1}$$

$$\mathrm{VB}_{\mathrm{mín}} = 0{,}0655723\, V_c^{1{,}569791}\, f^{0{,}101418}, \tag{4.2}$$

$$\mathrm{VB}_{\mathrm{med}} = 17{,}8964\, V_c^{0{,}460727}\, f^{-0{,}096949}. \tag{4.3}$$

Aunque estos modelos tienen una interpretación fenomenológica sencilla, sus coeficientes de determinación son reducidos. En particular, el modelo potencial para $\mathrm{VB}_{\mathrm{med}}$ presenta

$$R^2 = 0{,}1846,$$

lo que indica que la forma potencial no representa adecuadamente la curvatura observada en los datos.

4.7 Modelo final seleccionado

El modelo final corresponde al ajuste cuadrático de $\mathrm{VB}_{\mathrm{med}}$. Utilizando las variables codificadas de las ecuaciones, se obtuvo

$$\boxed{\begin{aligned}\widehat{\mathrm{VB}}_{\mathrm{med}} &= 297{,}5961 - 5{,}0179x_1 - 37{,}2811x_2 \\ &\quad - 35{,}1498x_1x_2 - 51{,}4319x_1^2 - 48{,}9010x_2^2.\end{aligned}} \tag{4.4}$$

Las métricas del modelo fueron

$$R^2 = 0{,}9236, \qquad RMSE = 11{,}72\ \mu\mathrm{m}, \qquad MAE = 10{,}13\ \mu\mathrm{m}, \tag{4.5}$$

mientras que

$$RMSE_{\mathrm{LOOCV}} = 35{,}93\ \mu\mathrm{m}. \tag{4.6}$$

El valor de R^2 indica que el modelo describe aproximadamente el $92{,}4\,\%$ de la variabilidad observada dentro del dominio experimental. Sin embargo, el error de validación cruzada es notablemente mayor que el error de ajuste, lo que indica que la capacidad predictiva externa debe confirmarse mediante réplicas o nuevos puntos experimentales.

4.8 Interpretación de los coeficientes

El efecto local de la velocidad codificada es

$$\frac{\partial \widehat{\mathrm{VB}}_{\mathrm{med}}}{\partial x_1} = -5{,}0179 - 35{,}1498x_2 - 102{,}8638x_1. \tag{4.7}$$

El efecto local del avance codificado es

$$\frac{\partial \widehat{\mathrm{VB}}_{\mathrm{med}}}{\partial x_2} = -37{,}2811 - 35{,}1498x_1 - 97{,}8020x_2. \tag{4.8}$$

Estas expresiones muestran que el efecto de V_c depende del nivel de f y que el efecto de f depende del nivel de V_c. Por tanto, la interacción no puede ignorarse.

Los coeficientes cuadráticos negativos indican una superficie cóncava dentro del dominio estudiado. Esto produce una región de desgaste alto próxima a condiciones intermedias y valores más bajos hacia algunos bordes del dominio experimental.

4.9 Mapa de contornos del modelo final

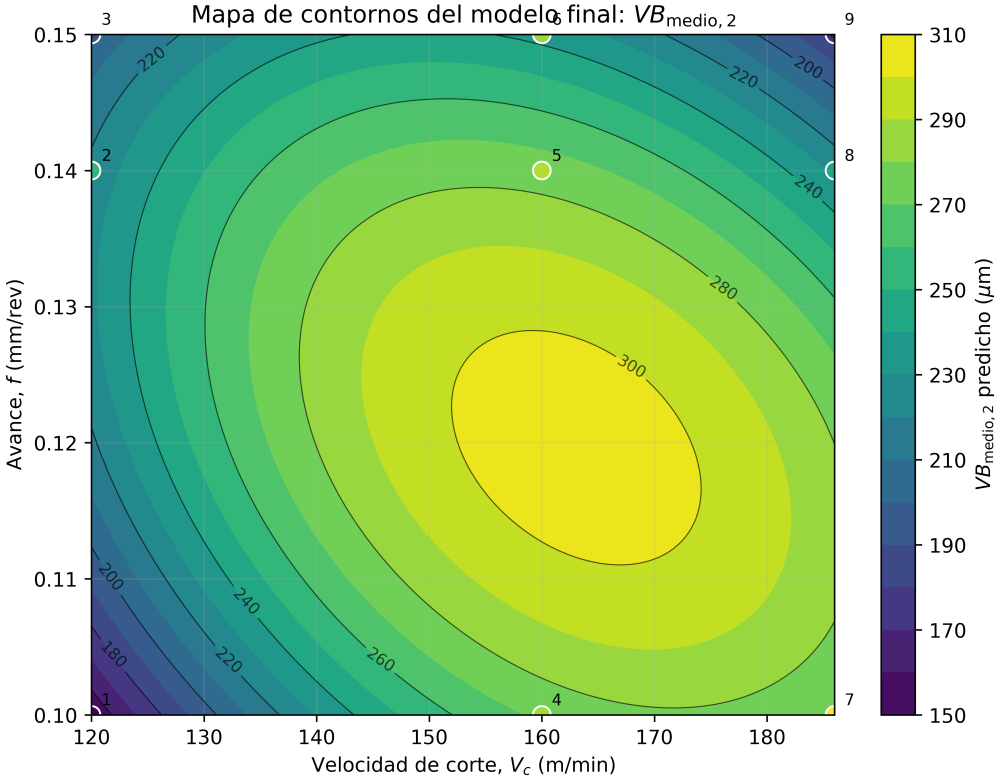


Fig. 4.8. Mapa de contornos del modelo cuadrático final para VB_{med}. Los números identifican los ensayos experimentales.

$$120 \leq V_c \leq 186 \text{ m/min}, \tag{4.9}$$

$$0{,}10 \leq f \leq 0{,}15 \text{ mm/rev}. \tag{4.10}$$

No se recomienda extrapolar la ecuación fuera de estos límites.

4.10 Valores observados y predichos

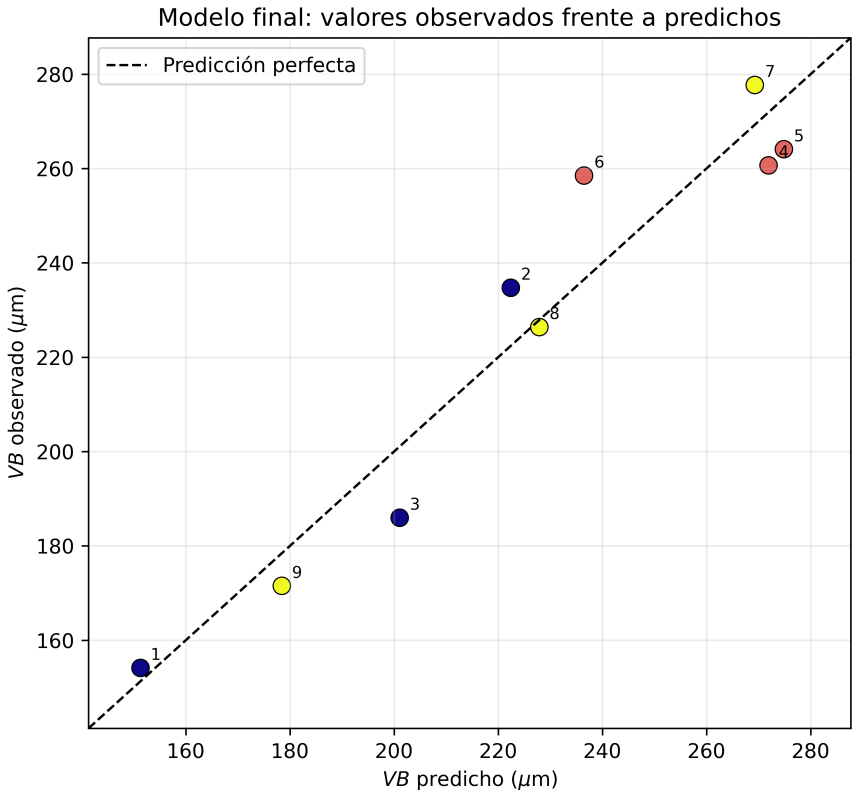


Fig. 4.9. Comparación entre valores observados y predichos por el modelo final. La línea discontinua representa predicción perfecta.

Los puntos de la 4.9 permanecen próximos a la recta de predicción perfecta, lo que confirma el buen ajuste interno del modelo cuadrático.

4.11 Análisis de residuos

El residuo del ensayo i se define como

$$e_i = VB_i - \widehat{VB}_i. \tag{4.11}$$

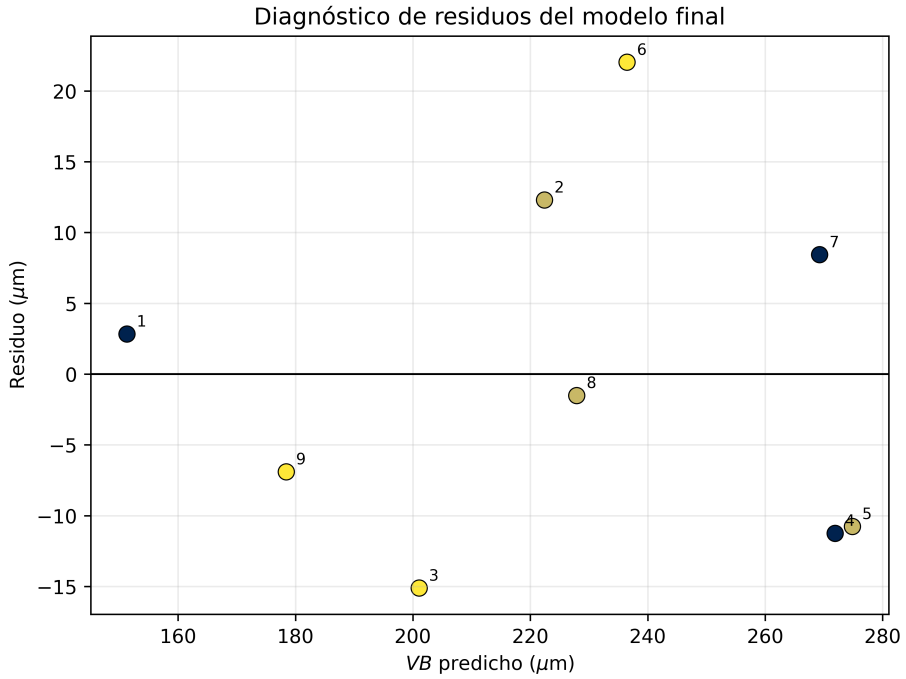


Fig. 4.10. Residuos del modelo final en función del desgaste predicho.

Los residuos se distribuyen alrededor de cero y no muestran una tendencia lineal evidente. No obstante, con solo nueve observaciones no puede realizarse una evaluación concluyente de normalidad, homocedasticidad o independencia. El diagnóstico debe considerarse exploratorio.

4.12 Análisis dimensional

Se adopta como longitud característica

$$L = R_i - R_f = 23{,}8\ \text{mm}. \tag{4.12}$$

Considerando las variables VB, V_c, f, t, w y L, pueden definirse los grupos

$$\Pi_1 = \frac{VB}{L}, \tag{4.13}$$

$$\Pi_2 = \frac{f}{L}, \tag{4.14}$$

$$\Pi_3 = \frac{1000 V_c t}{L}, \tag{4.15}$$

$$\Pi_4 = \frac{w}{L}. \tag{4.16}$$

La relación dimensional general puede escribirse como

$$\frac{VB}{L} = \Phi\left(\frac{f}{L}, \frac{1000 V_c t}{L}, \frac{w}{L}\right). \tag{4.17}$$

Sin embargo, sustituyendo la ecuación del tiempo de corte,

$$1000 V_c t = \frac{\pi(R_i^2 - R_f^2)}{f}, \tag{4.18}$$

por lo que Π_3 no es independiente de f. Además, w permanece constante en los nueve ensayos, de modo que Π_4 no explica variaciones entre condiciones. En consecuencia, el análisis dimensional se reduce a una relación normalizada del tipo

$$\boxed{\frac{VB}{L} = \Phi\left(\frac{V_c}{V_{c,\text{ref}}}, \frac{f}{f_{\text{ref}}}\right)} \tag{4.19}$$

con

$$V_{c,\text{ref}} = 160 \text{ m/min}, \qquad f_{\text{ref}} = 0{,}14 \text{ mm/rev}. \tag{4.20}$$

4.13 Índice adimensional de severidad

Debido a que el modelo potencial no reprodujo adecuadamente la curvatura, se definió un índice empírico de severidad basado en el mejor modelo:

$$\boxed{\Psi(V_c, f) = \frac{\widehat{\mathrm{VB}}_{\mathrm{med}}(V_c, f)}{\widehat{\mathrm{VB}}_{\mathrm{med}}(160, 0{,}14)}} \tag{4.21}$$

La condición de referencia cumple

$$\Psi = 1. \tag{4.22}$$

La interpretación es:

- $\Psi < 1$: severidad de desgaste inferior a la condición de referencia;
- $\Psi = 1$: severidad equivalente a la condición de referencia;
- $\Psi > 1$: severidad superior a la condición de referencia.

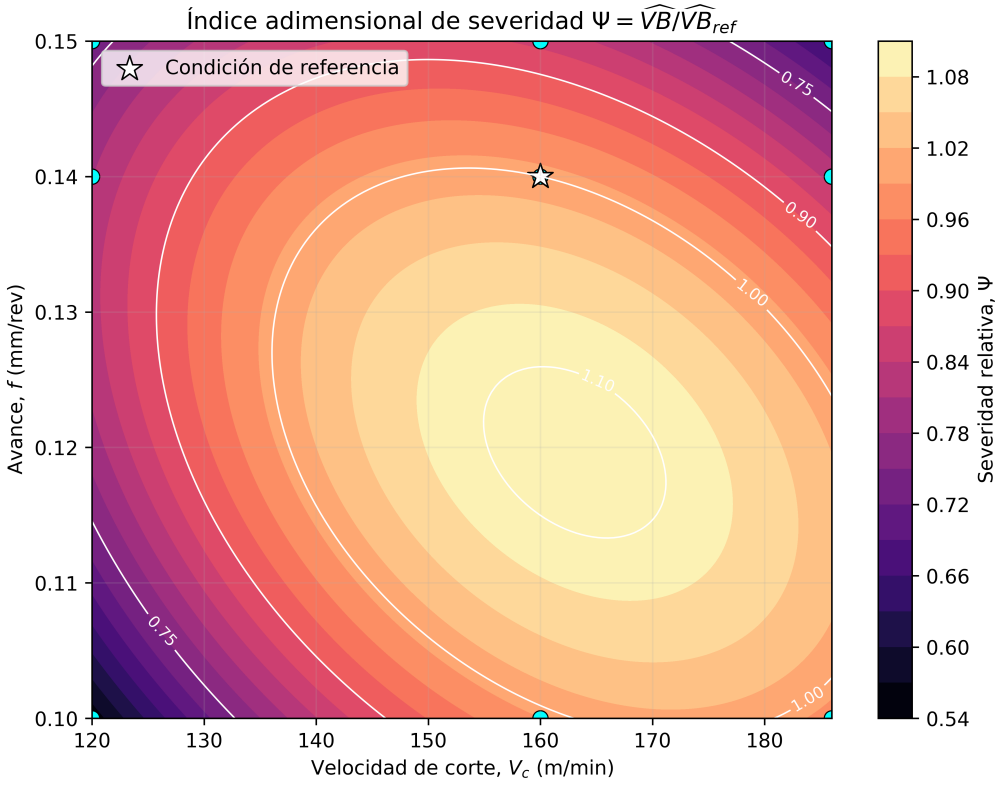


Fig. 4.11. Mapa del índice adimensional empírico de severidad del desgaste.

Este índice combina el efecto de la velocidad, el avance, la interacción y la curvatura. No constituye un número universal del mecanizado, sino un índice empírico válido para el sistema estudiado: acero AISI 1018, inserto empleado, refrigeración utilizada, geometría de tronzado y dominio experimental considerado.

4.14 Interpretación física de los resultados

El comportamiento observado puede atribuirse a la superposición de varios mecanismos:

1. El incremento de V_c aumenta la velocidad de deslizamiento y puede elevar la temperatura local en la interfaz herramienta–viruta.

2. El aumento de f reduce el tiempo total de corte para un mismo recorrido radial.

3. El aumento de f incrementa el espesor no deformado de viruta y las solicitaciones mecá-

nicas sobre el filo.

4. La refrigeración puede modificar la temperatura, la adhesión y la evacuación de viruta de manera no lineal.
5. La geometría de tronzado produce condiciones de confinamiento y evacuación diferentes de las de un torneado longitudinal convencional.
6. La presencia de interacción indica que el efecto de una variable no es constante, sino que depende del nivel de la otra.

La disminución del desgaste observada en algunas condiciones de avance alto no debe interpretarse como una regla general. Puede estar asociada a menor tiempo de exposición, cambios en la formación de viruta, mejor evacuación, variaciones locales de adhesión o dispersión experimental.

4.15 Limitaciones del modelo

El modelo presenta las siguientes limitaciones:

- Se dispone de nueve ensayos y no existen réplicas en cada combinación;
- El modelo cuadrático utiliza seis coeficientes, dejando pocos grados de libertad residuales;
- No se dispone de la dureza real de las probetas;
- No se incorporaron fuerza de corte, temperatura, vibración o rugosidad;
- Cada inserto fue evaluado después de un único recorrido;
- No se modela todavía la evolución temporal del desgaste;
- El modelo no debe utilizarse para extrapolar vida de herramienta;
- El modelo no debe extrapolarse fuera del dominio experimental.

El modelo debe considerarse descriptivo e interpolativo. Para fortalecer su capacidad predictiva se recomienda realizar réplicas en los puntos centrales y nuevos ensayos de validación dentro del dominio.

4.16 Síntesis de resultados del modelado

El análisis permitió establecer las siguientes conclusiones:

1. El tiempo de mecanizado no debe introducirse como predictor independiente junto con V_c y f, porque está matemáticamente determinado por estas variables y por la geometría del recorrido.

2. Los modelos potenciales presentan baja capacidad explicativa para las cuatro respuestas, debido al comportamiento no monotónico del desgaste respecto al avance.

3. Los modelos cuadráticos reproducen mejor la curvatura observada en las superficies experimentales.

4. Las dos mediciones independientes del desgaste medio presentan alta concordancia, con $r = 0{,}9946$ y un sesgo medio de $2{,}74$ μm.

5. El mejor modelo fue el cuadrático correspondiente a VB_{med}, con $R^2 = 0{,}9236$, $RMSE = 11{,}72$ μm y $MAE = 10{,}13$ μm.

6. El error LOOCV de $35{,}93$ μm evidencia que el modelo necesita validación adicional antes de emplearse como herramienta predictiva general.

7. El índice adimensional de severidad Ψ permite comparar las combinaciones de velocidad y avance respecto de una condición de referencia, conservando la interacción y la curvatura del modelo final.

CONCLUSIONES

Se definieron los parámetros de corte y los criterios de evaluación del desgaste de flanco mediante la revisión de normativa especializada e investigaciones previas, estableciendo como variables de estudio la velocidad de corte, el avance y el tiempo de mecanizado. Asimismo, la utilización de un modelo predictivo reportado en la literatura proporcionó una base técnica para estimar la evolución del desgaste de la herramienta y comparar posteriormente los resultados experimentales, garantizando que la metodología aplicada estuviera sustentada en criterios científicos y técnicos.

Los ensayos experimentales realizados bajo las diferentes condiciones de corte permitieron evaluar el comportamiento del desgaste de flanco del inserto durante el mecanizado del acero AISI 1018. Los resultados evidenciaron que el incremento de la velocidad de corte disminuye el tiempo de mecanizado, pero favorece el aumento del desgaste de la herramienta. Entre las condiciones evaluadas, la combinación de 120 m/min de velocidad de corte y 0,10 mm/rev de avance presentó el menor desgaste de flanco (156 µm), constituyéndose como la condición más favorable cuando el criterio de evaluación es la conservación de la herramienta.

La modelización del desgaste de flanco permitió comparar los modelos potencial, lineal con interacción y cuadrático de superficie de respuesta. El modelo cuadrático correspondiente al desgaste medio presentó el mejor desempeño dentro del dominio experimental, con un $R^2 = 0{,}9236$, RMSE de 11,72 µm y MAE de 10,13 µm, evidenciando la existencia de interacción y comportamiento no lineal entre la velocidad de corte y el avance. Sin embargo, el RMSE obtenido mediante validación cruzada LOOCV (35,93 µm) indica que el modelo debe considerarse descriptivo e interpolativo y requiere ensayos adicionales antes de utilizarse con fines predictivos generales.

RECOMENDACIONES

Se recomienda que futuras investigaciones profundicen en el desarrollo de modelos predictivos del desgaste de flanco mediante la incorporación de una mayor cantidad de datos experimentales y procedimientos de validación. Esto permitirá obtener modelos con mayor capacidad de representación del comportamiento real del desgaste, favoreciendo su aplicación como herramienta de apoyo en estudios relacionados con los procesos de mecanizado.

Se recomienda ampliar el alcance de futuras investigaciones mediante la integración del desgaste de flanco con otros indicadores que permitan evaluar el desempeño del proceso de manera conjunta. Este enfoque contribuirá a una comprensións del comportamiento del mecanizado y facilitará el desarrollo de criterios de evaluación que sirvan como base para investigaciones posteriores en el área de manufactura.

ANEXOS

4.17 ANEXO A. PROTOCOLO PARA LA OBTENCIÓN DE PROBETAS DE ENSAYO

4.17.1 OBJETIVO

Obtener 3 probetas de acero AISI 1018 con la geometría establecida en el plano de diseño para su posterior utilización en los ensayos de desgaste de flanco.

4.17.2 PERSONAS A CARGO DE LA PRUEBA

- Evelin Fernanda Gallegos Morales.
- Operador del torno.

4.17.3 ACTIVIDADES

Para obtener las probetas de ensayo se realizan las siguientes actividades:

1. Elaborar el plano de fabricación de las probetas de ensayo.
2. Seleccionar la barra maciza de acero AISI 1018.
3. Verificar las dimensiones iniciales del material.
4. Montar la pieza en el torno.
5. Mecanizar la geometría establecida en el plano de fabricación hasta obtener quince discos en cada eje.
6. Verificar las dimensiones finales de las probetas.
7. Retirar y almacenar las probetas obtenidas.

ENTRADAS

- Barra maciza de acero AISI 1018.
- Torno.
- Instrumentos de medición.
- Plano de fabricación.

SALIDAS

- Tres probetas de acero AISI 1018 mecanizadas.
- Probetas conformadas por quince discos.
- Probetas listas para los ensayos de desgaste de flanco.

ESQUEMA

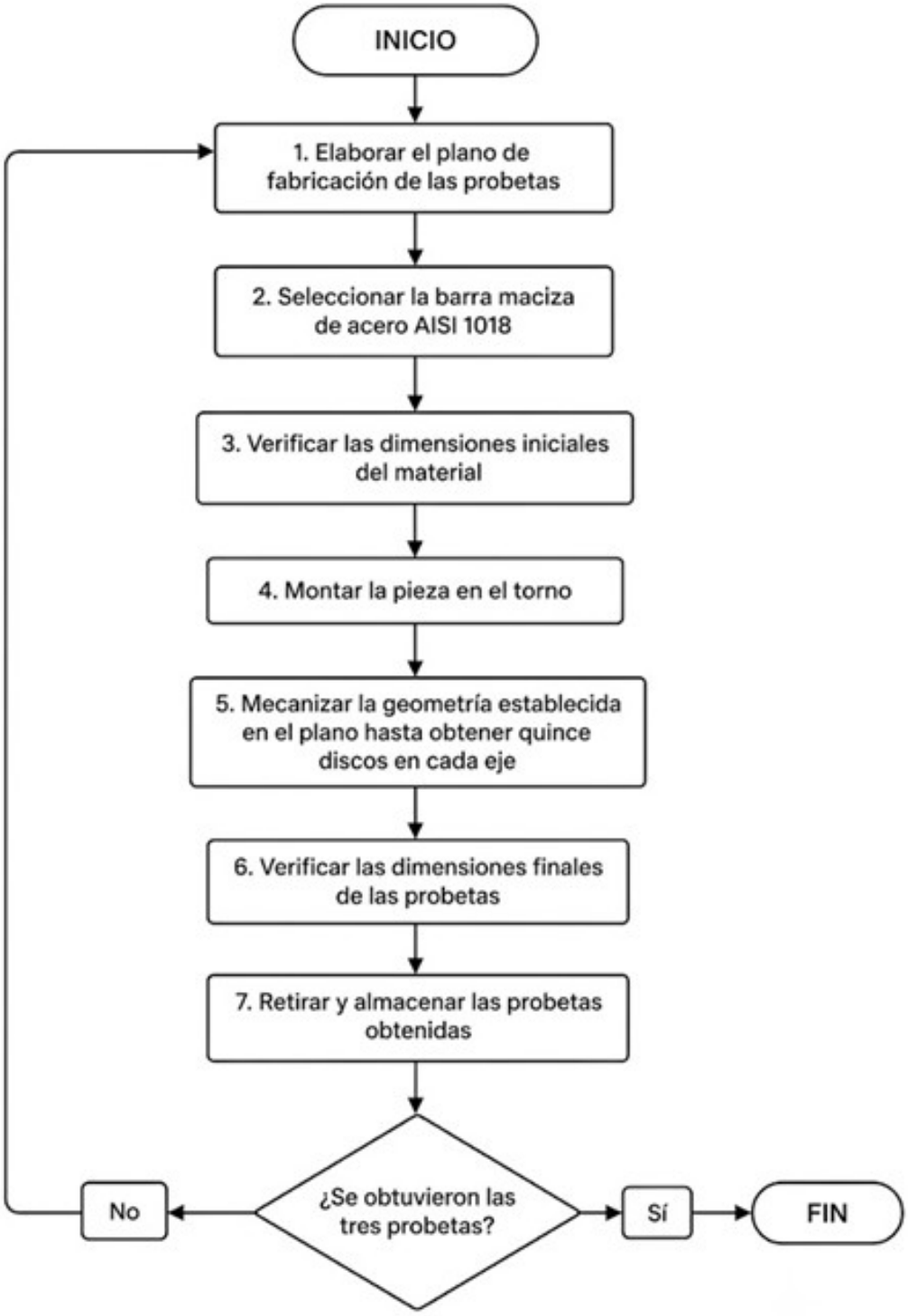


Fig. 4.12. Diagrama de actividades para la obtención de probetas de ensayo.

OBSERVACIONES

Durante el proceso de fabricación se verificó que las probetas obtenidas cumplieran con la geometría requerida para su utilización en los ensayos posteriores.

CONCLUSIONES

- La fabricación de las probetas permitió disponer del material necesario para la ejecución de los ensayos experimentales planteados en la investigación.
- Las probetas obtenidas constituyen la base experimental para el posterior análisis y modelado del desgaste de flanco bajo diferentes condiciones de corte.



Fig. 4.13. Probetas mecanizadas antes de los ensayos de desgaste.

Se adjunta al final del documento el plano correspondiente al término de esta sección

4.18 ANEXO B. PROTOCOLO PARA LA OBTENCIÓN DEL DESGASTE DE FLANCO DURANTE EL PROCESO DE TRONZADO

4.18.1 OBJETIVO

Obtener el desgaste de flanco en insertos GTN-3 mediante operaciones de ranurado sobre probetas de acero AISI 1018, bajo diferentes condiciones de velocidad de corte y avance, para posteriormente realizar su medición del flanco y análisis.

PERSONAS A CARGO DE LA PRUEBA

- Evelin Fernanda Gallegos Morales.
- MSc. Patricio Fuentes-Operador del torno CNC.

ACTIVIDADES

Para obtener el desgaste de flanco se realizan las siguientes actividades:

1. Verificar el estado inicial del inserto GTN-3.
2. Montar el inserto GTN-3 en la porta herramienta ZQ20×20.
3. Colocar y sujetar la probeta de acero AISI 1018 en el torno.
4. Verificación de los parámetros en el plano.
5. Cargar el código de mecanizado correspondiente.
6. Configurar los parámetros de corte establecidos para cada ensayo.
7. Ejecutar el proceso de ranurado mediante corte ortogonal.
8. Finalizar el mecanizado correspondiente a cada condición experimental.
9. Retirar el inserto para su posterior medición y análisis del desgaste.

ENTRADAS

- Tres probetas de acero AISI 1018.
- Insertos GTN-3.
- Porta herramienta ZQ20×20.
- Torno CNC.
- Código de mecanizado.
- Parámetros de corte (velocidad de corte y avance).

SALIDAS

- Insertos con desgaste de flanco generado.
- Herramientas preparadas para la posterior medición del desgaste de flanco.

ESQUEMA

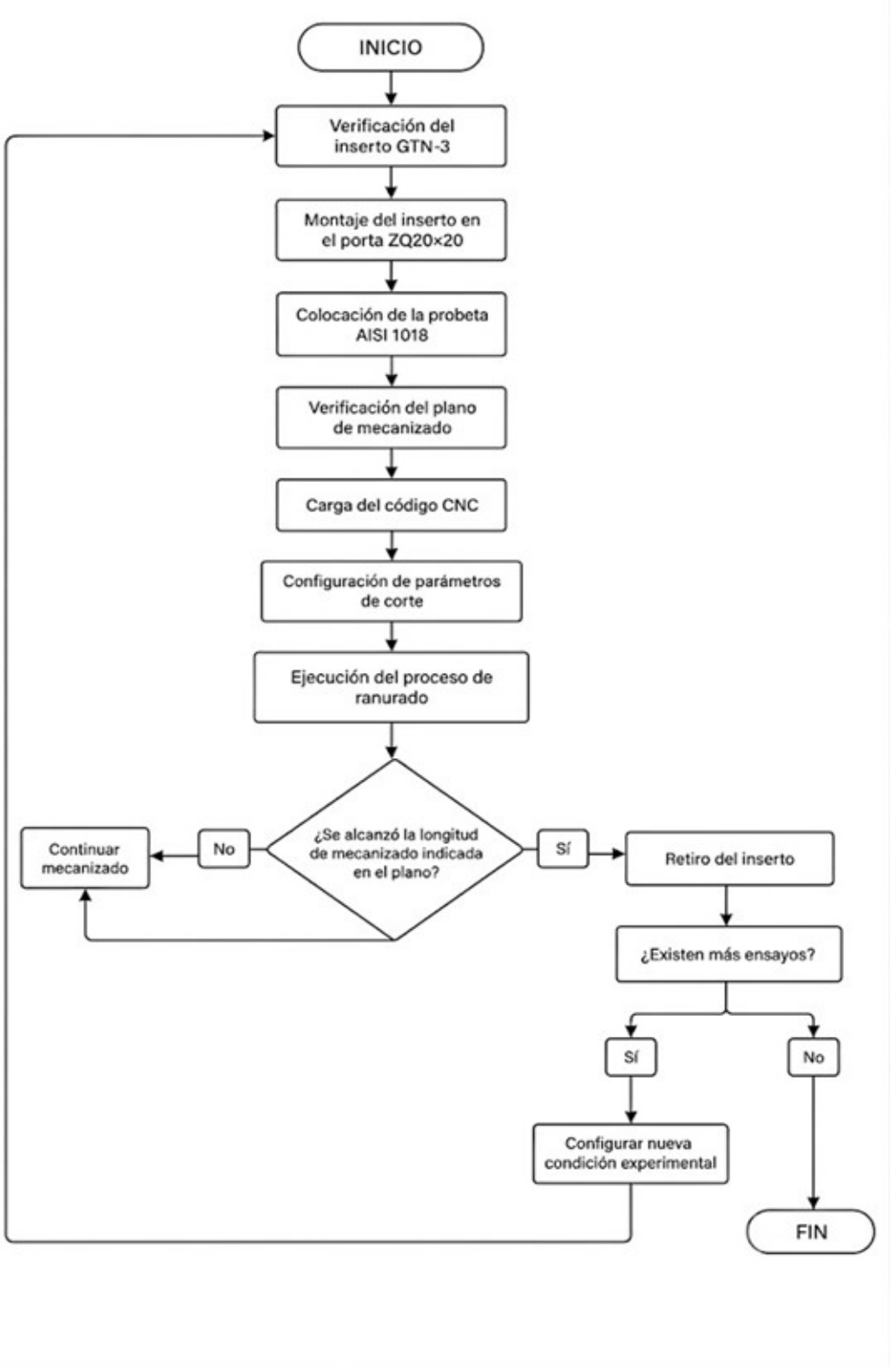


Fig. 4.14. Flujograma de actividades para la obtención del desgaste de flanco.

OBSERVACIONES

Durante el proceso experimental se emplearon insertos GTN-3 montados en un porta herramienta ZQ20×20 para realizar operaciones de ranurado sobre probetas de acero AISI 1018. Se ejecutaron diferentes combinaciones de velocidad de corte y avance, con un total de 9 ensayos, para su posterior medición y análisis.

CONCLUSIONES

- Se logró generar desgaste de flanco en los insertos GTN-3 mediante el mecanizado de las probetas bajo diferentes condiciones de corte.
- Los insertos obtenidos después de cada ensayo presentan las condiciones para realizar las mediciones posteriores y analizar la evolución del desgaste de flanco.

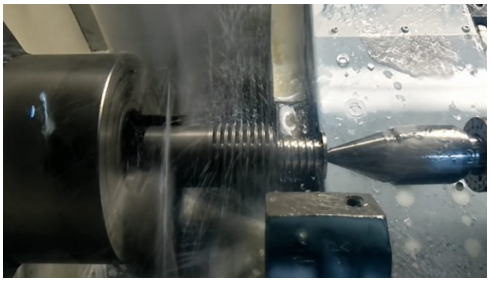


Fig. 4.15. Operación de mecanizado de la probeta.

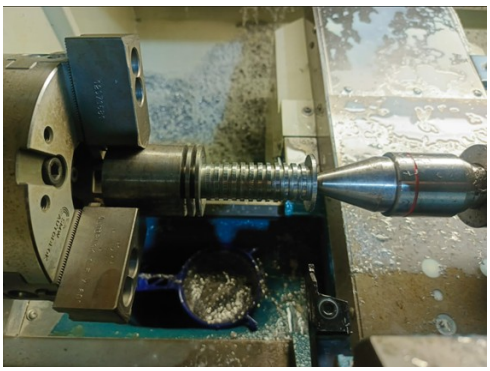


Fig. 4.16. Probetas mecanizadas con geometría final.

Se adjunta al final del documento el plano correspondiente al término de esta sección

4.19 ANEXO C. PROTOCOLO PARA LA MEDICIÓN DEL DESGASTE DE FLANCO EN LOS INSERTOS GTN-3

4.19.1 OBJETIVO

Medir el desgaste de flanco (VB) presente en los insertos GTN-3 después de cada ensayo de mecanizado, mediante un microscopio óptico, con el fin de obtener los valores experimentales necesarios para el análisis de la evolución del desgaste bajo las diferentes condiciones de corte.

PERSONAS A CARGO DE LA PRUEBA

- Evelin Fernanda Gallegos Morales.

ACTIVIDADES

Para realizar la medición del desgaste de flanco se ejecutaron las siguientes actividades:

1. Retirar el inserto GTN-3 una vez finalizado el ensayo de mecanizado.
2. Limpiar la superficie del inserto para eliminar residuos del proceso de corte.
3. Colocar el inserto en el soporte de sujeción.
4. Posicionar el soporte sobre la platina del microscopio óptico.
5. Orientar la superficie correspondiente al desgaste de flanco de manera perpendicular al eje óptico del microscopio.
6. Ajustar la iluminación y el enfoque hasta obtener una imagen nítida de la banda de desgaste.
7. Capturar la imagen del desgaste mediante el software del microscopio.
8. Medir el ancho del desgaste de flanco (VB).

9. Registrar el valor obtenido para el correspondiente ensayo.
10. Repetir el procedimiento para cada uno de los insertos evaluados.

ENTRADAS

- Insertos GTN-3 con desgaste de flanco.
- Microscopio óptico.
- Soporte de sujeción para el inserto.
- Computador con el software de adquisición y medición de imágenes.

SALIDAS

- Imágenes de la banda de desgaste de flanco de cada inserto.
- Valores de desgaste de flanco (VB) correspondientes a los nueve ensayos.
- Registro de las mediciones para el análisis de resultados.

Forma de colocación del inserto

Para la medición del desgaste de flanco, el inserto se coloca sobre la base del microscopio con la cara de desgaste orientada hacia el objetivo y alineada perpendicularmente al eje óptico, garantizando la visualización de la zona de interés.

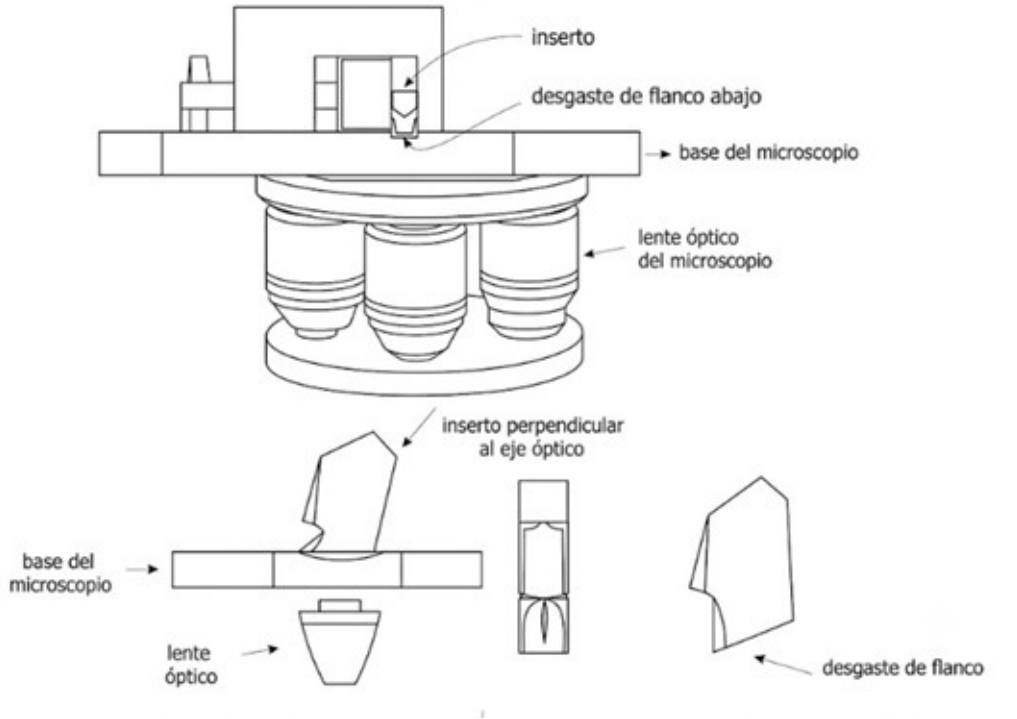


Fig. 4.17. Forma de colocación del inserto para la medición.



Fig. 4.18. Montaje del inserto en el microscopio para la medición.

ESQUEMA

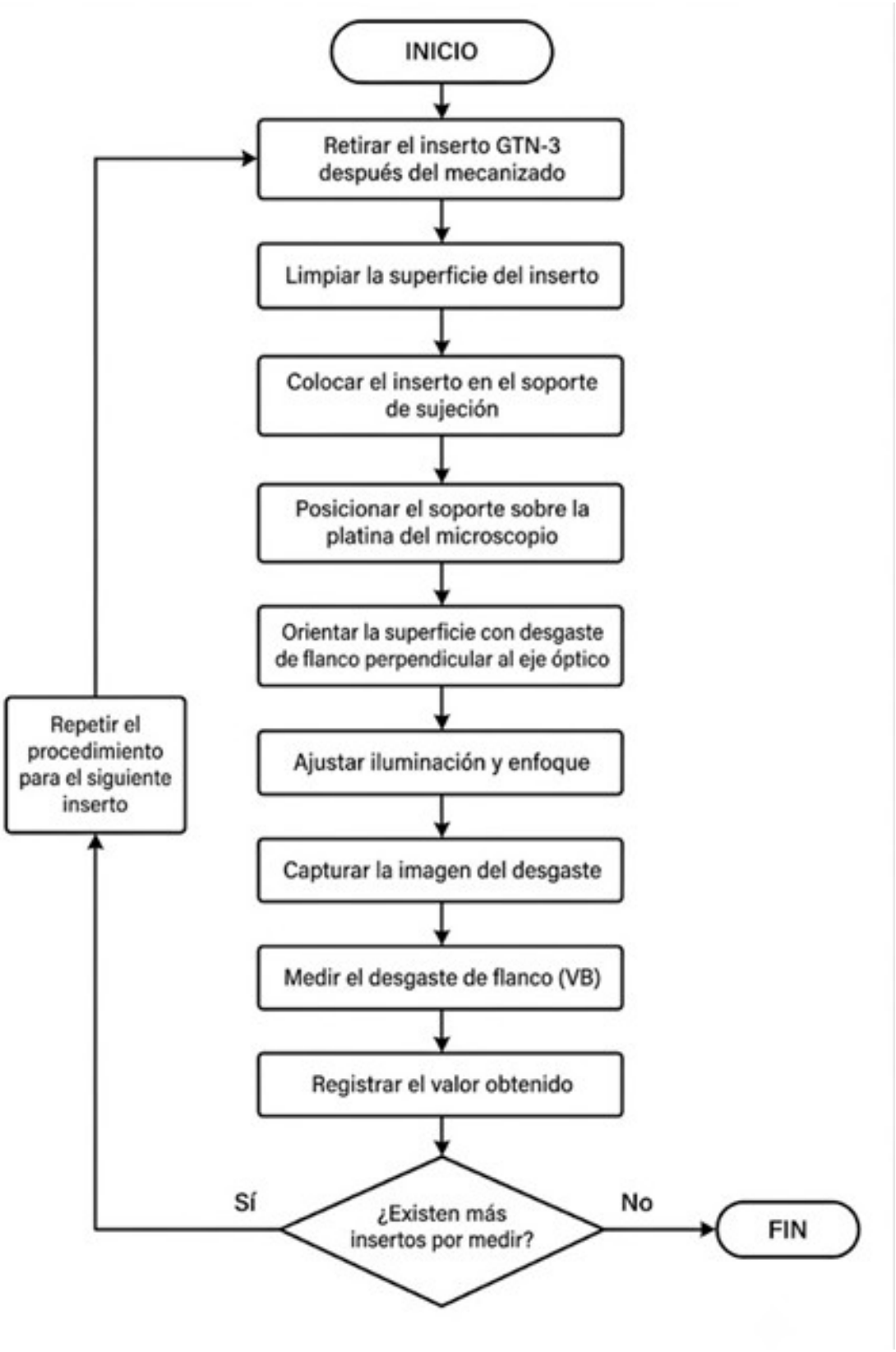


Fig. 4.19. Flujograma de actividades para la medición del desgaste de flanco.

OBSERVACIONES

Debido a la configuración del microscopio óptico, cuyos objetivos se encuentran ubicados en la parte inferior de la platina, se utilizó un soporte de sujeción para mantener el inserto estable durante la medición. Este sistema permitió orientar la superficie con desgaste de flanco de forma perpendicular al eje óptico del microscopio, facilitando la captura de imágenes y la medición del ancho del desgaste.

CONCLUSIONES

- Se obtuvieron los valores del desgaste de flanco (VB) correspondientes a cada una de las condiciones experimentales evaluadas.
- El sistema de sujeción permitió mantener una posición estable del inserto durante la medición, favoreciendo la obtención de imágenes con la calidad requerida para el análisis.

Uso de IA para la visualización del desgaste

Se emplearon herramientas de inteligencia artificial para mejorar la definición y el contraste de las imágenes sin alterar sus datos originales. Esto facilitó una visualización más clara de la banda de desgaste de flanco (VB) obtenida en el microscopio.

Uso de Tool Wear Analyzer para verificación

Se utilizó la aplicación *Tool Wear Analyzer* para verificar las mediciones del microscopio. Con esto se validó la precisión del ancho de la banda de desgaste y se determinó el margen de error de cada ensayo.

REGISTRO FOTOGRÁFICO DE LAS MEDICIONES

A continuación, se presentan las imágenes que se obtuvieron mediante el microscopio óptico durante la medición del desgaste de flanco de los insertos correspondientes a cada uno de los nueve ensayos experimentales. Estas imágenes fueron utilizadas para determinar los valores de desgaste de flanco (VB) empleados en el análisis de resultados.

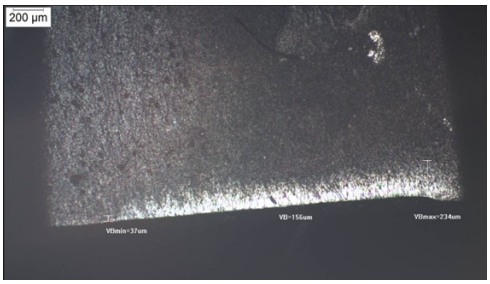


Fig. 4.20. Desgaste de flanco del ensayo 1.

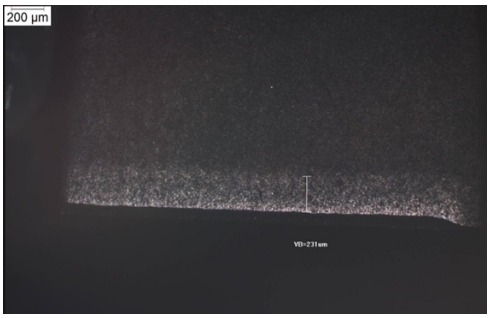


Fig. 4.21. Desgaste de flanco del ensayo 2.

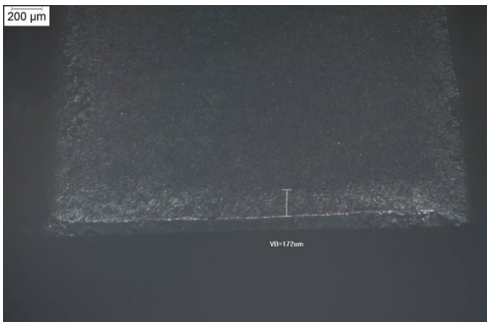


Fig. 4.22. Desgaste de flanco del ensayo 3.

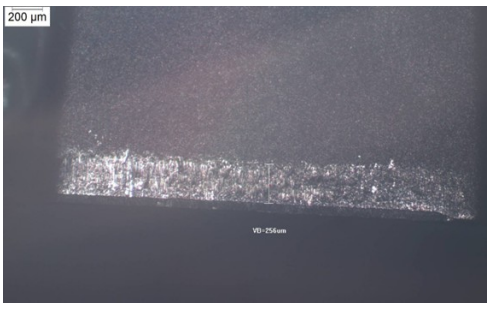


Fig. 4.23. Desgaste de flanco del ensayo 4.



Fig. 4.24. Desgaste de flanco del ensayo 5.



Fig. 4.25. Desgaste de flanco del ensayo 6.

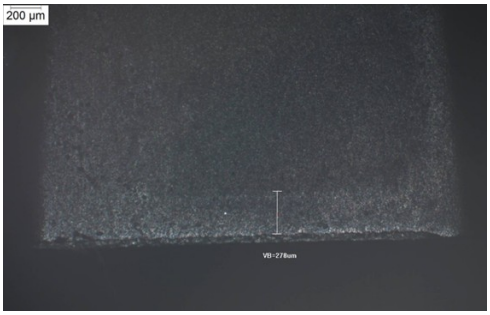


Fig. 4.26. Desgaste de flanco del ensayo 7.



Fig. 4.27. Desgaste de flanco del ensayo 8.

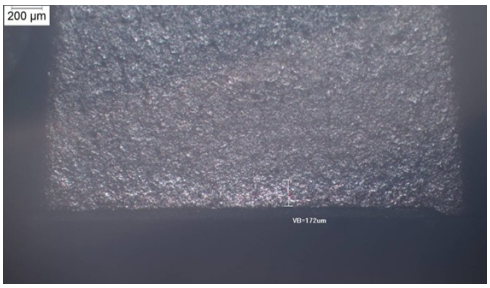


Fig. 4.28. Desgaste de flanco del ensayo 9.

4.20 Imágenes del desgaste de flanco optimizadas mediante IA

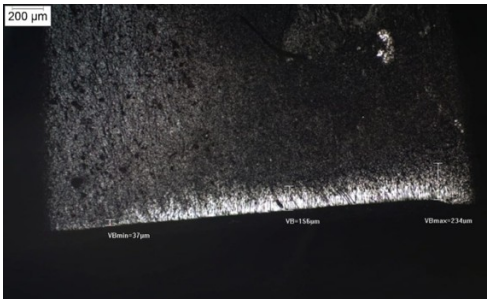


Fig. 4.29. Desgaste de flanco del ensayo 1 (imagen mejorada con IA).

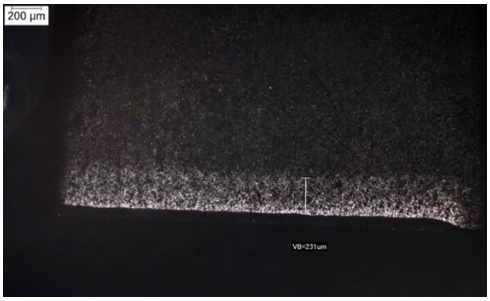


Fig. 4.30. Desgaste de flanco del ensayo 2 (imagen mejorada con IA).



Fig. 4.31. Desgaste de flanco del ensayo 3 (imagen mejorada con IA).

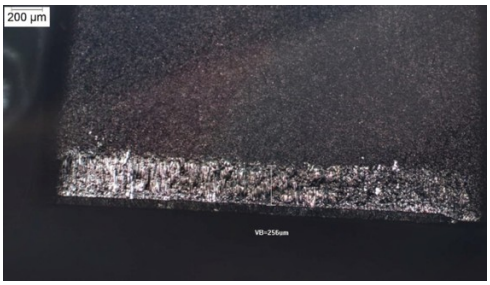


Fig. 4.32. Desgaste de flanco del ensayo 4 (imagen mejorada con IA).



Fig. 4.33. Desgaste de flanco del ensayo 5 (imagen mejorada con IA).



Fig. 4.34. Desgaste de flanco del ensayo 6 (imagen mejorada con IA).

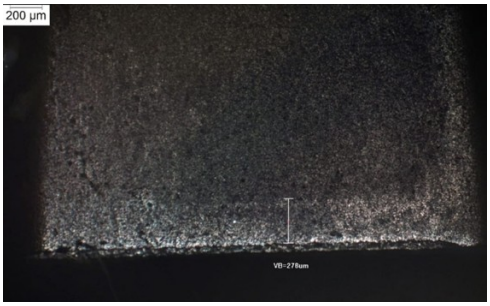


Fig. 4.35. Desgaste de flanco del ensayo 7 (imagen mejorada con IA).

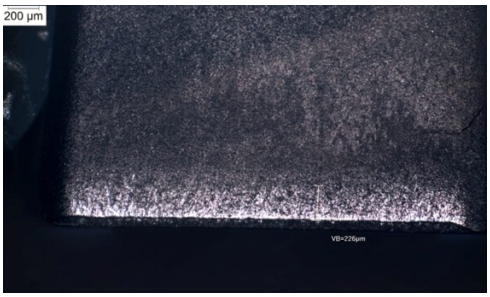


Fig. 4.36. Desgaste de flanco del ensayo 8 (imagen mejorada con IA).

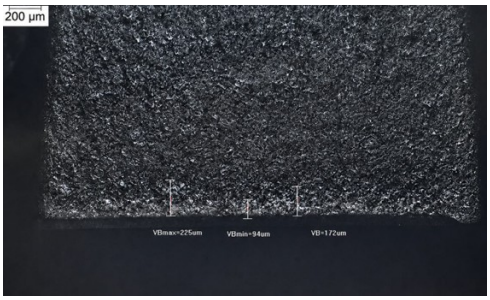


Fig. 4.37. Desgaste de flanco del ensayo 9 (imagen mejorada con IA).

4.21 Medición y verificación del desgaste de flanco mediante Tool Wear Analyzer



Fig. 4.38. Medición y verificación del desgaste de flanco del ensayo 1 mediante aplicación.

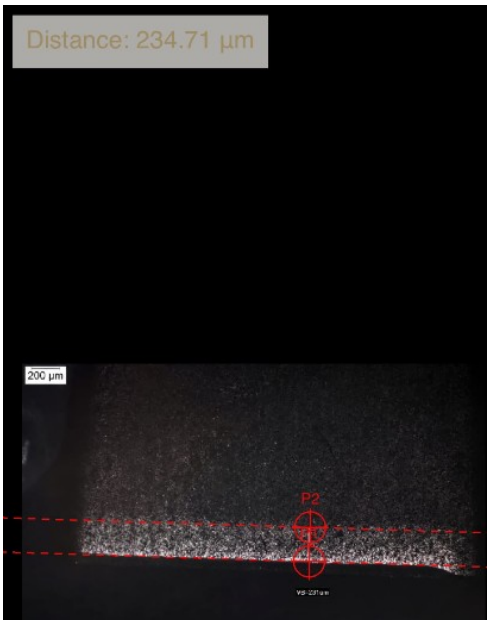


Fig. 4.39. Medición y verificación del desgaste de flanco del ensayo 2 mediante aplicación.

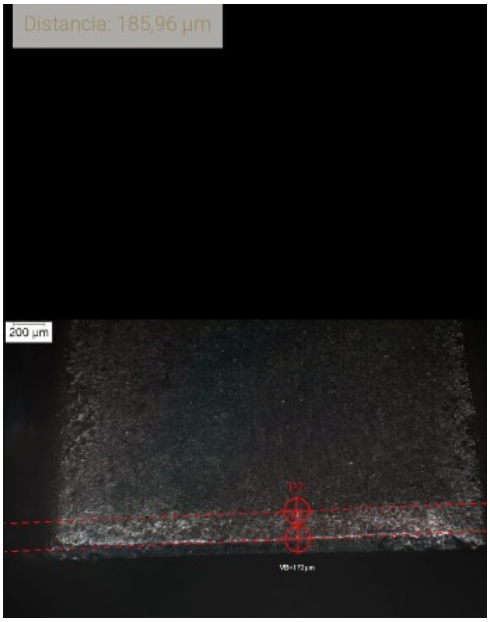


Fig. 4.40. Medición y verificación del desgaste de flanco del ensayo 3 mediante aplicación.

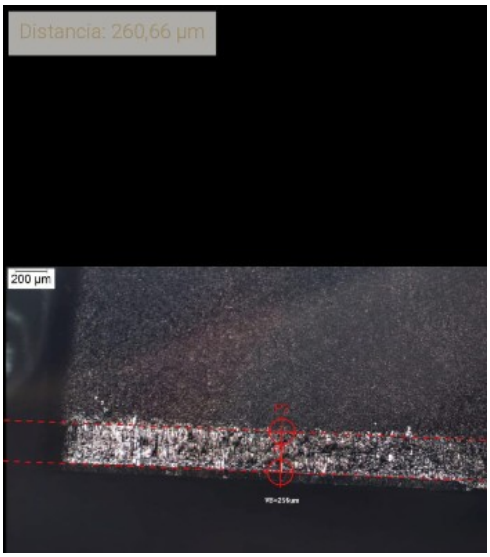


Fig. 4.41. Medición y verificación del desgaste de flanco del ensayo 4 mediante aplicación.

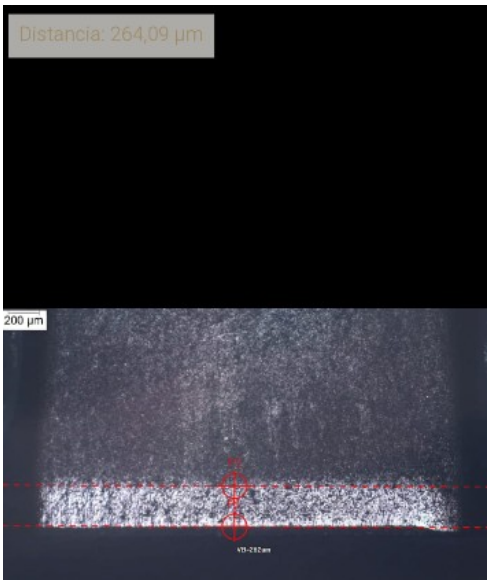


Fig. 4.42. Medición y verificación del desgaste de flanco del ensayo 5 mediante aplicación.

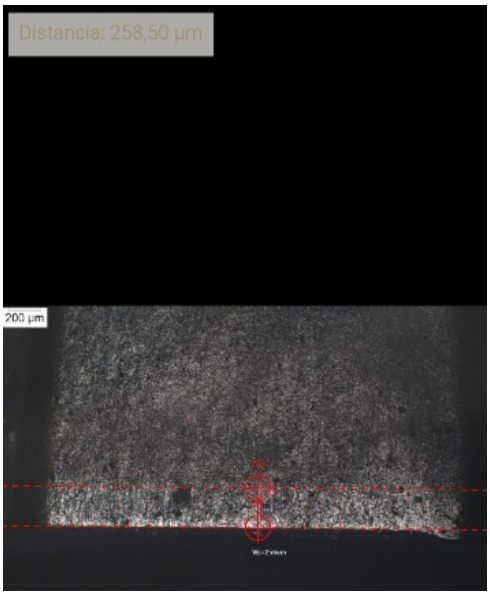


Fig. 4.43. Medición y verificación del desgaste de flanco del ensayoc6 mediante aplicación.

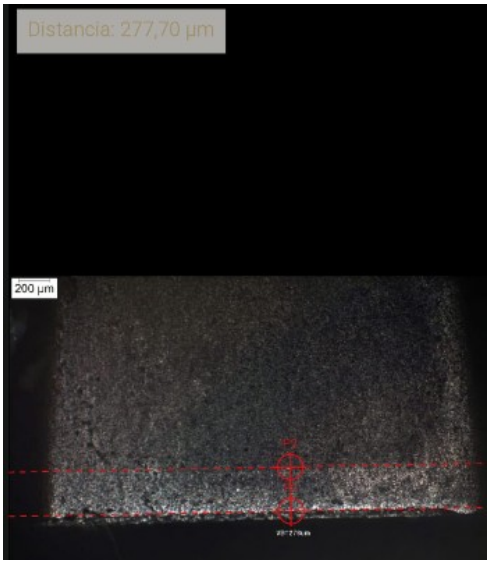


Fig. 4.44. Medición y verificación del desgaste de flanco del ensayo 7 mediante aplicación.

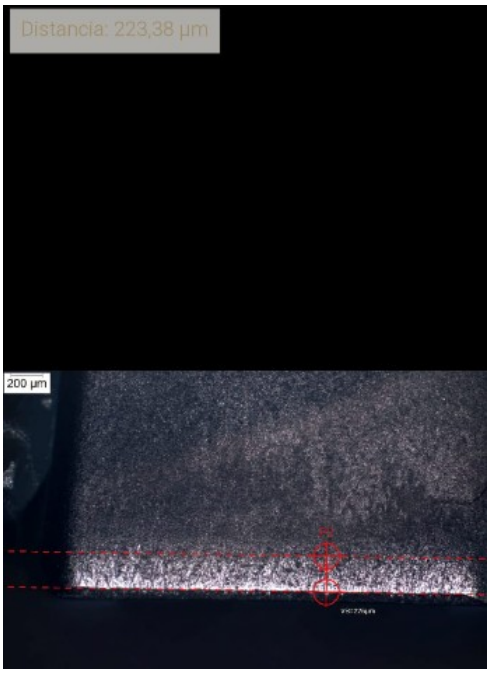


Fig. 4.45. Medición y verificación del desgaste de flanco del ensayo 8 mediante aplicación..

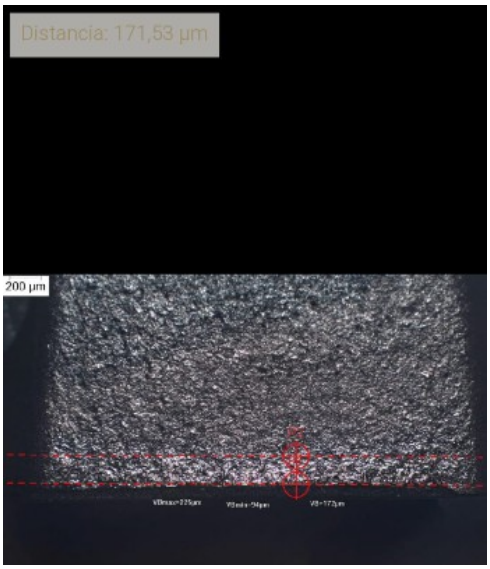
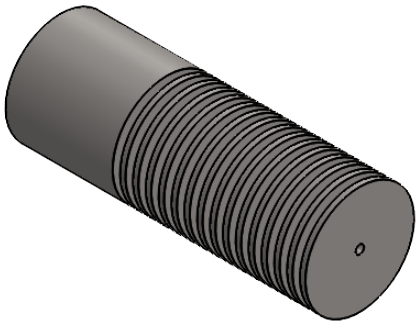
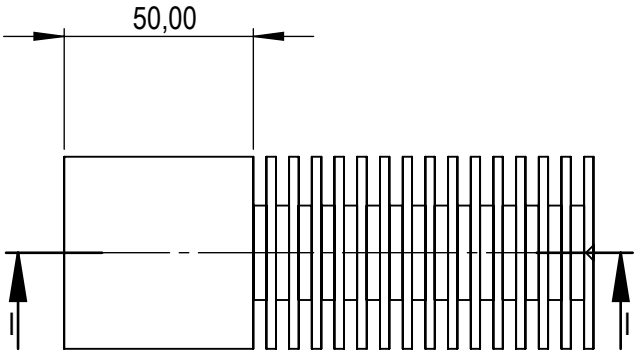
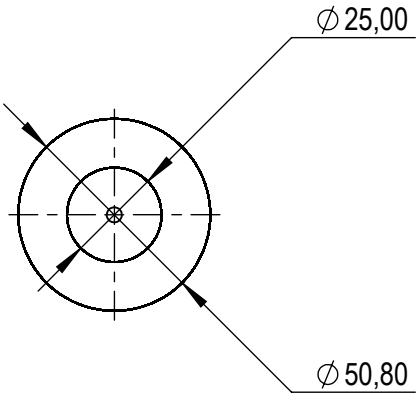


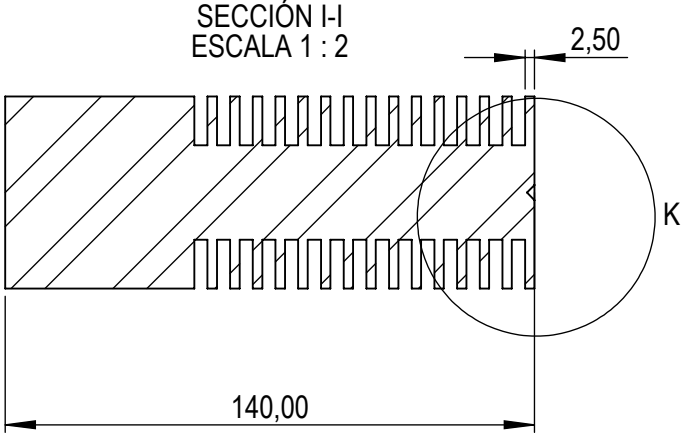
Fig. 4.46. Medición y verificación del desgaste de flanco del ensayo 9 mediante aplicación..

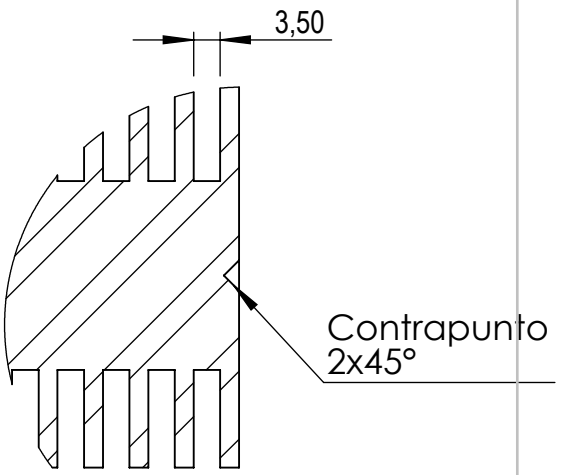






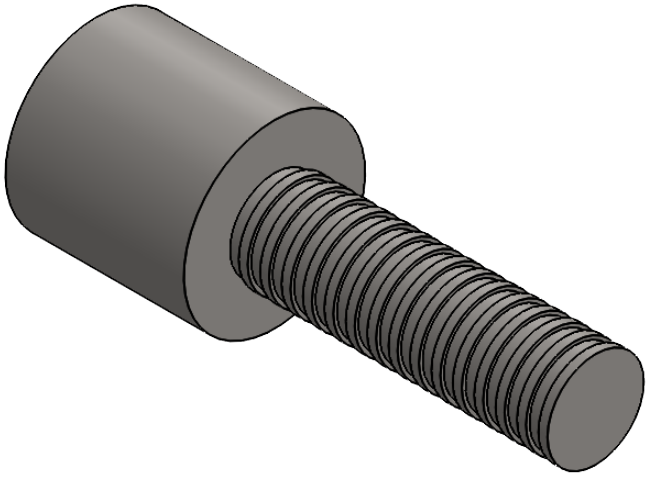
SECCIÓN I-I
ESCALA 1 : 2

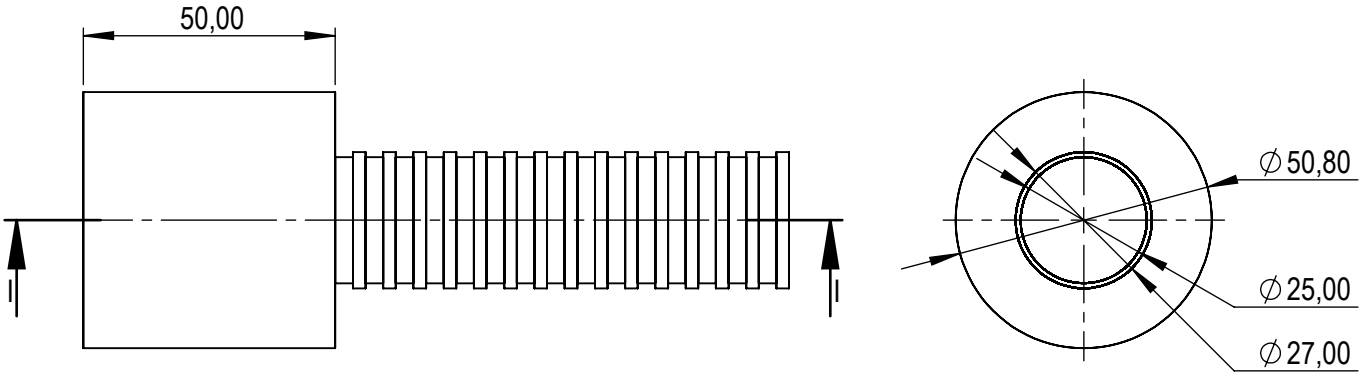




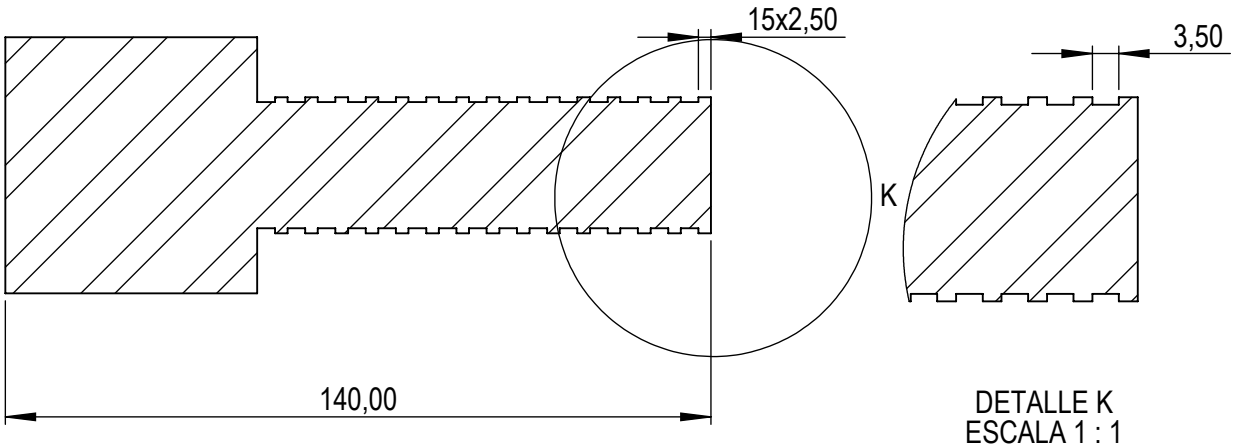
DETALLE K
ESCALA 1 : 1

UTN	CIME	PROYECTO: TESIS_GRADO_MECATRONICA				ESCALA: 1:5	
		PARTE: EJE REDONDO MACIZO 1018					
		CODIGO: T-M-G25				TOLERANCIA: ±0.02	
		MATERIAL:	AISI 1018	DISEÑO:			HOJA: 1/1 A4
		TRATAMIENTO:		DIBUJO:			
		RECUBRIMIENTO:		REVISO:			
		CANTIDAD:	1	APROBO:			





SECCIÓN I-I
ESCALA 2 : 3



DETALLE K
ESCALA 1 : 1

UTN	CIME	PROYECTO: TESIS_GRADO_MECATRONICA (DESGASTE)				ESCALA: 1:5	
		PARTE: EJE REDONDO MACIZO 1018					
		CODIGO: T-M-G25				TOLERANCIA: ±0.02	
		MATERIAL:	AISI 1018	DISEÑO:			HOJA: 1/1 A4
		TRATAMIENTO:		DIBUJO:			
		RECUBRIMIENTO:		REVISO:			
		CANTIDAD:	1	APROBO:			