

**DISEÑO Y FABRICACION DE FRESAS COLA DE MILANO (DOVETAIL CUTTER)
PARA CNC**

JUAN FELIPE MANTILLA RODRIGUEZ
LIZETH JULIANA MEDINA TAVERA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAÑICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2026

**DISEÑO Y FABRICACION DE FRESAS COLA DE MILANO (DOVETAIL CUTTER)
PARA CNC**

JUAN FELIPE MANTILLA RODRÍGUEZ
LIZETH JULIANA MEDINA TAVERA

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico

Director

Jorge Enrique Meneses Flórez
Magíster en Ingeniería Mecánica

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2026

Dedicatoria Juan Felipe

A mi familia, especialmente a mis padres Miguel Mantilla y Sandra Rodríguez, por ser mi base, mi ejemplo y mi mayor fortaleza. Gracias por cada sacrificio, por el apoyo incondicional y por enseñarme, con hechos, el valor de la constancia y el esfuerzo para alcanzar los sueños.

A mi pareja, la psicóloga Daniela Suárez, por ser refugio, impulso y motivación. Gracias por tu amor, tu paciencia infinita y tu capacidad para creer en mí incluso cuando yo dudaba. Tu acompañamiento constante, tu comprensión y tu forma de motivarme fueron fundamentales para que hoy este logro sea una realidad.

A mis amigos, en especial a los ingenieros Kevin Pinzón y Henry Méndez, por caminar a mi lado durante esta etapa, por las experiencias compartidas, las conversaciones, los consejos y el apoyo sincero en los momentos de mayor exigencia. Su amistad hizo más llevadero el camino y dejó huellas que van mucho más allá de lo académico.

Y a Rosalba, por tu compañía incondicional, por creer en mí sin reservas y por estar presente en cada etapa con palabras de aliento y apoyo sincero. Tu respaldo fue una luz constante en los momentos más difíciles de este proceso.

Este trabajo nace del amor, la confianza y el apoyo que cada uno de ustedes me brindó. Gracias a ustedes he llegado hasta aquí, he aprendido a no rendirme y he construido el camino que hoy culmina con este logro. Soy quien soy por ustedes, y todo lo que alcance a partir de ahora llevará siempre un poco de cada uno.

Agradecimientos Juan Felipe

A mis padres, Miguel Mantilla y Sandra Rodríguez, quienes siempre estuvieron atentos a cada etapa de mi formación. Me brindaron un hogar lleno de apoyo, sustento y, sobre todo, el ejemplo de su esfuerzo y perseverancia. Gracias a su dedicación y a la manera en que me ayudaron en todo lo que estuvo a su alcance, pude avanzar con firmeza y culminar este proceso académico.

A mis amigos, en especial a los ingenieros Kevin Pinzón y Henry Méndez, con quienes compartí experiencias que marcaron mi vida. De ellos aprendí valiosas lecciones, recorrimos un largo camino de convivencia y siempre conté con su apoyo tanto personal como profesional. De igual manera, agradezco a Juliana Medina, compañera de trabajo, por su colaboración, disposición y profesionalismo durante este proceso.

A Rosalba, quien me apoyó en los momentos más importantes, siempre creyó en mí, me acompañó en cada etapa de este proceso y estuvo pendiente de mi camino, brindándome el aliento necesario para no rendirme. Su confianza y respaldo fueron fundamentales para alcanzar este logro.

A la psicóloga Daniela Suárez, mi novia, por acompañar mis sueños con dedicación y cariño, desear siempre lo mejor para mí y fortalecer mi confianza para avanzar con determinación en cada reto asumido durante esta etapa.

A mi director de tesis, Jorge Meneses, por su orientación académica y profesional, y por contribuir no solo a mi formación técnica, sino también al desarrollo de carácter y criterio para enfrentar los desafíos propios de la ingeniería. Asimismo, agradezco a Nicolás Martínez, auxiliar del proyecto, por su valiosa ayuda, las horas de trabajo dedicadas, su paciencia y constante disposición, las cuales fueron esenciales para el desarrollo de esta investigación.

A mis compañeros de estudio y de carrera, con quienes compartí aprendizajes, esfuerzos y logros, así como a las amistades que conocí durante viajes, que aportaron valiosas experiencias a mi crecimiento personal y profesional.

Finalmente, agradezco a todas las personas que, de una u otra forma, hicieron parte de este proceso y contribuyeron a que hoy pueda culminar con éxito esta etapa de mi vida.

Dedicatoria Lizeth Juliana

A mi madre Rosalba Tavera, por su fe inquebrantable en mis capacidades y su crianza fueron el cimiento para convertirme en la mujer fuerte que soy. Cada obstáculo superado es reflejo de sus enseñanzas, por aquellas noches de desvelo donde su compañía fue mi mayor seguridad.

A mi padre Holguer Medina, por su apoyo incondicional a lo largo de este camino y por creer siempre en mis proyectos. Su presencia constante y su respaldo han sido fundamentales para alcanzar esta meta.

A mi nona María Alcira, por su fe en mí y por estar pendiente de cada uno de mis pasos a través de la distancia. Sus palabras de aliento en cada llamada fueron una motivación constante para alcanzar esta meta.

A mi nona paterna Rosa Barreto, en memoria de una vida compartida y de los años en que su guía fue parte de mi crecimiento. Que este trabajo sea un homenaje a su amor y a la huella imborrable que dejó en mi crianza.

A mi familia y parientes más allegado; entre ellos Luz Dary, Laura, Martha, Neo y Alicia, por su respaldo constante. De manera muy personal, a mi tío Julio Leal, por ejercer ese rol de segundo padre y acompañarme en cada paso significativo de mi formación y mi vida.

Agradecimientos Lizeth Juliana

A mis padres: Rosalba Tavera y Holguer Medina, por ser el pilar fundamental de mi vida y apoyo incondicional durante todo este proceso. Gracias por los sacrificios realizados, por su guía constante y por brindarme las herramientas necesarias para alcanzar mis metas profesionales. Este logro es tanto suyo como mío.

A mi compañero de proyecto, por estos meses de arduo trabajo, entrega y compromiso. Gracias por la disposición contaste y por el esfuerzo compartido para superar cada desafío técnico, permitiéndonos culminar con éxito este proyecto de grado.

A nuestro director de tesis Jorge Enrique Meneses, por su valiosa orientación y por la ayuda brindada en cada etapa de este proceso. Agradecemos su guía constante y la disposición para el desarrollo y la culminación exitosa de este trabajo.

A mis amigos más cercanos Jorge, Antonio y Edgar por ser parte fundamental de estos años de formación. Gracias por el apoyo mutuo, por la paciencia y por los momentos compartidos que hicieron posible llegar juntos al final de este camino.

Al auxiliar del laboratorio Nicolas, por su valiosa ayuda y por sacar tiempo de su jornada para ayudarnos a completar este proyecto. Gracias por su paciencia y por facilitarnos el camino en la parte práctica, siendo una pieza clave para alcanzar los resultados aquí presentados.

A mi novio Rafael, por su apoyo incondicional incluso desde la lejanía. Gracias por acompañarme en cada una de mis traspasadas y por ser mi motivación constante; su presencia fue la fuerza que necesité para no rendirme y culminar este sueño.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	19
1. OBJETIVOS	23
1.1 OBJETIVO GENERAL	23
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	23
2. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO	24
2.1 ETAPA DE DISEÑO	25
2.1.1 Análisis de fuerzas	26
2.1.2 Evaluación de alternativas.....	27
2.1.3 Selección de materiales	28
2.1.4 Diseño estructural	29
2.1.5 Validación numérica del diseño.....	30
2.2 ETAPA DE CONSTRUCCIÓN	30
2.2.1 Procesos de manufactura.....	31
2.2.2 Alternativas de mecanizado	31
2.2.3 Intentos de fabricación	32
2.2.4 Tratamiento térmico	33
2.3 ETAPA DE PRUEBAS.....	34
2.3.1 Comparación de dimensiones geométricas.....	35
2.3.2 Inspección visual del acabado superficial:.....	35

3. METODOLOGÍA	36
3.1 DISEÑO DE HERRAMIENTA.....	36
3.1.1 Fuerzas de corte	36
3.1.2 Alternativas.....	46
3.1.3 Selección de materiales	53
3.1.4 Estructura de herramienta	61
3.1.5 Validación.....	69
3.2 CONSTRUCCIÓN	84
3.2.1 Procesos de manufactura.....	84
3.2.2 Alternativas.....	89
3.2.3 Intento 1	90
3.2.4 Intento 2	94
3.3 PRUEBAS	103
3.3.1 Programación de prueba	103
3.3.2 Herramienta comprada.....	104
3.3.3 Montaje.....	109
3.3.4 Medición de resultados.....	112
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS	116
4.1 ANÁLISIS DE DISEÑO.....	116
4.2 ANÁLISIS ESTRUCTURAL.....	120
4.2.1 Torneado.....	120
4.2.2 Fresado	121

4.2.3 Tratamiento térmico	121
4.2.4 General.....	122
4.3 RESULTADOS DE PRUEBAS	122
4.3.1 Análisis dimensional	123
4.3.2 Análisis visual.....	124
4.4 ANÁLISIS ECONÓMICO.....	125
5. CONCLUSIONES	129
6. RECOMENDACIONES	130
7. BIBLIOGRAFÍA	131

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Valores experimentales de K_c	40
Tabla 2. Cuadro comparativo dos y cuatro filos	51
Tabla 3. Propiedades mecánicas del AISI 4140.....	54
Tabla 4. Resumen de alternativas en Kennametal.....	56
Tabla 5. Medidas Cono BT40.....	62
Tabla 6. Propiedades mecánicas del acero AISI 4140.....	69
Tabla 7. Medidas comparativas.....	124
Tabla 8. Cuadro costos	126

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de flujo	25
Figura 2. Diagrama de fuerzas	37
Figura 3. Área de la viruta	38
Figura 4. Definición de sistema coordinado en corte	42
Figura 5. Esquema de contacto en herramientas de corte (Figura 10, Ozel y Altan, 2000)	43
Figura 6. Detalle de la parte C del contacto de herramientas (Figura 15C, Ozel y Altan, 2000)	44
Figura 7. Fresas cola de milano de 2, 3, 4 y 5 filos	47
Figura 8. Cola de milano sin insertos	53
Figura 9. Adaptación inserto 55°	57
Figura 10 (a) Inserto tipo C, (b) Inserto tipo P.	58
Figura 11. Selección de placas kennametal	59
Figura 12. Medidas plaquita DCMT11T308-GP	60
Figura 13. Cono BT40	62
Figura 14. Inserto DCMT11308-GP	63
Figura 15. Combinaciones estándar de ángulos radial y axial en plaquitas de fresado.	64
Figura 16 Tornillo Torx M4x0.7	65
Figura 17. Diseño inicial Cola de milano	66

Figura 18. Diseño final cola de milano	68
Figura 19. Análisis de fuerzas	70
Figura 20. Fuerza de compresión.....	70
Figura 21. Diagrama de fuerzas flexión.....	72
Figura 22. Condiciones de sujeción	80
Figura 23. Fuerzas filo de corte.....	81
Figura 24. Malla.....	82
Figura 25. Simulación estática	82
Figura 26. Simulación modal	84
Figura 27. Dimensiones finales	85
Figura 28. Pasos 2-3-4-5 proceso mecanizado.....	86
Figura 29. Diferencial mecánico	87
Figura 30. Torno 4 ejes	88
Figura 31. Primer mecanizado realizado en la UIS	91
Figura 32. Resultado final cavidad	92
Figura 33. Mecanizado torno.....	94
Figura 34. Forma final herramienta cola de milano	96
Figura 35. Mecanizado ranurado.....	97
Figura 36. Geometría final cola de milano.....	98

Figura 37. Horno localizado en el taller de la UIS	99
Figura 38. Temperatura precalentada	100
Figura 39. Estado de las herramientas posterior al enfriamiento en agua	101
Figura 40. Estado final cola de milano finalizado el tratamiento térmico	102
Figura 41. Herramienta comercial comprada	106
Figura 42. Herramienta de prueba	108
Figura 43. Montaje de la herramienta.....	110
Figura 44. Toma de mediciones	113
Figura 45. Inspección visual	115
Figura 46. Simulación estática	117
Figura 47. Simulación modal	119
Figura 48. Plaquetas de trabajo final	122
Figura 49. Resultado herramienta construida.....	123
Figura 50. Resultado herramienta comprada	124

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Planos diseño inicial cola de milano	134
Anexo B. Plano diseño final cola de milano	135
Anexo C. Mecanizado paso a pasoAnexo	138
Anexo D. Código G cavidad universidad.....	139
Anexo E. Código G ranurado universidad.....	142
Anexo F. Código G pruebas finales	145
Anexo G. Fotografías	146

GLOSARIO

BT-40: Cono de sujeción de herramientas utilizado en máquinas CNC.

CNC: Siglas para control numérico computarizado, siendo un sistema automatizado que permite controlar las funciones de una máquina de herramientas, utilizadas para procesos de mecanizado mediante un código preprogramado.

CÓDIGO G: Lenguaje de programación utilizado en maquinaria tipo CNC, las cuales se definen en la norma DIN 66 025.

COLA DE MILANO: Unión mecánica en forma de prima trapezoidal, utilizado principalmente en máquinas de herramienta (torno, fresa) y en sistemas de guiado lineal.

DIVISOR: Dispositivo mecánico, el cual tiene como función girar una pieza en ángulos precisos, utilizado principalmente en máquinas de fresado.

FRESA: Tipo de herramienta de corte rotativa usada en mecanizado para dar forma a una pieza mediante la remoción de material.

INSERTO: Elemento de corte reemplazable utilizado en herramientas de mecanizado.

LEADWELL V20: Máquina de mecanizado vertical de CNC, la cual cuenta con recorrido en tres ejes X, Y y Z.

MECANIZADO: Proceso de fabricación de una pieza, mediante la extracción de material de manera controlada logrando así acabados y dimensiones específicas.

VIRUTA: Fragmento de material que se desprende por acción de una herramienta de corte.

RESUMEN

Título: Diseño y fabricación de fresas cola de milano (Dovetail Cutter) para CNC. *

Autor: Juan Felipe Mantilla Rodríguez, Lizeth Juliana Medina Tavera. **

Palabras Clave: Diseño, construcción, fresa tipo cola de milano, CNC, Leadwell V-20, BT-40.

Descripción: El presente proyecto de grado tuvo como objetivo diseñar, fabricar y validar localmente fresas tipo cola de milano para operaciones de mecanizado CNC, en concordancia con la misión universitaria de fortalecer la formación en diseño de herramientas y promover la vinculación entre la academia y el sector productivo. A partir del análisis de las necesidades industriales, se seleccionaron materiales adecuados y se consideraron factores determinantes del diseño, como la geometría, la rigidez, la sujeción y las condiciones de corte. Se elaboraron planos técnicos que fueron corregidos y adaptados según criterios de funcionalidad y compatibilidad con la fresadora CNC Leadwell V-20 y el cono BT-40. Los modelos se validaron mediante cálculos de resistencia de materiales y simulaciones computarizadas, asegurando su desempeño antes de la construcción de tres prototipos funcionales con ángulos de 55°, 60° y 65°. Posteriormente, se realizaron pruebas experimentales comparando las herramientas desarrolladas con una fresa comercial, obteniendo resultados favorables en términos de precisión, desempeño y eficiencia. En conclusión, el proyecto demostró la viabilidad técnica y académica del diseño y fabricación local de herramientas de corte, dejando como resultado una guía metodológica para futuros desarrollos que impulsen la innovación y el fortalecimiento de la manufactura regional.

*Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director:
M.Sc. Jorge Enrique Meneses Flórez.

ABSTRACT

Title: Design and Manufacturing of Dovetail Cutters for CNC. *

Author(s): Juan Felipe Mantilla Rodríguez, Lizeth Juliana Medina Tavera. **

Key Words: Design and construction; Dovetail milling cutter; CNC machining; Leadwell V-20; BT-40 tool holder.

Description: The present undergraduate project aimed to design, manufacture, and locally validate dovetail-type milling cutters for CNC machining operations, in alignment with the university's mission to strengthen education in tool design and promote the connection between academia and the productive sector. Based on an analysis of industrial requirements, suitable materials were selected, and key design factors such as geometry, stiffness, clamping, and cutting conditions were considered. Technical drawings were developed, revised, and adapted according to functionality and compatibility criteria with the Leadwell V-20 CNC milling machine and the BT-40 spindle taper. The models were validated through strength of materials calculations and computer simulations, ensuring proper performance prior to the fabrication of three functional prototypes with angles of 55°, 60°, and 65°. Subsequently, experimental tests were conducted to compare the developed tools with a commercial cutter, obtaining favorable results in terms of accuracy, performance, and efficiency. In conclusion, the project demonstrated the technical and academic feasibility of local design and manufacturing of cutting tools, resulting in a methodological guide for future developments that foster innovation and strengthen regional manufacturing capabilities.

*Degree Thesis

** Faculty of Physicomechanical Engineering. School of Mechanical Engineering.

Director: M.Sc. Jorge Enrique Meneses Flór

INTRODUCCIÓN

- **CONTEXTO**

Actualmente la manufactura tiene un rol económico fundamental en el país, este crecimiento ha provocado un aumento progresivo en el número de máquinas de Control Numérico Computarizado (CNC), estas se han convertido en herramientas indispensables para las empresas tanto grandes como pequeñas debido a su capacidad para realizar mecanizados de alta precisión de manera rápida y eficaz. Estas máquinas han contribuido en una gran variedad de industrias resaltando la industria médica, la industria automotriz y, sobre todo, en la industria del calzado y la confección, contribuyendo a la fabricación de moldes para inyección de plástico en donde la exactitud geométrica y la calidad son indispensables. Estas máquinas CNC han permitido garantizar un excelente acabado superficial y así fortalecer la competitividad de estos productos en el mercado.

Aun así, para lograr mecanizados de alta calidad, no es suficiente con tener una máquina CNC y una correcta programación, también es necesario el uso de herramientas de corte de buena calidad; Si bien existen herramientas como fresas, brocas y escariadores que suelen ser suficientes para mecanizados generales y básicos, existen procesos que requieren de herramientas más especializadas o personalizadas que se puedan adaptar a geometrías particulares. Entre estas están las fresas tipo cola de milano, las cuales son utilizadas en la fabricación de ranuras, guías y uniones de alta resistencia en moldes y matrices, la creciente demanda de estas herramientas en Bucaramanga y otras regiones del país evidencian la necesidad de soluciones personalizadas que respondan a los requerimientos de cada empresa.

- **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

En Bucaramanga el acceso a herramientas de corte especializadas es limitado. Actualmente, muchas empresas y talleres dependen de proveedores internacionales para adquirir fresas tipo cola de milano, lo cual implica costos elevados, largos tiempos de espera y dificultades asociadas a inventarios reducidos o a la ausencia de catálogos con productos adaptados. Esta dependencia no solo encarece los procesos de producción, sino que restringe la flexibilidad y la capacidad de innovación de las pequeñas y medianas empresas, las cuales se ven obligadas a trabajar con herramientas estándar que no siempre cumplen con sus necesidades.

La falta de producción local de herramientas personalizadas genera un rezago competitivo frente a empresas que sí cuentan con soluciones a la medida. Además, la formación académica de la ingeniería mecánica se concentra principalmente en la programación y el manejo de máquinas CNC, relegando a un segundo plano el diseño y la fabricación de herramientas de corte. De este modo, los estudiantes tienden a seleccionar fresas de catálogos, pero no adquieren las competencias necesarias para crear herramientas propias, lo que amplía la brecha entre la teoría y la práctica limitando la contribución al desarrollo tecnológico e industrial de la región.

- **JUSTIFICACIÓN**

Ante este panorama, resulta imperativo fomentar el diseño y la fabricación local de herramientas de corte, específicamente de fresas tipo cola de milano. Desarrollar esta capacidad en Bucaramanga no solo mitigaría la dependencia de proveedores internacionales, sino que impulsaría la economía regional, fortalecería la soberanía tecnológica y generaría nuevas oportunidades de negocio para emprendedores, pequeñas y medianas empresas. La producción de herramientas personalizadas permitiría a la industria local acceder a soluciones económicas, ágiles y a medida, dinamizando así el ecosistema manufacturero de la región.

Desde la perspectiva académica, este proyecto responde a la necesidad de integrar la creación de herramientas de corte como un eslabón esencial en la cadena de formación profesional. Al involucrar a los estudiantes en todas las fases desde el diseño conceptual hasta la validación experimental, se promueve la adquisición de competencias prácticas, la comprensión de variables críticas de rendimiento y la resolución de problemas reales. Asimismo, esta experiencia potencia su perfil emprendedor al facultarlos para concebir proyectos productivos orientados a la fabricación especializada.

En este sentido, la universidad se consolida no solo como un centro de formación, sino como un motor de desarrollo socioeconómico que impulsa la innovación tecnológica y prepara a los futuros profesionales para los desafíos de la industria moderna, donde la personalización y la creatividad son factores diferenciadores.

- **ALCANCES**

El presente proyecto de grado tiene como propósito diseñar y fabricar fresas tipo cola de milano para su uso en procesos de mecanizado CNC. Se contempla la elaboración de tres prototipos con ángulos de 55°, 60° y 65°, diseñados de acuerdo con las especificaciones de la máquina CNC Leadwell V20 disponible en la universidad. Para garantizar el desempeño de estas herramientas, se seleccionarán materiales aptos para el mecanizado de aceros industriales como el AISI P20, y se realizarán pruebas experimentales que permitan evaluar la precisión dimensional de las piezas obtenidas. Los resultados serán comparados con los de fresas comerciales con el fin de validar la eficacia de los prototipos.

El alcance del proyecto no se limita únicamente a la fabricación de herramientas funcionales, sino que también busca ofrecer un espacio de aprendizaje activo en el que los estudiantes se enfrenten directamente a los retos del diseño, los cálculos técnicos y la validación experimental. Así, el proyecto contribuye a disminuir la brecha entre la teoría

y la práctica, a impulsar la innovación en la industria regional y a sentar las bases para futuros desarrollos en el campo de la manufactura de herramientas de corte especializadas.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Promover la misión de la universidad al contribuir al desarrollo integral de los estudiantes fomentando el espíritu emprendedor en la industria, y enriquecer la formación en la línea de diseño de herramientas, fortaleciendo así la vinculación entre la academia y el sector productivo a través del diseño y construcción de tres fresas tipo cola de milano (Dovetail Cutter).

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Desarrollar diseños detallados de tres fresas cola de milano (Dovetail Cutter) con insertos de carburo de tungsteno con ángulos de 55° , 60° y 65° , todas ellas con un diámetro en el mango de 25mm, tomando en cuenta las especificaciones de la máquina Leadwell V 20.

Construir tres prototipos funcionales utilizando materiales y procesos de fabricación disponibles en la industria. Estos siendo los adecuados para el mecanizado de acero para moldes AISI P20.

Realizar pruebas de corte en el laboratorio de CNC de la universidad para evaluar por medio de un calibrador la precisión dimensional y así comparar el rendimiento de las fresas frente a las fresas comerciales de las mismas medidas e identificar áreas de mejora.

2. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO

Este capítulo presenta una visión integral del desarrollo del proyecto, desde su concepción inicial hasta la validación de resultados. El trabajo se centró en el diseño, fabricación y evaluación experimental de tres fresas tipo cola de milano para operaciones de mecanizado CNC. con el fin de fortalecer las capacidades de diseño y manufactura de herramientas de corte dentro del entorno universitario y contribuir al vínculo entre la academia y el sector productivo.

La ejecución se estructuró en tres fases fundamentales: diseño, construcción y pruebas. En la fase de diseño, se analizaron los requerimientos técnicos y se establecieron dimensiones críticas, materiales y parámetros geométricos, consolidando la información en modelos CAD y planos técnicos detallados. Posteriormente, en la fase de construcción, se seleccionaron los materiales y se definieron las estrategias de mecanizado mediante equipos CNC, finalizando con un riguroso control dimensional.

Finalmente, en la fase de pruebas, se realizaron ensayos en un centro de mecanizado Leadwell V-20 para verificar el comportamiento de las fresas bajo condiciones reales de operación. Durante estos ensayos, se evaluó la calidad superficial y la estabilidad del proceso, comparando el desempeño de las herramientas fabricadas frente a una referencia comercial equivalente para medir su eficiencia y precisión industrial.

La integración de principios de diseño mecánico con procedimientos prácticos de taller permitió no solo la obtención de herramientas funcionales, sino también la generación de conocimiento técnico especializado. Como se ilustra en la Figura 1, este flujo metodológico garantizó el cumplimiento de los objetivos y establece una base sólida para futuros desarrollos en el área.

Figura 1. Diagrama de flujo



2.1 ETAPA DE DISEÑO

La etapa de diseño representó la fase más importante del proyecto, ya que a partir de ella se definieron las bases conceptuales, técnicas y estructurales que permitirían convertir una idea inicial en una herramienta real, funcional y confiable. Durante esta etapa se buscó desarrollar una fresa tipo cola de milano capaz de realizar operaciones de mecanizado CNC con un rendimiento comparable al de herramientas comerciales,

garantizando al mismo tiempo su factibilidad de fabricación con los medios disponibles en el laboratorio de la universidad. Para lograrlo, el proceso de diseño se dividió en cuatro subetapas principales: análisis de fuerzas, evaluación de alternativas, selección de materiales y diseño estructural, además de una fase final de validación numérica que permitió verificar la integridad del diseño propuesto.

2.1.1 Análisis de fuerzas. El primer paso consistió en identificar las condiciones de corte bajo las cuales operaría la herramienta. Se determinó el tipo de operación (fresado de cola de milano) y se analizó el contacto entre los filos de corte y la pieza, con el fin de comprender el comportamiento mecánico y las solicitaciones a las que estaría sometida la herramienta. Para ello, se estudiaron las direcciones y sentidos de las fuerzas de corte, reconociendo que en el fresado intervienen tres componentes principales: la fuerza tangencial (que realiza el trabajo de corte), la radial (que tiende a desviar la herramienta) y la axial (que actúa en el sentido del eje).

Una vez definidas las direcciones, se implementó un modelo teórico de estimación de fuerzas, basado en ecuaciones empíricas obtenidas de estudios previos realizados sobre materiales similares y bajo condiciones equivalentes. Dichas ecuaciones incluyen constantes de corte específicas, que fueron tomadas de investigaciones publicadas para el mismo tipo de material empleado en la herramienta. A partir de estos datos se calculó la magnitud aproximada de las fuerzas de corte esperadas, información esencial para el diseño estructural posterior. Este análisis permitió comprender el nivel de exigencia mecánica al que estaría sometida la fresa y establecer factores de seguridad adecuados en las etapas siguientes.

El resultado de esta parte fue la obtención de valores representativos de las fuerzas que actúan durante el proceso de fresado, lo cual sirvió de base para la selección de materiales y el dimensionamiento de las secciones críticas. Además, se concluyó que las fuerzas predominantes serían de tipo tangencial y radial, por lo que se debía prestar

especial atención a la rigidez del cuerpo de la herramienta y a la sujeción de los insertos para evitar vibraciones o deformaciones que afectaran la precisión del corte.

2.1.2 Evaluación de alternativas. Con los requerimientos de esfuerzo definidos, se procedió a estudiar distintas alternativas de diseño que permitieran cumplir con los objetivos técnicos, económicos y de manufactura del proyecto. En esta etapa se consideraron variables como el número de filos de corte, la complejidad del proceso de fabricación, el costo de producción y la facilidad de mantenimiento.

Inicialmente se plantearon varias configuraciones de herramienta, con diferentes números de filos y disposiciones geométricas. Sin embargo, al analizar los procesos necesarios para generar más de dos filos, se observó que el nivel de complejidad en el mecanizado aumentaba considerablemente, especialmente al garantizar la simetría y el equilibrio dinámico de la herramienta. Además, el costo asociado a la fabricación y al montaje se incrementaba con cada filo adicional.

Por otro lado, se evaluó si la fresa debía fabricarse en una sola pieza sólida o mediante insertos intercambiables de carburo de tungsteno. La opción sin insertos ofrecía una construcción más simple, pero representaba una gran desventaja en términos de mantenimiento y durabilidad, ya que el desgaste en los filos implicaría reemplazar la herramienta completa o afilarla, pero aquí perdería gran precisión en sus cortes. En cambio, el uso de insertos proporcionaba una mayor vida útil, ya que solo era necesario cambiar el inserto desgastado, además de permitir ajustar los parámetros de corte con mayor flexibilidad.

Luego de comparar ambas opciones, se optó por una fresa de dos filos con insertos de carburo de tungsteno, decisión que equilibraba adecuadamente el rendimiento, el costo y la facilidad de fabricación. Esta configuración también favoreció un reparto simétrico de las fuerzas de corte, reduciendo vibraciones y asegurando una buena estabilidad durante la operación.

2.1.3 Selección de materiales. En esta subetapa se realizó la selección de materiales tanto para el cuerpo principal de la herramienta como para los insertos. La elección del material base se hizo considerando la resistencia mecánica, la facilidad de mecanizado, la disponibilidad en el mercado y el costo. Tras comparar distintas opciones, se determinó que el acero AISI 4140 ofrecía la mejor combinación de propiedades para el cuerpo de la herramienta. Este acero aleado al cromo y molibdeno presenta alta resistencia a la tracción, buena tenacidad, estabilidad dimensional y buena respuesta al tratamiento térmico, además de ser un material ampliamente disponible y de costo accesible. Estas características lo hacen ideal para soportar esfuerzos repetitivos y cargas de impacto sin presentar deformaciones plásticas significativas.

En cuanto a los insertos de corte, se llevó a cabo un proceso más riguroso, en el que se analizaron diversas referencias comerciales en función de su geometría, recubrimiento, radio de punta y capacidad para evacuar viruta. Se evaluaron catálogos técnicos de fabricantes reconocidos y se compararon las prestaciones en mecanizado de acero. Finalmente, se seleccionó el inserto DCMT11T308-GP, de carburo de tungsteno recubierto, por su alto rendimiento en cortes interrumpidos, buena resistencia térmica y excelente relación costo-beneficio¹. Además, su geometría permitió una correcta disposición del filo y un asiento firme sobre el cuerpo de la herramienta.

Esta selección garantizó que la herramienta final contara con un equilibrio adecuado entre rigidez estructural y capacidad de corte, optimizando el desempeño sin aumentar excesivamente los costos de fabricación.

¹ KENNAMETAL. Soluciones de herramientas de corte y metalurgia. [en línea]. Latrobe, EE. UU.: Kennametal Inc., 2024. [consultado 15, abril, 2026]. Disponible en: <https://www.kennametal.com/es/es/home.html>

2.1.4 Diseño estructural. Una vez definidos los materiales y la configuración general, se procedió a la etapa de diseño estructural, en la que se determinó la forma final de la herramienta y sus dimensiones principales. Se partió del requerimiento de compatibilidad con la máquina CNC Leadwell V-20, la cual utiliza un cono portaherramientas tipo BT-40, por lo que se diseñó la zona de acople respetando las tolerancias y características geométricas de este estándar.

Se definieron los asientos para los insertos, asegurando que estos tuvieran un apoyo completo y estable para resistir las fuerzas de corte sin desplazamientos. Los ángulos de corte fueron seleccionados dentro de los valores más comunes en la industria, buscando un equilibrio entre agresividad de corte y durabilidad del filo. Asimismo, los tornillos de sujeción se eligieron de medidas estándar, lo que garantizó su disponibilidad y compatibilidad con el inserto escogido.

Con el fin de mejorar el rendimiento térmico, se incorporaron canales de refrigeración que permiten el paso de aire durante la operación, ayudando a disipar el calor generado y a prolongar la vida útil de los insertos. Una vez definidos todos los elementos, se elaboraron los modelos CAD 3D y sus respectivos planos técnicos, realizando un proceso de revisión en el que se identificaron posibles áreas de mejora antes de llegar a la versión definitiva.

El resultado de esta fase fue una herramienta estructuralmente sólida, compatible con los estándares industriales y adaptable a las condiciones reales del equipo de mecanizado disponible.

2.1.5 Validación numérica del diseño. Finalmente, se desarrolló una validación numérica que permitió confirmar la viabilidad del diseño antes de su fabricación. En esta etapa se aplicaron cálculos analíticos basados en teorías de resistencia de materiales para evaluar el comportamiento del cuerpo de la herramienta bajo diferentes tipos de carga: torsión, compresión, flexión, pandeo y fatiga. Estos análisis sirvieron para comprobar que las dimensiones seleccionadas eran adecuadas y que el diseño ofrecía un margen de seguridad suficiente ante las solicitaciones esperadas.

Posteriormente, se realizaron simulaciones estructurales mediante SolidWorks Simulation, en las cuales se aplicaron las cargas calculadas en el análisis de fuerzas, considerando las condiciones de sujeción y el material seleccionado. Los resultados mostraron una distribución homogénea de los esfuerzos, sin concentraciones críticas que pudieran comprometer la integridad del cuerpo de la herramienta. Las deformaciones obtenidas fueron mínimas y se mantuvieron dentro de los límites admisibles, lo cual confirmó que el diseño propuesto era estructuralmente estable y funcional.

En esta etapa se determinó que la fresa diseñada cumplía con todos los requerimientos mecánicos y geométricos establecidos, siendo capaz de soportar las condiciones reales de corte sin riesgo de falla. De esta manera, el diseño quedó completamente validado para su posterior fabricación y puesta a prueba.

2.2 ETAPA DE CONSTRUCCIÓN

Una vez validados los planos y verificado el diseño mediante simulaciones y análisis estructurales, se dio inicio a la etapa de construcción de la herramienta. En esta fase se definieron los procesos de manufactura necesarios para transformar el modelo digital en una pieza real, seleccionando cuidadosamente los métodos, equipos y condiciones de mecanizado más apropiados. El objetivo principal fue garantizar que la herramienta fabricada cumpliera con las dimensiones, tolerancias y acabados definidos en los planos técnicos, sin comprometer su integridad estructural ni su desempeño funcional.

2.2.1 Procesos de manufactura. El proceso de fabricación se planificó a partir de tres piezas de acero AISI 4140, material previamente seleccionado por sus propiedades mecánicas y facilidad relativa de mecanizado. Cada pieza fue cortada con una longitud de 120 mm y un diámetro de $1 \frac{3}{4}$ ", lo que proporcionó el volumen suficiente para realizar todas las operaciones de desbaste y acabado requeridas.

A partir de los planos de fabricación, se estableció una ruta de proceso secuencial, comenzando por las operaciones de torneado, seguidas de las operaciones de fresado, roscado y finalmente el tratamiento térmico. El torneado permitió obtener una superficie cilíndrica uniforme con las dimensiones nominales requeridas, asegurando la concentricidad necesaria para las etapas posteriores. Esta operación fue crítica, ya que la herramienta debía mantener un equilibrio geométrico adecuado para evitar vibraciones y garantizar un corte estable durante su uso en máquinas CNC.

2.2.2 Alternativas de mecanizado. Durante la planeación del proceso de fresado surgió la necesidad de definir cómo se generarían las cavidades y geometrías complejas de la herramienta, en particular las ranuras destinadas a alojar los insertos y los prisioneros del cono BT-40. En este contexto, se evaluaron dos alternativas principales: realizar el mecanizado en un torno CNC de cuatro ejes especializado o utilizar un sistema diferencial mecánico que permitiera girar la pieza en ángulos específicos.

El uso del sistema diferencial representaba una solución viable dentro de los recursos disponibles en el laboratorio universitario; sin embargo, implicaba ciertas limitaciones. Al tratarse de un sistema de accionamiento manual, existía el riesgo de pequeños errores angulares que afectarían la simetría de la herramienta, lo que podría ocasionar que uno de los insertos realizara una mayor proporción del trabajo de corte. Esta condición generaría un desgaste desigual y una reducción considerable en la vida útil de la herramienta.

Por otro lado, el mecanizado mediante un torno CNC de cuatro ejes ofrecía una precisión significativamente mayor en la indexación angular, una mejor calidad de acabado superficial, reducción en los tiempos de fabricación y menor intervención manual. Tras comparar los costos, la precisión alcanzable y la calidad final esperada, se determinó que la fabricación en un torno CNC de cuatro ejes era la alternativa más conveniente tanto desde el punto de vista técnico como económico.

2.2.3 Intentos de fabricación. Durante el desarrollo del proyecto se realizaron dos intentos de fabricación de la herramienta. El primer intento se llevó a cabo en las instalaciones de la universidad, donde se realizó la codificación del programa de mecanizado para la máquina Leadwell V-20 con el fin de evaluar la viabilidad del proceso utilizando los recursos institucionales. En esta etapa se efectuaron varios intentos de fresado experimental, en los cuales se analizaron el comportamiento de las herramientas de corte, el acabado superficial y el desgaste generado.

No obstante, los resultados obtenidos en este primer intento no fueron satisfactorios. Se evidenció que el proceso resultaba poco eficiente y costoso, debido al desgaste prematuro de las herramientas de corte y a las limitaciones inherentes al sistema diferencial mecánico, las cuales podían provocar errores geométricos acumulados. Como consecuencia, la fabricación universitaria no garantizaba la precisión requerida en los ángulos de los alojamientos de los insertos ni la repetibilidad necesaria para obtener piezas idénticas.

Ante estas limitaciones, se realizó un segundo intento de fabricación adoptando una estrategia combinada. Las operaciones de torneado y parte del mecanizado se llevaron a cabo en una empresa local especializada, equipada con un torno CNC de cuatro ejes, mientras que el resto de las operaciones y el tratamiento térmico se realizaron en la universidad. Esta decisión permitió asegurar la exactitud geométrica y la rigidez necesarias para obtener una herramienta con la calidad requerida.

En el torno CNC de cuatro ejes se ejecutaron las operaciones críticas de mecanizado, incluyendo el fresado de cavidades para los insertos, las ranuras para los prisioneros y los roscados destinados a los tornillos de sujeción. La precisión del equipo permitió obtener una geometría completamente simétrica, asegurando que ambos insertos compartieran la carga de corte de forma equitativa y que la herramienta presentara un balance dinámico adecuado para operar a altas velocidades.

2.2.4 Tratamiento térmico. Una vez completadas las operaciones de mecanizado, las piezas fueron sometidas a un proceso convencional de temple y revenido. Este tratamiento tuvo como propósito aumentar la dureza superficial y la resistencia al desgaste de la herramienta sin comprometer su tenacidad.

El proceso consistió en un calentamiento controlado del acero AISI 4140 hasta alcanzar la temperatura de austenización, seguido de un enfriamiento rápido (temple) y un posterior revenido para reducir las tensiones internas y evitar la fragilización del material. El control adecuado del ciclo térmico fue esencial, ya que un temple excesivamente severo podría provocar fisuras o fracturas internas, mientras que un revenido insuficiente afectaría la ductilidad y la resistencia al impacto del cuerpo de la herramienta.

Como resultado del tratamiento térmico se obtuvo una microestructura homogénea, con una dureza suficiente para soportar las cargas de corte y un núcleo tenaz que evita fallas por fractura. De esta manera, se logró una herramienta completamente acabada y lista para la etapa de validación experimental.

La etapa de construcción permitió materializar el diseño propuesto, validando en la práctica los procesos seleccionados y confirmando la factibilidad de fabricar la herramienta con alta precisión y buen nivel de acabado. El uso del torno CNC de cuatro ejes se consolidó como una decisión clave, ya que garantizó la simetría y la estabilidad geométrica de la herramienta, aspectos fundamentales para su correcto desempeño durante el mecanizado.

2.3 ETAPA DE PRUEBAS

La etapa de pruebas tuvo como objetivo principal comparar el desempeño de la herramienta tipo cola de milano fabricada localmente con una herramienta comercial equivalente, evaluando su comportamiento en condiciones reales de mecanizado. Para ello, se diseñó y programó un código CNC que permitió ejecutar un ciclo de corte controlado en la máquina Leadwell V-20 de la universidad, garantizando que ambas herramientas trabajaran bajo las mismas condiciones de operación.

El programa consistió en realizar un corte sobre una pieza de acero P20 para moldes, material seleccionado por su uso frecuente en aplicaciones de mecanizado de precisión. El ciclo incluía dos fases consecutivas: primero, el corte con la herramienta comercial; y segundo, tras un cambio automático de herramienta, el corte con la herramienta fabricada. De este modo, se aseguró la igualdad de condiciones en cuanto a velocidad de rotación, avance, profundidad de corte y refrigeración, permitiendo que las diferencias observadas provinieran únicamente del desempeño propio de cada herramienta.

Previo a las pruebas, se realizó un análisis para seleccionar una herramienta comercial que fuera comparable con la diseñada. La referencia escogida fue la YW55-DC11-40-20T2-160, que cumplía con parámetros geométricos similares y era compatible con insertos de características equivalentes. Sin embargo, al recibirla, se constató que el modelo no contaba con la configuración solicitada en cuanto a las ranuras para los prisioneros del cono BT-40, lo cual generó ciertos inconvenientes de sujeción. Este hecho reafirmó la pertinencia del proyecto y la necesidad de contar con herramientas diseñadas específicamente para las condiciones locales de montaje y operación.

Haciendo uso de unas pinzas para agarrar la herramienta, se procedió al montaje, la instalación de los insertos seleccionados y la ejecución de las pruebas. Todo el proceso fue documentado detalladamente, incluyendo parámetros de corte y observaciones durante la operación. Con los cortes finalizados, se realizaron tres tipos de análisis para comparar los resultados.

2.3.1 Comparación de dimensiones geométricas. Se realizaron pruebas de mecanizado bajo condiciones de corte similares utilizando una herramienta comercial y una herramienta diseñada y construida. La evaluación dimensional, apoyada en modelado CAD, mostró ligeras desviaciones en ambos casos; sin embargo, las dimensiones finales se mantuvieron dentro de rangos aceptables para la funcionalidad de la ranura. La herramienta comercial presentó un corte recto y uniforme, mientras que la herramienta diseñada evidenció una leve desviación asociada a la fijación de la pieza, sin afectar el resultado dimensional.

2.3.2 Inspección visual del acabado superficial. La inspección visual del acabado superficial permitió comparar la calidad del mecanizado obtenido con ambas herramientas. La herramienta comercial presentó mayor presencia de rebabas y material sobrante, especialmente en las zonas de entrada y salida. En contraste, la herramienta diseñada y construida mostró una superficie más uniforme y menor formación de rebabas a lo largo del recorrido de corte.

Las pruebas de mecanizado realizadas evidenciaron que la herramienta diseñada y fabricada presentó un comportamiento comparable al de la herramienta comercial bajo condiciones de corte similares. Los resultados obtenidos en la evaluación dimensional y en la inspección visual del acabado superficial permitieron validar el diseño propuesto y confirmar la viabilidad técnica del proceso de manufactura desarrollado, demostrando que la herramienta cumple con los requerimientos funcionales para su aplicación.

3. METODOLOGÍA

3.1 DISEÑO DE HERRAMIENTA

En el diseño de la herramienta se tuvo como propósito establecer los lineamientos técnicos necesarios para garantizar que la herramienta funcionara correctamente, fuera viable y óptima para cumplir con los objetivos planteados. A partir de este punto se definieron los criterios de diseño, se consideraron tanto las características de la máquina como el propósito de la herramienta y, con base en ello, se elaboraron los planos, seleccionaron los materiales y se verificó el diseño mediante fundamentos matemáticos y simulaciones.

3.1.1 Fuerzas de corte. Al momento de diseñar cualquier pieza es fundamental identificar las fuerzas a las que estará sometida y los efectos que estas pueden generar sobre ella. Para estimar estas fuerzas durante el mecanizado se empleó el enfoque basado en la **fuerza específica de corte** (K_c, K_f y K_p), también denominada fuerza específica de arrancamiento. Dicho modelo fue propuesto inicialmente por Kienzle (1952)² y este modelo se adaptó definiendo las constantes de arrancamiento correspondientes al acero para moldes, lo cual permitió calcular tanto la dirección como la magnitud de las fuerzas de mecanizado.

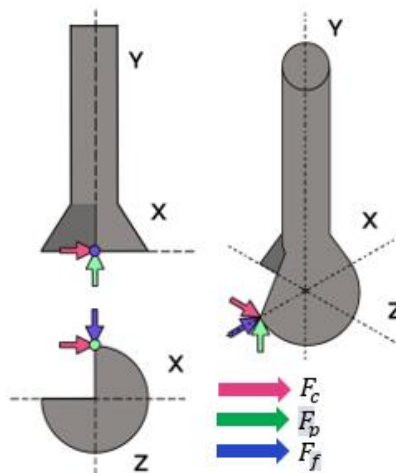
² KIENZLE, O. Die Bestimmung von Kräften und Leistungen an spanenden Werkzeugen und Werkzeugmaschinen. En: Forschung im Ingenieurwesen. 1952. vol. 20, no. 1, p. 5-7.

3.1.1.1 Modelo. El cálculo de las fuerzas de corte se realizó mediante el modelo de fuerza específica de corte, ampliamente utilizado en la teoría del mecanizado por su simplicidad y capacidad de aproximar el comportamiento real del material bajo condiciones prácticas (Kienzle, 1952)³. Este modelo permite relacionar la fuerza de corte con el área de la sección de viruta de la siguiente manera.

$$F_c = K_c \cdot A_c, \quad F_f = K_f \cdot A_c, \quad F_p = K_p \cdot A_c$$

Donde A corresponde al área de la sección de corte (mm^2) y K_c y F_c corresponden respectivamente a la constante específica de corte (MPa) y la fuerza específica de corte (N) en dirección del corte, K_f y F_f corresponden a la dirección de avance y K_p y F_p corresponden a la dirección perpendicular a la superficie mecanizada. La orientación de las fuerzas puede visualizarse y comprenderse con mayor claridad en la Figura 2, donde cada una se representa en relación con los ejes del sistema tridimensional.

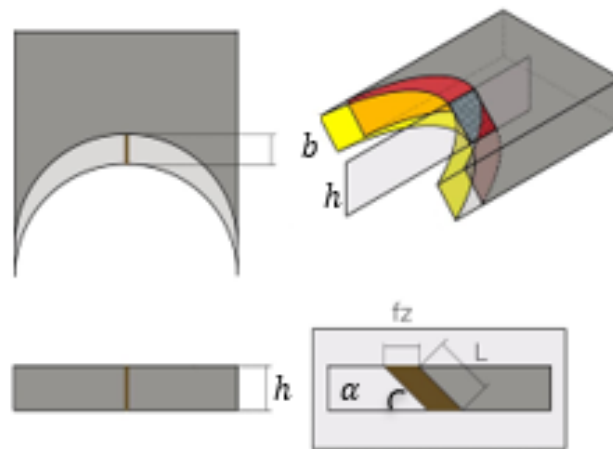
Figura 2. Diagrama de fuerzas



³ KIENZLE, O. Die Bestimmung von Kräften und Leistungen an spanenden Werkzeugen und Werkzeugmaschinen. En: Forschung im Ingenieurwesen. 1952. vol. 20, no. 1, p. 5-7.

Ahora, analizando la geometría de la herramienta y los parámetros de corte se determinó el área de la sección de viruta. Esta geometría se puede visualizar mejor en la Figura 3 identificando la longitud del filo y la base la cual corresponde al avance por revolución, ya que, con cada revolución, esta será el área cortada por un filo.

Figura 3. Área de la viruta



Teniendo en cuenta el ángulo α de las herramientas propuestos en los objetivos los cuales son 55° , 65° y 60° , podemos relacionarlo junto con la longitud del filo L (mm) para hallar la altura de esta área a mecanizar y a partir de esto, proponer la ecuación para el área de corte la cual corresponde a:

$$A_c = b * h$$

Donde A_c corresponde al área de corte (mm^2), b corresponde a la base (mm) y h corresponde a la altura del filo (mm), sabiendo que

$$h = L \cdot \text{Sin}(\alpha)$$

Para determinar la longitud de filo se investigaron algunos insertos que pudieran realizar esta operación donde se escogieron los insertos de torneado las cuales son comunes y tienen un filo que corresponde al filo necesario para realizar este corte, de estas plaquitas se concluyó que un valor promedio de longitud de filo es un valor de 11.628 mm.

Utilizando este valor de $L = 11.628 \text{ mm}$ y el ángulo $\alpha = 65^\circ$, el ~~cual~~ es el ángulo que permite tener la altura h mas larga y aumentar un poco el área para ser más conservadores, obtenemos el valor para la altura de corte

$$h = 11.628 \cdot \sin(65^\circ)$$

$$h = 10.070 \text{ mm}$$

El ancho de dicha área corresponde al espesor de la viruta que la herramienta es capaz de cortar. Para esta dimensión se asumió un valor de $0,1 \text{ mm}$, el cual se considera como el parámetro de corte denominado avance por diente. Este valor es ampliamente utilizado en la industria debido a su eficacia y estandarización. Con esto calculamos el valor del área de corte

$$A_c = 0.1 \cdot 10.070$$

$$A_c = 1.007 \text{ mm}^2$$

3.1.1.2 Constantes. Para determinar las constantes K_c , K_p y K_f , primero se investigaron las propiedades del acero P20, utilizado en la fabricación de moldes de inyección. Este material pertenece a la familia de los aceros para herramientas y presenta una resistencia a la tracción relativamente alta, lo que lo ubica dentro de la categoría de aceros con resistencia mecánica media-alta y comportamiento relativamente uniforme en aplicaciones de mecanizado. Posteriormente, se empleó la Tabla 1 con valores experimentales de K_c para calcular el valor adecuado al material analizado.

Tabla 1. Valores experimentales de Kc

<i>Work Material</i>	Tensile Strength (MPa)	Specific Cutting Force Kc (MPa)				
		0.1 (mm/rev)	0.2 (mm/rev)	0.3 (mm/rev)	0.4 (mm/rev)	0.6 (mm/rev)
<i>Mild Steel</i>	520	3610	3100	2720	2500	2280
<i>Medium Steel</i>	620	3080	2700	2570	2450	2300
<i>Hard Steel</i>	720	4050	3600	3250	2950	2640
<i>Tool Steel</i>	670	3040	2800	2630	2500	2400
<i>Tool Steel</i>	770	3150	2850	2620	2450	2340
<i>Chrome Manganese Steel</i>	770	3830	3250	2900	2650	2400
<i>Chrome Manganese Steel</i>	630	4510	3900	3240	2900	2630
<i>Chrome Molybdenum Steel</i>	730	4500	3900	3400	3150	2850
<i>Chrome Molybdenum Steel</i>	600	3610	3200	2880	2700	2500
<i>Nickel Chrome Molybdenum Steel</i>	900	3070	2650	2350	2200	1980
<i>Nickel Chrome Molybdenum Steel</i>	352HB	3310	2900	2580	2400	2200
<i>Hard Cast Iron</i>	46HRC	3190	2800	2600	2450	2270
<i>Meehanite Cast Iron</i>	360	2300	1930	1730	1600	1450
<i>Grey Cast Iron</i>	200HB	2110	1800	1600	1400	1330

Fuente: MITSUBISHI MATERIALS CORPORATION. Cutting Power for Turning - Technical Info/Cutting Formula [en línea]. 2026. [Consultado el 10 de Octubre de 2025]. Disponible en: <https://www.mmc-carbide.com/en-US/technical-info/cutting-formula/turning/cutting-power>

Según la tabla de Mitsubishi Materials Corporation (s.f.)⁴, el acero P20 se clasifica dentro de los aceros para herramientas con una resistencia a la tracción de 770 MPa, lo que implica que su K_c depende directamente del avance por revolución ($\frac{mm}{rev}$). Para estimar este valor, se tomó como referencia el avance por diente utilizado anteriormente, igual a $0.1 \frac{mm}{diente}$. Considerando un corte con dos dientes, el avance por revolución se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Avance por revolucion} = 0.1 \frac{mm}{diente} \cdot 2 \frac{diente}{rev} = 0.2 \frac{mm}{rev}$$

De acuerdo con la tabla, el valor correspondiente de K_c para un acero para herramientas a $f = 0.2 \frac{mm}{rev}$ es $2850 \frac{N}{mm^2}$.

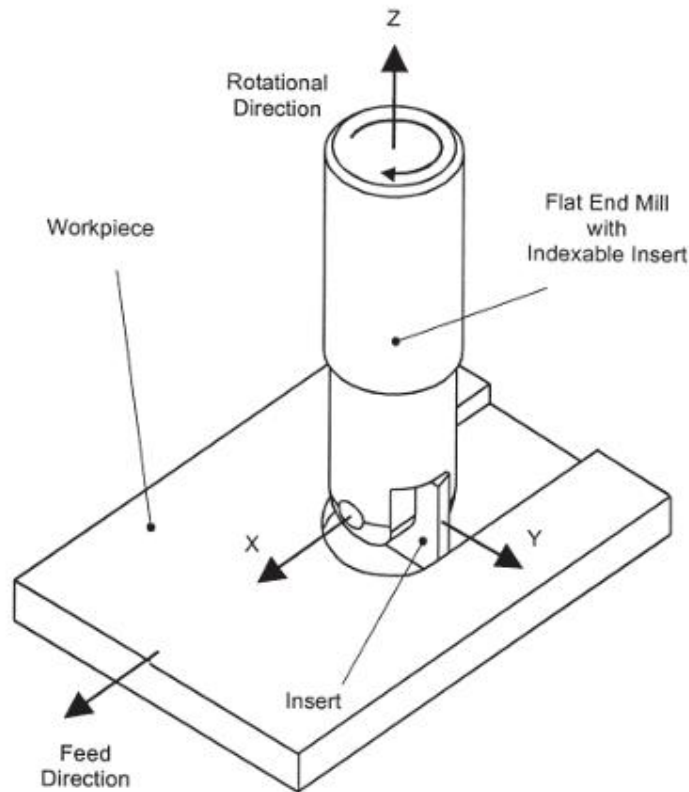
Ahora, en el documento de Özel y Altan (2000)⁵, en la Figura 4, se observa el sistema de coordenadas empleado para calcular la magnitud de las fuerzas de corte en un ensayo realizado con el mismo material utilizado en el mecanizado de las colas de milano diseñadas. Este sistema resulta fundamental, ya que, en conjunto con la Figura 2, donde se definió la dirección de las fuerzas de corte específicas para este proyecto, permite establecer la relación entre las fuerzas en los ejes **X**, **Y**, **Z** y las fuerzas de corte, de avance y perpendiculares consideradas en esta investigación, de la siguiente manera:

⁴ MITSUBISHI MATERIALS CORPORATION. Cutting Power for Turning - Technical Info/Cutting Formula [en línea]. 2026. [Consultado el 10 de Octubre de 2025]. Disponible en: <https://www.mmc-carbide.com/en-US/technical-info/cutting-formula/turning/cutting-power>

⁵ ÖZEL, Tug̃rul y ALTAN, Taylan. Process simulation using finite element method — prediction of cutting forces, tool stresses and temperatures in highspeed flat end milling. En: Journal of Materials Processing Technology. 2000. vol. 103, no. 3. p. 430-438.

$$F_c = F_x, F_f = F_y, F_p = F_z$$

Figura 4. Definición de sistema coordenado en corte

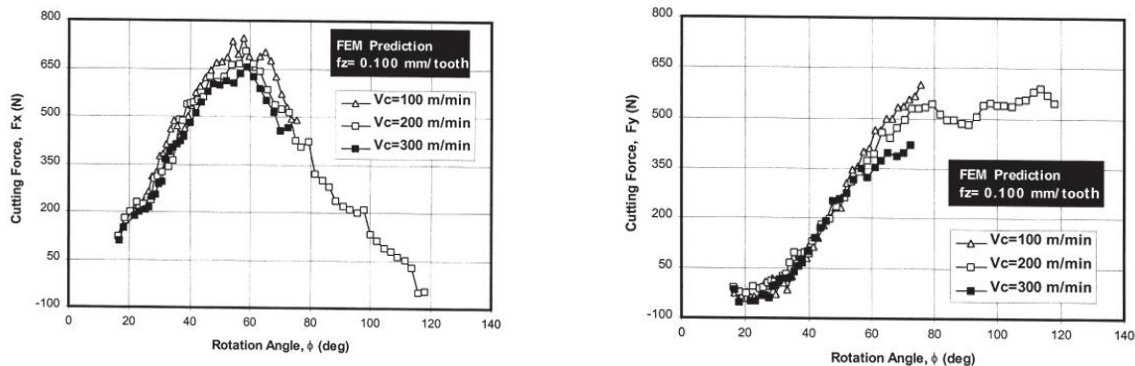


Fuente: ÖZEL, Tug̃rul y ALTAN, Taylan. Process simulation using finite element method — prediction of cutting forces, tool stresses and temperatures in highspeed flat end milling. En: Journal of Materials Processing Technology. 2000. vol. 103, no. 3. p. 430-438.

Para definir la constante en dirección F_y , correspondiente a la fuerza de avance, se realizó un cálculo de proporcionalidad a partir de los resultados reportados en el mismo trabajo. En este análisis se identificó la mayor magnitud de fuerza con el fin de ser más conservadores y evaluar el caso más crítico. Así, como se observa en la Figura 5, el valor

de F_x fue de $700N$, correspondiente a la fuerza de corte F_c . Este valor se comparó con el máximo valor de la fuerza F_y , de $490 N$, asociada a la fuerza de avance F_f .

Figura 5. Esquema de contacto en herramientas de corte (Figura 10, Ozel y Altan, 2000)



Fuente: ÖZEL, Tug̃rul y ALTAN, Taylan. Process simulation using finite element method — prediction of cutting forces, tool stresses and temperatures in highspeed flat end milling. En: Journal of Materials Processing Technology. 2000. vol. 103, no. 3. p. 430-438.

Con estos valores de fuerzas en el mecanizado, la relación quedaría de la siguiente manera:

$$F_x = F_c = K_c \cdot A = 700 N$$

Usando el valor de $K_c = 2800 \frac{N}{mm^2}$, la ecuación queda:

$$2850 \frac{N}{mm^2} \cdot A = 700 N$$

$$A = 0.246 mm^2$$

Luego, para la fuerza de avance F_f :

$$F_y = F_f = K_f \cdot A = 490 N$$

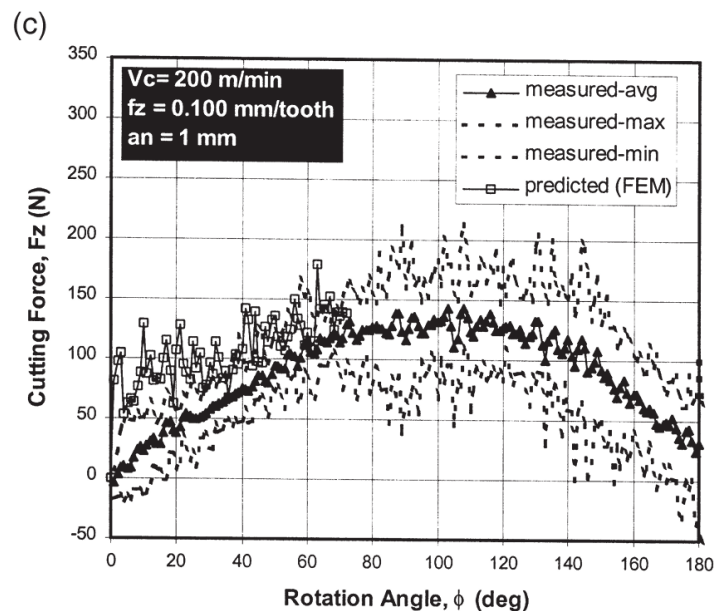
Sustituyendo el valor de A obtenido:

$$K_f \cdot 0.246 \text{mm}^2 = 490 \text{ N}$$

$$K_f = 1991.869 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Finalmente, se aplica el mismo procedimiento para determinar el valor de K_p identificando el máximo valor de la fuerza de corte en dirección de F_z el cual se puede observar en la Figura 6 que es un promedio de 150 N .

Figura 6. Detalle de la parte C del contacto de herramientas (Figura 15C, Ozel y Altan, 2000)



Fuente: ÖZEL, Tug̃rul y ALTAN, Taylan. Process simulation using finite element method — prediction of cutting forces, tool stresses and temperatures in highspeed flat end milling. En: Journal of Materials Processing Technology. 2000. vol. 103, no. 3. p. 430-438.

Con este valor, aplicamos el mismo proceso con el área A calculado anteriormente

$$F_z = F_p = K_p \cdot A = 150 \text{ N}$$

$$K_p \cdot 0.246 \text{ mm}^2 = 150 \text{ N}$$

$$K_p = 609.756 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

En conclusión, a partir del análisis realizado se determinaron los siguientes valores de constantes específicas de corte para el acero P20: $K_c = 2850 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$, $K_f = 1991.869 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ y $K_p = 609.756 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$. Estos parámetros resultan fundamentales para la modelación de las fuerzas en el proceso de mecanizado, ya que permiten relacionar las fuerzas medidas en los ejes X, Y y Z con las componentes de corte, avance y penetración, garantizando un análisis más preciso del comportamiento del material bajo las condiciones de operación establecidas.

3.1.1.3 Cálculo de fuerzas. Con el valor de las constantes de la fuerza específica de arrancamiento apropiados para el acero P20 para moldes, tenemos la dirección de las fuerzas, ahora, calculamos la magnitud con las fórmulas anteriormente desarrolladas.

Asumimos que las constantes específicas de corte obtenidas están expresadas en unidades de presión (N/mm^2) y que el área efectiva de corte A_c está en (mm^2); con estas unidades, las fuerzas resultan en newton (N).

- $A_c = 1.007 \text{ mm}^2$
- $K_c = 2850 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
- $K_f = 1991.869 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
- $K_p = 609.756 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Las componentes se calculan multiplicando la constante específica correspondiente por el área de corte:

$$F_c = K_c \cdot A_c, F_f = K_f \cdot A_c, F_p = K_p \cdot A_c$$

$$F_c = 2850 \frac{N}{mm^2} \cdot 1.007 mm^2 = 2869.950 N$$

$$F_f = 1991.869 \frac{N}{mm^2} \cdot 1.007 mm^2 = 2005.812 N$$

$$F_p = 609.756 \frac{N}{mm^2} \cdot 1.007 mm^2 = 614.024 N$$

Las fuerzas de corte obtenidas, $F_c = 2869.950 N$, $F_p = 614.024 N$ y $F_f = 2005.812 N$, constituyeron los valores de referencia que se emplearon en esta investigación para comprobar, tanto numéricamente como mediante simulación, la resistencia estructural de la herramienta de corte. Estos resultados permitieron establecer una base cuantitativa sólida para evaluar el comportamiento mecánico del sistema bajo las condiciones reales de mecanizado.

3.1.2 Alternativas. Con base en el cálculo de las fuerzas y en el análisis de las alternativas disponibles en el mercado, así como de los avances tecnológicos, se plantea el diseño de cuatro tipos de herramientas. Dichas herramientas se diferencian por tener dos o cuatro filos de corte y por la configuración de corte, la cual puede incluir plaquitas de carburo de tungsteno o prescindir de ellas.

3.1.2.1 Filos. Una parte importante del diseño consistió en definir la configuración de la herramienta, considerando la posibilidad de fabricar fresas de 2, 3, 4 y hasta 5 filos, ya que el número de filos está directamente relacionado con el tipo de mecanizado y las condiciones de corte. Las fresas de dos filos ofrecen mayor capacidad de evacuación de viruta y buena refrigeración, siendo adecuadas para materiales blandos o cortes profundos. Las de tres filos constituyen un punto intermedio, equilibrando productividad y evacuación de viruta. Las de cuatro filos brindan mayor rigidez y permiten avances más elevados, lo que resulta ventajoso en materiales duros y operaciones de acabado. Finalmente, las de cinco filos incrementan la productividad al generar cortes más suaves y con mejor acabado superficial, aunque presentan menor espacio para evacuar viruta.

Figura 7. Fresas cola de milano de 2, 3, 4 y 5 filos



Fuente: ALIEXPRESS. Fresa de cola de milano: herramienta de corte para mecanizado CNC. [en línea]. China: Alibaba Group, 2024. [consultado 17, marzo, 2025]. Disponible en: <https://es.aliexpress.com/i/1005006116876717.html>

- **Manufacturero.** Durante el diseño de las herramientas se evaluó la factibilidad de construcción considerando la complejidad de los procesos de manufactura y la precisión requerida en la geometría de corte. El número de filos resultó un factor determinante, ya que condiciona tanto el método de fabricación como la calidad final de la herramienta.

Las configuraciones de tres y cinco filos fueron descartadas porque su manufactura exige el uso de un torno especializado de tres ejes para garantizar el desfase angular uniforme entre filos. Si bien era posible emplear un divisor mecánico manual, este método incrementaba la probabilidad de errores en el posicionamiento y dificultaba mantener tolerancias estrechas, reduciendo así la confiabilidad del proceso y complicando de manera significativa la creación de estas geometrías impares.

En el caso de las fresas de cuatro filos, aunque factibles, presentaban mayores exigencias de manufactura debido a la necesidad de mecanizar cuatro cavidades para alojar las plaquitas. Este requerimiento implicaba utilizar un mayor número de herramientas de corte en el proceso de fabricación, lo cual incrementaba el tiempo de producción y la probabilidad de desgaste o rotura de dichas herramientas durante la generación de las cavidades. A esto se sumaban los riesgos de pérdida de simetría en los filos, problemas de concentricidad y desbalance dinámico, así como mayores dificultades en las operaciones de afilado y rectificado, lo que se traducía en un aumento de los costos de producción.

En contraste, las fresas de dos filos ofrecían ventajas significativas desde el punto de vista manufacturero. Su diseño más simple facilitaba la obtención de geometrías precisas con menores recursos y tiempos de mecanizado, además de reducir los riesgos de defectos asociados a la fabricación. La disposición de los filos proporcionaba un mayor espacio para la evacuación de viruta, lo que favorecía la estabilidad del proceso y disminuía la acumulación de calor en la zona de corte. La

simplicidad geométrica también reducía la probabilidad de desbalance dinámico y garantizaba una mejor distribución de esfuerzos, aspectos que en conjunto las convertían en la alternativa más favorable en términos técnicos, económicos y de manufactura.

- **Económico.** El costo de producción fue uno de los factores más relevantes en el análisis, ya que contempla tanto el valor de los insertos como los costos asociados al proceso de manufactura. En el contexto colombiano, estos últimos suelen calcularse en función del tiempo de uso de la máquina-herramienta, expresado como tarifa por hora, por lo que la complejidad geométrica de la herramienta y el tiempo de mecanizado requerido se convierten en variables determinantes. Una fresa de cuatro filos implica mecanizar cuatro cavidades para el alojamiento de las plaquitas, lo que prácticamente duplica el tiempo de trabajo en comparación con una fresa de dos filos. Este mayor tiempo de mecanizado incrementa de manera proporcional el costo por hora de máquina y, adicionalmente, genera un mayor desgaste de las herramientas empleadas en la fabricación, elevando los costos indirectos del proceso.

A lo anterior se suma que una fresa de cuatro filos demanda cuatro plaquitas de corte, mientras que una de dos filos solo requiere dos, reduciendo así el gasto en consumibles a la mitad. De esta manera, tanto desde el punto de vista del tiempo de mecanizado como desde el consumo de insertos, la configuración de dos filos se muestra como la opción más eficiente y económica en términos de costo total de producción.

- **Técnico.** En el mecanizado de geometrías tipo cola de milano, la selección del número de filos de la herramienta es un factor determinante debido a las condiciones particulares de corte asociadas a cavidades profundas y perfiles con ángulos cerrados. Tanto las fresas de dos como de cuatro filos son capaces de

realizar la misma función de mecanizado y remover el mismo volumen de material, siempre que se ajusten adecuadamente los parámetros de corte.

La tasa de remoción de material Q en operaciones de fresado se expresa mediante la ecuación:

$$Q = f_t \cdot z \cdot N \cdot A_c$$

Donde f_t es el avance por diente, z el número de filos, N la velocidad de rotación y A_c es el área de corte⁶. De acuerdo con esta relación, es posible obtener un mismo valor de Q utilizando diferentes combinaciones de estos parámetros; por ejemplo, una fresa de dos filos puede alcanzar la misma tasa de remoción de material que una de cuatro filos mediante un mayor avance por diente, sin que ello implique una pérdida de capacidad de corte.

No obstante, en el caso específico de las fresas tipo cola de milano, el incremento del número de filos reduce el espacio disponible para la evacuación de viruta y aumenta el contacto simultáneo entre herramienta y pieza, lo que puede derivar en acumulación de viruta, incremento de temperatura y aparición de vibraciones. Estas condiciones obligan, en la práctica, a reducir el avance por diente y otros parámetros de corte en herramientas de cuatro filos, limitando su desempeño real.

Por esta razón, se seleccionó una fresa de dos filos, ya que ofrece una mejor evacuación de viruta y mayor estabilidad durante el mecanizado, permitiendo alcanzar la tasa de remoción de material requerida de forma más segura y confiable, sin comprometer la integridad de la herramienta ni la calidad del proceso.

⁶ GROOVER, Mikell P. Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas. 3 ed. México: McGraw-Hill, 2007. 1024 p.

- **Comparación.** Para llegar a una conclusión se desarrolló el siguiente cuadro comparativo donde se evaluaron los pros y los contras de las dos opciones

Tabla 2. Cuadro comparativo dos y cuatro filos

Criterio	Dos Filos	Cuatro Filos
Manufactura	<ul style="list-style-type: none"> • Geometría sencilla • Mas fácil de lograr simetría • Menor tendencia al desbalance dinámico 	<ul style="list-style-type: none"> • Geometría compleja • Complicado lograr una simetría • Mayor tendencia al desbalance dinámico
Economía	<ul style="list-style-type: none"> • Menor costo de manufactura. • Menor tiempo de mecanizado. • Usa solo dos plaquitas de corte 	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor costo de manufactura • Mayor tiempo de mecanizado • Usa cuatro plaquitas de corte
Técnico	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor capacidad de evacuación de viruta. • Reducción de obstrucciones, vibraciones y sobrecalentamiento. • Buen desempeño en desbaste y semiacabado. 	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor tasa de remoción de material. • Permite parámetros de corte más exigentes • Mejor aprovechamiento en ciertas condiciones de mecanizado.

El cuadro comparativo nos permitió concluir que una fresa de dos filos representa una solución tanto económica como sencilla de fabricar, a su vez, ofrece algunas ventajas por sobre la fresa de cuatro filos que ayudaran a mantener la vida útil de la herramienta y estas se tuvieron en cuenta al momento de diseñar la geometría.

Se concluyó que la fresa de dos filos fue la opción más conveniente, al ofrecer menor complejidad de fabricación, menores costos y una mejor evacuación de viruta. Además, se determinó que dos filos fueron suficientes para cumplir con los requerimientos del mecanizado, sin necesidad de recurrir a una fresa de cuatro filos.

3.1.2.2 Insertos. La selección de la herramienta de corte se basó en el uso de insertos de carburo de tungsteno, debido a sus ventajas técnicas y económicas. Este material ofrece alta dureza y resistencia al desgaste, lo que permite trabajar con mayores velocidades de corte, mantener el filo por más tiempo y garantizar una mejor calidad superficial en las piezas mecanizadas. Además, el uso de plaquitas intercambiables simplifica el mantenimiento, ya que no requieren reafilado: al presentarse desgaste, se reemplaza únicamente el inserto, reduciendo los tiempos de inactividad y los costos asociados.

Desde el punto de vista económico, resulta más eficiente fabricar el portaherramientas en un acero resistente, pero de menor costo, reservando el carburo de tungsteno exclusivamente para los filos de corte. Esto optimiza la relación costo-beneficio, pues se sustituye únicamente la plaquita dañada y no la herramienta completa. A ello se suma la amplia disponibilidad de geometrías y calidades normalizadas en catálogos industriales, lo que facilita la selección y reposición de los insertos.

En la Figura 8 se muestra una herramienta tipo cola de milano sin insertos intercambiables, correspondiente a una herramienta monolítica en la que el filo forma parte integral del cuerpo. Este tipo de herramienta requiere procesos de reafilado una vez

se produce el desgaste, lo que incrementa los tiempos de mantenimiento y limita su vida útil efectiva frente a herramientas con plaquitas intercambiables.

Figura 8. Cola de milano sin insertos



Fuente: IMAT COLOMBIA. Fresa cola de milano 25 mm - 45°. [en línea]. Medellín: Imat Herramientas y Accesorios, 2024. [consultado 17, marzo, 2025]. Disponible en: <https://imat.com.co/accesorios/524-fresa-cola-de-milano-25-mm-45.html>

En conjunto, estas consideraciones justifican la elección de plaquitas de carburo de tungsteno para el proceso de mecanizado.

3.1.3 Selección de materiales. Posteriormente, se realizó una selección preliminar de materiales tanto para los filos como para el portaherramientas, considerando los estándares más utilizados en la industria. La elección de la plaquita de corte (inserto) se basó en el análisis de catálogos técnicos y en las aplicaciones recomendadas por los fabricantes, garantizando así un equilibrio óptimo entre desempeño, costo y disponibilidad en el mercado local.

3.1.3.1 Material de porta herramienta. Para el diseño del portaherramientas se seleccionó de manera preliminar el acero AISI 4140, un material ampliamente utilizado en la industria metalmecánica gracias a su equilibrio entre resistencia mecánica, tenacidad y facilidad de maquinado. Este acero de aleación se emplea de forma común en la fabricación de ejes, engranajes y portaherramientas, y además es de fácil adquisición en el mercado local, particularmente en Bucaramanga, lo que asegura disponibilidad y reduce costos logísticos.

En cuanto a sus propiedades, como se puede ver en la Tabla 3, el AISI 4140 presenta un límite de fluencia y un módulo de elasticidad que lo hacen adecuado para soportar esfuerzos propios del mecanizado. No obstante, es importante resaltar que este material es más suave que el carburo de tungsteno empleado en las plaquitas de corte, lo cual resulta conveniente, ya que permite optimizar costos debido a que el portaherramientas se fabrica en un acero económico y resistente, mientras que el filo de corte se concentra en un material duro y especializado.

Tabla 3. Propiedades mecánicas del AISI 4140

<i>Propiedad</i>	<i>Valor típico</i>	<i>Unidad</i>
<i>Resistencia a la tracción (Ultimate Tensile Strength)</i>	~ 655 MPa	MPa
<i>Límite de fluencia (Yield Strength)</i>	~ 415 MPa	MPa
<i>Módulo de elasticidad (Young's modulus)</i>	~ 190-210 GPa	GPa
<i>Densidad</i>	~ 7,85	g/cm ³
<i>Alargamiento (Elongation at break, condición normal)</i>	~ 25-26 %	%
<i>Dureza Brinell</i>	~ 200-310	HB







Fuente: AZOM. AISI 4140 Alloy Steel (UNS G41400): mechanical properties. [en línea]. Manchester, RU: AZoNetwork, 2012. [consultado 20, abril, 2026]. Disponible en: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6769>

Cabe señalar que esta elección se considera provisional, pues su validación se realizará mediante cálculos de esfuerzos y deformaciones con base en ecuaciones de resistencia de materiales. De esta manera, la selección inicial combina criterios prácticos de uso común en la industria, disponibilidad regional y una adecuada relación entre costo y desempeño, mientras que el análisis numérico garantizará que el portaherramientas cumpla con los requerimientos de rigidez y seguridad.

3.1.3.2 Selección de inserto. El proceso de selección del inserto de corte inició con la revisión de catálogos técnicos de distintos fabricantes reconocidos en la industria, con el fin de identificar las opciones más adecuadas para el presente trabajo. Además del análisis técnico, se consideró la disponibilidad comercial, dado que algunas referencias no se encuentran de manera inmediata en el país y requieren importación, lo que incrementa los costos y los tiempos de entrega para los usuarios en Bucaramanga.

Para la selección definitiva se empleó la plataforma Kennametal, siguiendo el proceso de selección con las alternativas resumidas en la Tabla 4, estas son las propiedades que se tuvieron en cuenta para seleccionar la plaquita

Tabla 4. Resumen de alternativas en Kennametal

Material	P	M	K	N	S	H
	Aceros	Inoxidables	Fundiciones	Aluminio	Aleaciones	Endurecidos
Forma	V 35°	D 55°	W 80°	T 60°	C 80°	S 90°
						
Ángulo	N	B	C	P	D	E
	0°	5°	7°	11°	15°	20°
Calidad	M			G		
	Media			Alta		

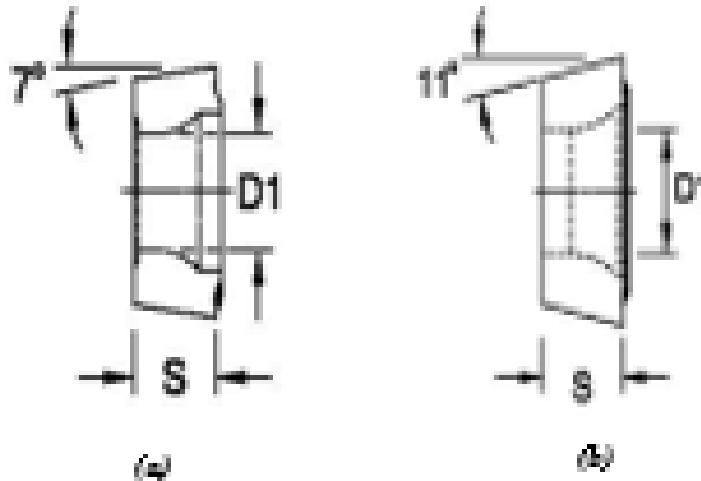
Fuente: Elaboración propia, con base en KENNAMETAL. Soluciones de herramientas de corte y metalurgia. [en línea]. Latrobe, EE. UU.: Kennametal Inc., 2024. [consultado 15, abril, 2026]. Disponible en: <https://www.kennametal.com/es/es/home.html>

El primer paso consistió en identificar los aspectos fundamentales del corte. En este caso, el material corresponde a un acero P20 para moldes de inyección, clasificado en el grupo ISO P, lo cual orienta la elección hacia insertos diseñados específicamente para este tipo de acero. Dado que el proceso requiere remover un volumen considerable de material, se determinó que el inserto debía estar destinada a operaciones de desbaste, asegurando la evacuación eficiente de viruta y manteniendo la productividad del mecanizado.

Figura 10

(a) Inserto tipo C,

(b) Inserto tipo P.



Fuente: KENNAMETAL. Soluciones de herramientas de corte y metalurgia. [en línea]. Latrobe, EE. UU.: Kennametal Inc., 2024. [consultado 15, abril, 2026]. Disponible en: <https://www.kennametal.com/es/es/home.html>

Una vez definida la geometría, se analizó la tolerancia de fabricación. Para los insertos tipo D se encontraron las calidades M (media) y G (alta precisión). En este caso se optó por la calidad M, ya que la herramienta está destinada a remover grandes volúmenes de viruta, donde la prioridad es la resistencia y productividad del mecanizado antes que el acabado superficial.

Posteriormente, se analizó el cuadro comparativo de opciones geométricas presentado en el catálogo de Kennametal (Figura 11), el cual incluye variaciones en parámetros como la longitud de filo (L10), el grosor del inserto (S), el radio de esquina (R ϵ) y el diámetro del orificio (D1).

Figura 11. Selección de placas kennametal

Número de material SAP	Número de catálogo ISO	Calidad	D	L10	S	Rε	D1
7161010	DCMT070204MPS	KTP25S	6.35	7.752	2.38	0.4	2.8
7161011	DCMT070208MPS	KTP25S	6.35	7.752	2.38	0.8	2.8
7161012	DCMT11T304MPS	KTP25S	9.525	11.628	3.97	0.4	4.4
7161013	DCMT11T308MPS	KTP25S	9.525	11.628	3.97	0.8	4.4
7161014	DCMT150404MPS	KTP25S	12.7	15.504	4.76	0.4	5.5
7161015	DCMT150408MPS	KTP25S	12.7	15.504	4.76	0.8	5.5

Fuente: KENNAMETAL. Soluciones de herramientas de corte y metalurgia. [en línea]. Latrobe, EE. UU.: Kennametal Inc., 2024. [consultado 15, abril, 2026]. Disponible en: <https://www.kennametal.com/es/es/home.html>

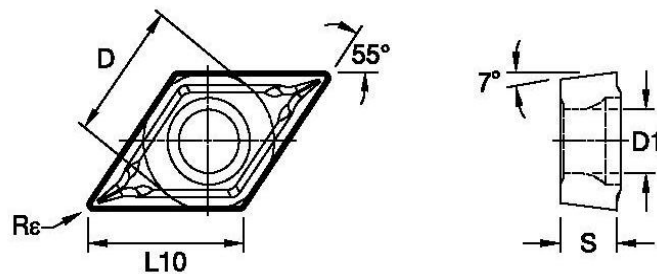
En el análisis de la longitud de filo L10, se descartó la opción de 15.504 mm por ser excesivamente grande en relación con la fresa, lo que generaría una base de más de 40 mm frente a un mango de solo 25 mm, resultando en una herramienta desproporcionada. De igual forma, se rechazó la longitud de 7.752 mm, al considerarse demasiado pequeña y susceptible a concentrar esfuerzos en la zona de corte. Finalmente, se seleccionó la medida de 11.628 mm, por ser la más adecuada para garantizar un corte amplio sin comprometer la resistencia estructural de la herramienta.

En cuanto al radio de punta Rε, se encontraron valores de 0.2 mm, 0.4 mm, 0.8 mm y 1.2 mm. Se eligió el radio de 0.8 mm, ya que ofrece un equilibrio óptimo entre resistencia del filo y acabado superficial. A diferencia de radios más pequeños, como 0.2 o 0.4 mm, que reducen las fuerzas de corte, pero disminuyen la robustez del filo, el 0.8 mm asegura mayor durabilidad y estabilidad, permitiendo trabajar con mayores profundidades y avances sin afectar la precisión. Frente al radio de 1.2 mm, que incrementa considerablemente las fuerzas de corte y puede inducir vibraciones en piezas poco

rígidas, el 0.8 mm mantiene un buen acabado con esfuerzos controlados, adaptándose mejor a las condiciones generales de mecanizado del proyecto.

Finalmente, todas las configuraciones correspondientes a $L10 = 11.628 \text{ mm}$ y $R\epsilon = 0.8 \text{ mm}$ coincidieron en presentar valores de $S = 3.97 \text{ mm}$, $D = 9.525 \text{ mm}$ y $D1 = 4.4 \text{ mm}$, dimensiones que definieron la plaquita seleccionada. Como resultado, se eligió la plaquita con código DCMT11T308-GP, destinada a operaciones de desbaste en materiales clasificados en el grupo ISO P, cuyas dimensiones se ilustran en la Figura 12.

Figura 12. Medidas plaquita DCMT11T308-GP



Tamaño IC de plaquita [D]	9.525 mm
Longitud de filo de corte de plaquita [L10]	11.628 mm
Grosor de plaquita [S]	3.97 mm
Radio de esquina [Rε]	0.8 mm
Tamaño de orificio de plaquita [D1]	4.4 mm

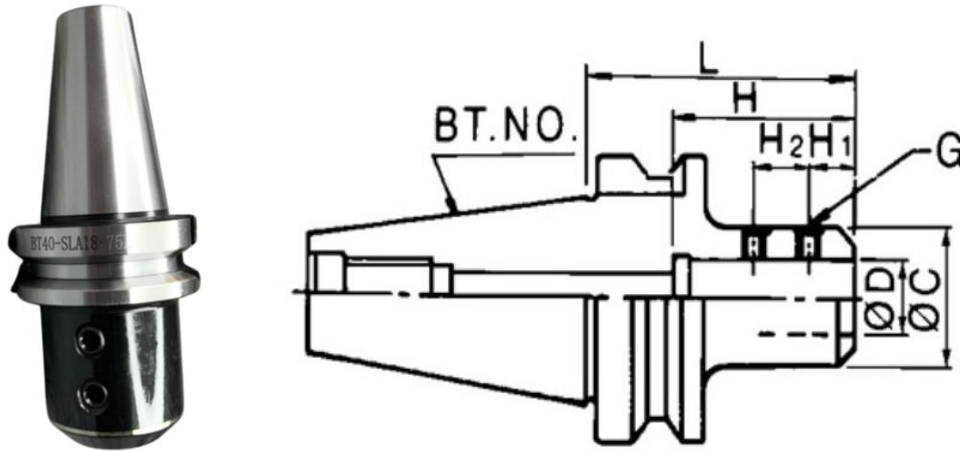
Fuente: KENNAMETAL. Soluciones de herramientas de corte y metalurgia. [en línea]. Latrobe, EE. UU.: Kennametal Inc., 2024. [consultado 15, abril, 2026]. Disponible en: <https://www.kennametal.com/es/es/home.html>

3.1.4 Estructura de herramienta. En esta etapa del diseño, se desarrolló el modelo de la herramienta utilizando el software SolidWorks, lo que permitió crear un modelo CAD tridimensional con el fin de visualizar con precisión las dimensiones y geometrías involucradas. Esta representación facilitó la identificación de aspectos favorables y elementos susceptibles de mejora en una fase temprana del proceso. A partir de este modelo inicial se realizaron las correcciones pertinentes, lo cual permitió validar los datos obtenidos y generar los planos técnicos necesarios para la fabricación de la herramienta. El desarrollo del modelo siguió una secuencia estructurada que incluyó la consideración de criterios de diseño, la creación de geometrías preliminares, la implementación de ajustes y, finalmente, la elaboración de los planos definitivos.

3.1.4.1 Consideraciones. Para iniciar con el dimensionamiento de la herramienta se establecieron como criterios de diseño los siguientes elementos: en primer lugar, el cono BT-40, definido como el método de sujeción de la herramienta; en segundo lugar, los insertos de carburo de tungsteno, cuya geometría determinó la cavidad destinada a alojar la plaquita; en tercer lugar, los ángulos de corte adecuados, necesarios para garantizar la correcta ubicación de la plaquita durante el fresado; en cuarto lugar, los tornillos de fijación, que condicionaron tanto el tamaño como la ubicación del roscado en el portaherramientas, asegurando la sujeción confiable de la plaquita; y finalmente, la inclusión de canales de refrigeración, cuya función es optimizar la disipación de calor y, con ello, prolongar la vida útil de la herramienta.

- **Cono BT-40.** La máquina Leadwell V-20 utiliza un cono porta fresa tipo BT-40, el cual, como se observa en la Figura 13, el cual presenta un diámetro de 25 mm en la zona destinada a la fijación de la fresa. Adicionalmente, este cono dispone de dos alojamientos para prisioneros de diámetro 12 mm, cuya función es asegurar la sujeción de la herramienta y evitar deslizamientos durante el mecanizado. Estas medidas se aprecian mejor en la Tabla 5.

Figura 13. Cono BT40



Fuente: Accesorios & Herramientas S.R.L. (s.f.)

Tabla 5. Medidas Cono BT40

	L	H	H1	H2	D	C	G
(mm)	90	80	24	25	25	50	M18x1.5

A partir de estas consideraciones se establecieron las cotas correspondientes al ancho del mango de la herramienta (25 mm) y se definieron las dimensiones necesarias para el diseño del área de apoyo de los prisioneros, garantizando así una correcta transmisión de esfuerzos y la estabilidad de la herramienta durante la operación de corte.

- **DCMT11308-GP** El inserto de corte DCMT11308-GP se encuentra alojado en el cuerpo de la herramienta mediante un ajuste geométrico de alta precisión, lo que garantiza la ausencia de desplazamientos durante el proceso de mecanizado. Para su correcta disposición se consideraron sus dimensiones características, en particular el ángulo de la cara de 55° , el ángulo de incidencia de 7° , las medidas en las caras del inserto como se muestran en la figura 12. Con base en estas medidas, se adaptó la geometría de manera que el mismo inserto pudiera ubicarse en las tres herramientas diferentes, permitiendo así generar condiciones de corte específicas que cumplen con los ángulos de cada configuración.

Figura 14. Inserto DCMT11308-GP



- **Ángulos de corte.** Al momento de ubicar la plaquita de corte, se tuvieron en cuenta los ángulos de posicionamiento recomendados para las operaciones de fresado. De acuerdo con la información técnica publicada por Mitsubishi Materials Corporation (s.f.), presentada en la Figura 15, se seleccionó la combinación de ángulo axial y ángulo radial positivo. Esta configuración resulta especialmente adecuada para el mecanizado de aceros, en particular para el acero AISI P20, que corresponde al material de trabajo en el presente estudio. Para estas herramientas se escogieron ángulos de 7° tanto para el ángulo axial como para el ángulo radial.

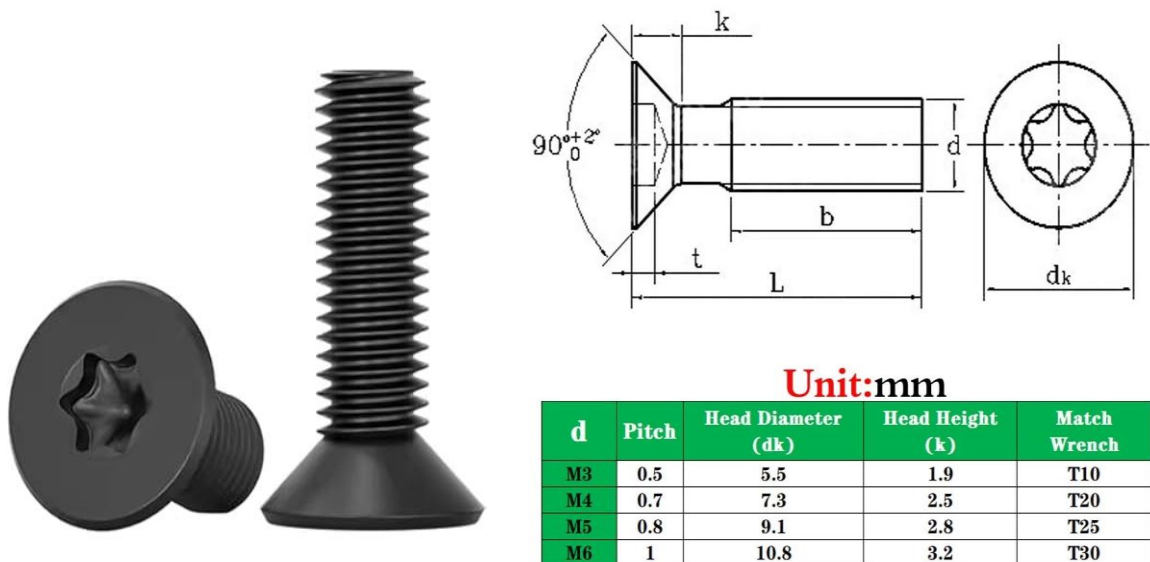
Figura 15. Combinaciones estándar de ángulos radial y axial en plaquitas de fresado.

Standard Cutting Edge Combinations		(+) Axial Rake Angle	(-) Axial Rake Angle	(+) Axial Rake Angle
		Radial Rake Angle (+)	Radial Rake Angle (-)	Radial Rake Angle (-)
		Double Positive (DP Edge Type)	Double Negative (DN Edge Type)	Negative/Positive (NP Edge Type)
Axial Rake Angle (GAMP)		Positive (+)	Negative (-)	Positive (+)
Radial Rake Angle (GAMF)		Positive (+)	Negative (-)	Negative (-)
Insert Used		Positive Insert (One Sided Use)	Negative Insert (Double Sided Use)	Positive Insert (One Sided Use)
Work Material	Steel	●	-	●
	Cast Iron	-	●	●
	Aluminium Alloy	●	-	-
	Difficult-to-Cut Material	●	-	●

Fuente: MITSUBISHI MATERIALS CORPORATION. Cutting Power for Turning - Technical Info/Cutting Formula [en línea]. 2026. [Consultado el 10 de Octubre de 2025]. Disponible en: <https://www.mmc-carbide.com/en-US/technical-info/cutting-formula/turning/cutting-power>

- **Tornillos.** El sistema de fijación de la plaquita se realiza mediante un tornillo M4 x 0.7 con cabeza tipo Torx, caracterizado por un diámetro nominal de 4 mm y un paso de rosca de 0.7 mm, lo que le permite proporcionar una alta capacidad de apriete en aplicaciones de reducido tamaño, las dimensiones de este tornillo se pueden ver mejor en la Figura 16. A partir de estas características dimensionales y funcionales se identificó el punto exacto donde debía realizarse el taladrado y posterior roscado en el portaherramientas, destinado a alojar dicho tornillo y asegurar la inmovilización de la plaquita durante la operación de corte.

Figura 16 Tornillo Torx M4x0.7

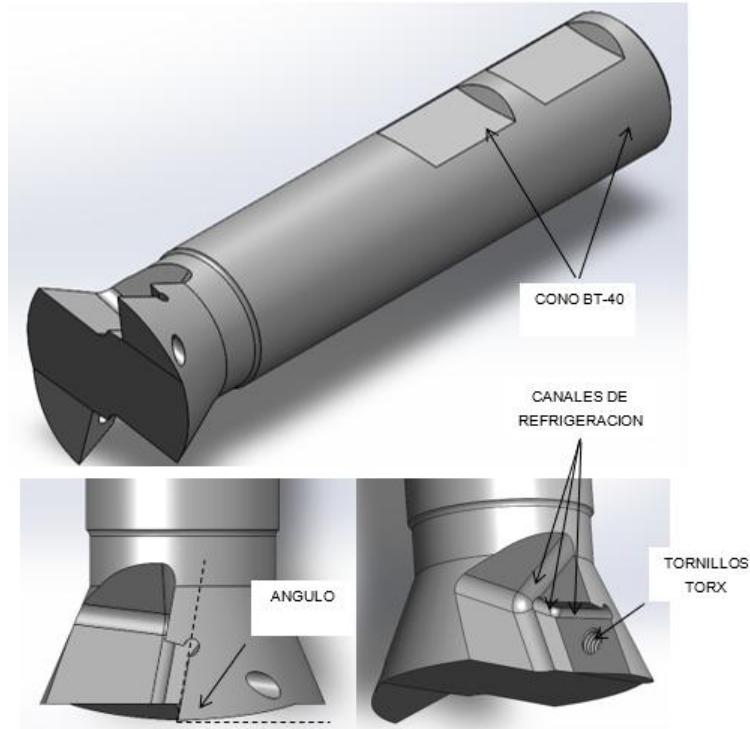


Fuente: EBAY. M3 M4 304 Stainless Steel Pin Tamper Torx Security Screw Flat Head Machine Screw. [en línea]. San José, EE. UU.: eBay Inc., [s.f.]. [consultado 20, marzo, 2025]. Disponible en: <https://www.ebay.com/itm/385032187072>

- **Canales de refrigeración.** Con el propósito de mejorar el desempeño térmico y funcional del conjunto, se diseñaron canales cilíndricos de 2mm de diámetro alineados con dos de las tres aristas de apoyo de la plaquita, los cuales permiten un paso al refrigerante por casi toda la plaquita, reduciendo la acumulación de calor y, en consecuencia, incrementando la vida útil de la plaquita y asegurando una mayor estabilidad dimensional en la pieza mecanizada.

3.1.4.2 Geometrías preliminares. Teniendo en cuenta las consideraciones de diseño previamente establecidas, se desarrolló la geometría de la herramienta, la cual se presenta en la **Figura 17**, donde se ilustran los aspectos correspondientes a cada uno de los criterios definidos.

Figura 17. Diseño inicial Cola de milano



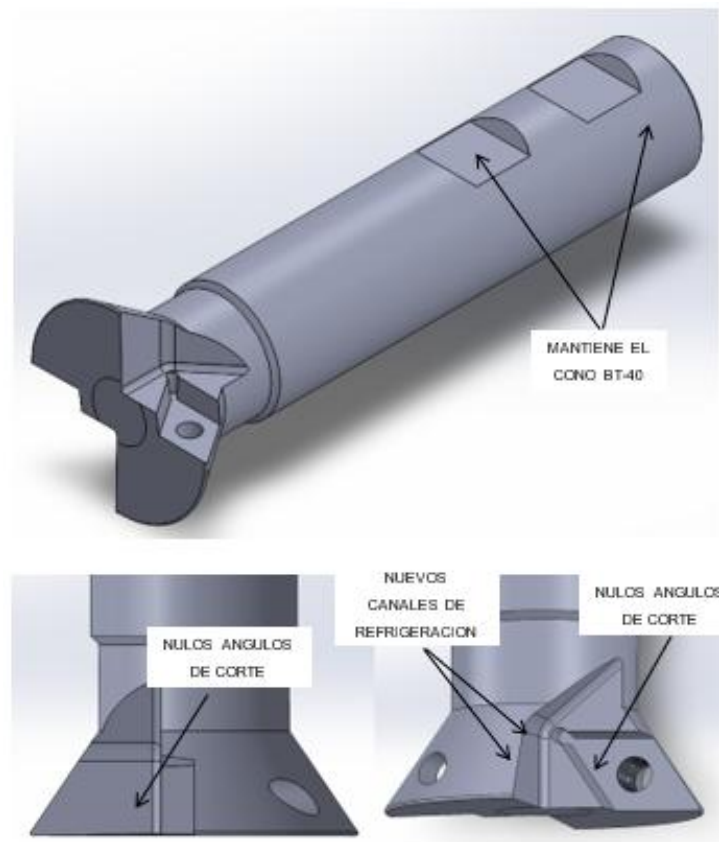
Con el fin de apreciar con mayor detalle las dimensiones y características específicas de cada componente, los planos completos del diseño inicial se pueden encontrar en el Anexo A.

3.1.4.3 Correcciones. Al analizar los planos presentados en el Anexo A, se concluyó que algunas de las geometrías iniciales implicaban un mayor tiempo de mecanizado y un incremento considerable en los costos de fabricación, debido a la complejidad de sus formas. Por esta razón, se decidió no utilizar ángulos axiales y radiales positivos, optando en su lugar por ángulos neutros, lo que facilitó la construcción y el maquinado del alojamiento de la plaquita durante el fresado. Asimismo, se modificó el espacio destinado a la salida de viruta, reduciendo su volumen y, en consecuencia, el peso total de la herramienta, lo cual permitió obtener un diseño más compacto y general sin comprometer la evacuación de viruta, este implementándose con las mismas medidas en las tres herramientas

En cuanto a los aspectos que se conservaron, se mantuvieron sin cambios las dimensiones del cajeadado para el inserto, así como el taladrado y las dimensiones correspondientes al tornillo de fijación. De igual manera, los canales de refrigeración se conservaron al no representar una geometría compleja de obtener. Finalmente, tanto el espacio de sujeción correspondiente al cono BT-40 como las dimensiones generales de la pieza se mantuvieron inalteradas, dado que constituían elementos fundamentales e invariables del diseño.

3.1.4.4 Elaboración de planos. A partir de las correcciones realizadas a los modelos preliminares, se obtuvieron las geometrías finales de las tres piezas que conforman la herramienta de fresado. Estas versiones definitivas incorporaron los criterios de diseño establecidos y las modificaciones necesarias para garantizar tanto la funcionalidad como la factibilidad de fabricación. En la Figura 18 se muestran las vistas generales de cada componente, las cuales evidencian la disposición del alojamiento para la plaquita, los canales de refrigeración y el sistema de fijación mediante el cono BT-40.

Figura 18. Diseño final cola de milano



Los planos técnicos completos, que incluyen las cotas, tolerancias y detalles constructivos de cada pieza, se presentan en el Anexo B, constituyendo la documentación final utilizada para la fabricación de la herramienta.

3.1.5 Validación. Después de realizar las correcciones al diseño y elaborar los planos correspondientes, este se sometió a cálculos los cuales están hechos para comprobar que la herramienta diseñada no va a fallar, que el material seleccionado es el correcto y que la herramienta va a ser capaz de cumplir su función igual o mejor que una herramienta hechiza y que una comprada de algún fabricante mayorista. Estos cálculos corresponden a compresión, flexión, torsión y pandeo, luego se analizará por fatiga para conseguir una vida infinita para la herramienta y, por último, una simulación dinámica que permita comprobar que el factor de seguridad es igual o mayor a $N = 2$, un valor que se estableció a criterio propio.

Para el análisis estructural se establecieron 10^7 ciclos para que la herramienta aguantara vida infinita en fatiga, también se definieron las propiedades del acero AISI 4140. En la Tabla 6 se presentan sus propiedades mecánicas más relevantes.

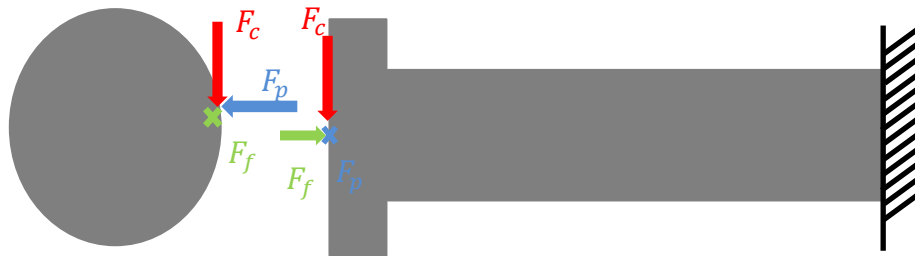
Tabla 6. Propiedades mecánicas del acero AISI 4140

<i>Propiedad</i>	Símbolo	Valor
<i>Límite elástico</i>	σ_y	770 MPa
<i>Resistencia última</i>	σ_u	1100 MPa
<i>Módulo de elasticidad</i>	E	210 GPa
<i>Módulo de corte</i>	G	82 GPa
<i>Coefficiente de Poisson</i>	ν	0.29 – 0.30
<i>Densidad</i>	ρ	7850 kg/m ³

Fuente: CALLISTER, William D. Fundamentos de ciencia e ingeniería de materiales. 2 ed. México: Limusa Wiley, 2012. 960 p.

Ahora bien, para el análisis se consideró la pieza como una barra rígida con las dimensiones que se indican a continuación, la cual estaría sometida a las fuerzas de corte generadas durante el proceso de mecanizado, tal como se muestra en la Figura 19.

Figura 19. Análisis de fuerzas



3.1.5.1 Compresión. Lo primero que se analizó fue la compresión, generada por la fuerza F_p cómo se observa en la **Figura 20**, la cual actúa de manera perpendicular a la superficie de corte. Esta fuerza corresponde a una carga de contacto asociada al proceso de mecanizado y presenta una magnitud considerablemente menor en comparación con las fuerzas que inducen flexión y cortante en la barra.

Figura 20. Fuerza de compresión



Para la estimación del esfuerzo de compresión ⁸, se calculó el área resistente A . Dado que la barra no posee una sección uniforme, se adoptó el menor diámetro con el fin de evaluar el caso más crítico:

$$A = \frac{\pi d^2}{4} \text{ mm}^2 = \frac{\pi(25\text{mm})^2}{4} \text{ mm}^2$$

$$A = 490.873 \text{ mm}^2$$

El esfuerzo de compresión resultante se obtuvo como:

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{614.024 \text{ N}}{490.873 \text{ mm}^2}$$

$$\sigma = 1.250 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Al comparar este valor con el esfuerzo de fluencia del material, se obtiene un factor de seguridad⁹:

$$N = \frac{\sigma_y}{\sigma} = \frac{770 \text{ Mpa}}{1.250}$$

$$N = 615.366 > 2$$

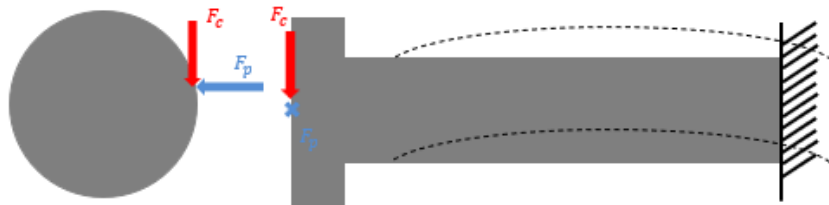
⁸ HIBBELER, Russell C. Mecánica de materiales. 8 ed. México: Pearson Educación, 2011. 896 p.

⁹ HIBBELER, Op. cit., pag. 61

Este valor elevado del factor de seguridad indica que el estado de compresión es no crítico para la barra. Lo anterior se explica debido a que la fuerza F_p corresponde únicamente a una reacción de contacto y no a una carga estructural significativa. En consecuencia, la falla por compresión no gobierna el comportamiento mecánico del sistema y no condiciona el diseño, por lo que los análisis posteriores se enfocan en los modos de falla por flexión y cortante, que resultan más representativos del caso de estudio.

3.1.5.2 Flexión. Para el cálculo por flexión, se modeló la barra como se muestra en la Figura 21 la cual deja ver como la fuerza de avance F_f y la fuerza de corte F_c producen una fuerza resultante la cual, a su vez, ocasiona una reacción de flexión la cual, al ser un material muy rígido, causa que el material no se deforme.

Figura 21. Diagrama de fuerzas flexión



Lo primero es calcular la fuerza que va a provocar la flexión, para esto se calcula la resultante entre la fuerza F_f y F_c .

$$F_r = \sqrt{F_c^2 + F_f^2}$$

$$F_r = \sqrt{2869.950 \text{ N}^2 + 2005.812 \text{ N}^2}$$

$$F_r = 3501.413 \text{ N}$$

Esta fuerza tiene una diferente dirección en la que actúa, pero al ser una herramienta con un cuerpo cilíndrico, esta tendrá el mismo efecto en todas las direcciones, por esto se empieza a calcular el momento de inercia I^{10} de la barra teniendo en cuenta el diámetro menor, esto hizo más conservadores los cálculos al calcular el mayor esfuerzo por flexión:

$$I = \frac{\pi d^4}{64} = \frac{\pi(25 \text{ mm})^4}{64} = 19174.759 \text{ mm}^4$$

$$c = \frac{d}{2} = \frac{25 \text{ mm}}{2} = 12.5 \text{ mm}$$

Se calculó el momento flector máximo M_{max} producido por la fuerza resultante ubicada justo a la longitud total L_T .

$$M_{max} = F \cdot L = F_r \cdot L_T$$

$$M_{max} = 3501.413 \cdot 120 \text{ mm} = 420169 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Ahora el esfuerzo por flexión ¹¹ quedaría de la siguiente manera

$$\sigma_{f,max} = \frac{M_{max}c}{I} = \frac{420169 \text{ (N} \cdot \text{mm)} \cdot 12.5 \text{ (mm)}}{19174.759 \text{ (mm}^4\text{)}}$$

$$\sigma_{f,max} = 273.907 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Se realizó la misma comparación que en compresión con el factor de seguridad:

$$N = \frac{\sigma_y}{\sigma_{f,max}} = \frac{770 \text{ Mpa}}{273.907}$$

¹⁰ HIBBELER, Op. cit., pag. 61

¹¹ HIBBELER, Op. cit., pag. 61

$$N = 2.811 > 2$$

Como N es mayor al N propuesto al principio de la sección, se concluyó que la barra no fallaría por flexión.

4.1.5.3 Torsión. Para el análisis de torsión se utilizaron las ecuaciones de HIBELLER¹² se calculó el torque a partir de la fuerza de corte F_c y el radio de aplicación corresponde a la distancia desde el centro al punto mas alejado de la herramienta.

$$T = F \cdot d = F_c \cdot \frac{D}{2}$$

$$T = 2869.950 \text{ N} \cdot \frac{40 \text{ mm}}{2}$$

$$T = 57399 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

El momento polar de inercia de la herramienta corresponde al de una barra cilíndrica y se sigue calculando con el diámetro menor de la herramienta debido a que aumenta al máximo el esfuerzo por torsión y permite calcular en el escenario con más torque.

$$J = \frac{\pi \cdot d^4}{32} = \frac{\pi \cdot (25 \text{ mm})^4}{32}$$

$$J = 38349.519 \text{ mm}^4$$

¹² HIBBELER, Op. cit., pag. 61

Ahora se calcula el esfuerzo cortante máximo de torsión

$$\tau_{max} = \frac{T \cdot c}{J} = \frac{57399 \text{ N} \cdot \text{mm} \cdot 12.5 \text{ mm}}{38349.519 \text{ mm}^4}$$

$$\tau_{max} = 18.709$$

Para evaluar la seguridad del diseño frente a la torsión, se comparó este esfuerzo con el esfuerzo cortante admisible del material. Considerando un criterio conservador de falla por cortante basado en el criterio de Tresca¹³, el esfuerzo cortante de fluencia se aproxima como:

$$\tau_y = \frac{\sigma_y}{2}$$

donde el límite de fluencia del material es $\sigma_y = 770 \text{ Mpa}$. Por lo tanto:

$$\tau_y = \frac{770 \text{ Mpa}}{2} = 385 \text{ Mpa}$$

Finalmente, el factor de seguridad frente a torsión se obtiene como:

$$N = \frac{\tau_y}{\tau_{max}} = \frac{385 \text{ Mpa}}{18.709 \text{ Mpa}}$$

$$N = 20.58$$

¹³ HIBBELER, Op. cit., pag. 61

Este valor indica que la herramienta presenta un margen de seguridad ampliamente suficiente frente a esfuerzos de torsión, evidenciando que este modo de carga no resulta crítico bajo las condiciones de operación analizadas.

4.1.5.4 Fatiga. Debido a que la herramienta es una pieza la cual va a estar sometida constantemente a cortes, esto implica que su estructura debe aguantar a la fatiga; para esto se va a comprobar la resistencia de esta herramienta a una cantidad de 10^6 ciclos, por esto debemos calcular primero los esfuerzos medios y esfuerzos alternantes¹⁴, así como los torque medios y alternantes.

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \text{ y } \sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$$

Sabiendo que la herramienta tiene un esfuerzo mínimo de 0 que es cuando no está cortando y un esfuerzo máximo de flexión $\sigma_{max} = 273.907 \text{ Mpa}$, se calculan los esfuerzos medios y alternantes.

$$\sigma_m = \frac{273.907 \text{ Mpa} + 0}{2} \text{ y } \sigma_a = \frac{273.907 \text{ Mpa} - 0}{2}$$

$$\sigma_m = \sigma_a = 136.953 \text{ Mpa}$$

Ahora se realiza el proceso análogo para calcular los torques debido a la fuerza de corte que provoca torsión.

$$\tau_m = \frac{\tau_{max} + \tau_{min}}{2} \text{ y } \tau_a = \frac{\tau_{max} - \tau_{min}}{2}$$

¹⁴ HIBBELER, Op. cit., pag. 61

En este caso también tenemos un torque mínimo de 0 y un esfuerzo cortante máximo de $\tau_{max} = 18.709 \text{ Mpa}$, con esto calculamos los cortantes.

$$\tau_m = \frac{18.709 \text{ Mpa} + 0}{2} \text{ y } \tau_a = \frac{18.709 \text{ Mpa} - 0}{2}$$

$$\tau_m = \tau_a = 9.354 \text{ Mpa}$$

Ahora recurrimos a la teoría de esfuerzos equivalentes de Von Mises¹⁵ para fatiga calculando los esfuerzos equivalentes.

$$\sigma_{a,eq} = \sqrt{\sigma_a^2 + 3\tau_a^2} = \sqrt{136.953 \text{ Mpa}^2 + 3(9.354 \text{ Mpa})^2}$$

$$\sigma_{m,eq} = \sqrt{(\sigma_m + \sigma_{ax})^2 + 3\tau_m^2} = \sqrt{(136.953 + 1.250)^2 + 3(9.354)^2}$$

$$\sigma_{a,eq} = 137.907 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_{m,eq} = 138.149 \text{ Mpa}$$

Se define la ecuación con la que se va a validar la resistencia¹⁶

$$\frac{\sigma_{a,eq}}{S_e} + \frac{\sigma_{m,eq}}{S_{ut}} = \frac{1}{N}$$

La resistencia ultima se define como $S_{ut} = 1100 \text{ Mpa}$ para nuestro acero y se calcula el límite de fatiga corregido.

$$S_e = S_e' \cdot K_a \cdot K_b \cdot K_c \cdot K_d \cdot K_e$$

¹⁵ HIBBELER, Op. cit., pag. 61

¹⁶ Ibit

Primero se calcula el límite de resistencia a la fatiga sin corregir

$$S'_e = 0.5 \cdot S_{ut} = 0.5 \cdot 1100 \text{ Mpa}$$

$$S'_e = 550 \text{ Mpa}$$

Ahora empezamos a calcular los factores de corrección empezando por el acabado superficial para mecanizado.

$$K_a = 4.51 \cdot S_{ut}^{-0.265} = 4.51 \cdot (1100)^{-0.265}$$

$$K_a = 0.705$$

Factor de corrección por tamaño.

$$K_b = \left(\frac{d}{7.62}\right)^{-0.107} = \left(\frac{25}{7.62}\right)^{-0.107}$$

$$K_b = 0.880$$

Tipo de carga flexión.

$$K_c = 1.0$$

Efecto de la temperatura no tiene influencia.

$$K_d = 1.0$$

Factor de confiabilidad al 99%.

$$K_e = 0.814$$

Con estos valores se calcula el límite de fatiga corregido.

$$S_e = 550 \text{ Mpa} \cdot 0.705 \cdot 0.880 \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot 0.814$$

$$S_e = 277.753$$

Ahora, sustituyendo y despejando el factor de seguridad obtenemos

$$\frac{137.907 \text{ Mpa}}{277.753 \text{ Mpa}} + \frac{138.149 \text{ Mpa}}{1100 \text{ Mpa}} = \frac{1}{N}$$

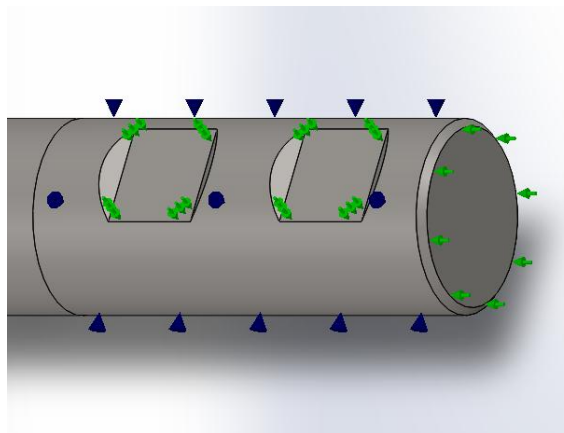
$$N = 1.607$$

A partir del análisis de fatiga realizado mediante el criterio de Goodman¹⁷ modificado, se obtuvo un factor de seguridad a fatiga del orden de 1.6, valor que se considera técnicamente válido para herramientas de corte sometidas a cargas cíclicas a altas revoluciones. Este resultado evidencia que la herramienta presenta una adecuada resistencia estructural frente a los esfuerzos combinados de flexión, torsión y carga axial, sin que se prevea una falla prematura por fatiga bajo las condiciones de operación analizadas. En consecuencia, se justifica la continuación del estudio mediante simulaciones numéricas, con el fin de validar el comportamiento mecánico de la herramienta y analizar la distribución de esfuerzos bajo un modelo más detallado.

¹⁷ HIBBELER, Op. cit., pag. 61

3.1.5.5 Simulaciones. Para finalizar la comprobación estructural de la herramienta, se realizaron análisis estático y modal en SolidWorks Simulation con el objetivo de evaluar el desempeño de la cola de milano bajo condiciones reales de operación. Las simulaciones se aplicaron al modelo con un ángulo de 55°, el cual se considera el caso más crítico debido a la mayor remoción de material, empleando las cargas previamente calculadas, el material seleccionado y las condiciones de sujeción definidas. Como primer paso, se llevó a cabo la preparación del modelo, para lo cual se modeló el inserto a partir de las dimensiones obtenidas de la ficha técnica del fabricante, garantizando una representación geométrica adecuada del conjunto. Posteriormente, se completó el ensamblaje, omitiendo tanto la rosca como los tornillos, ya que su inclusión no tendría una influencia significativa en los resultados de la simulación, pero sí incrementaría de manera considerable el tamaño de la malla y el costo computacional del análisis.

Figura 22. Condiciones de sujeción

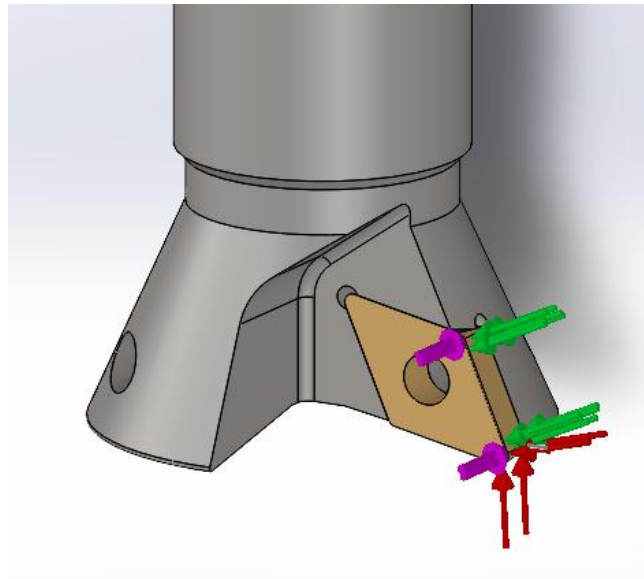


Con el ensamblaje definido, se procedió a aplicar las condiciones de sujeción, teniendo en cuenta que la herramienta se encuentra prácticamente empotrada en el cono BT-40, por lo que esta región debía comportarse como casi fija. Para representar adecuadamente esta condición, se definió una sujeción tipo rodamiento en el mango de la herramienta hasta la región de contacto con el interior del cono, una sujeción tipo rodillo en la parte superior de la herramienta para evitar el desplazamiento axial cuando se aplican fuerzas a lo largo de su eje de giro, y una sujeción tipo rodillo en las caras donde

los tornillos prisioneros hacen contacto con la herramienta. Esta última sujeción resulta especialmente relevante, ya que permite la rotación del conjunto y puede dar lugar a la aparición de concentraciones de esfuerzo asociadas a la torsión.

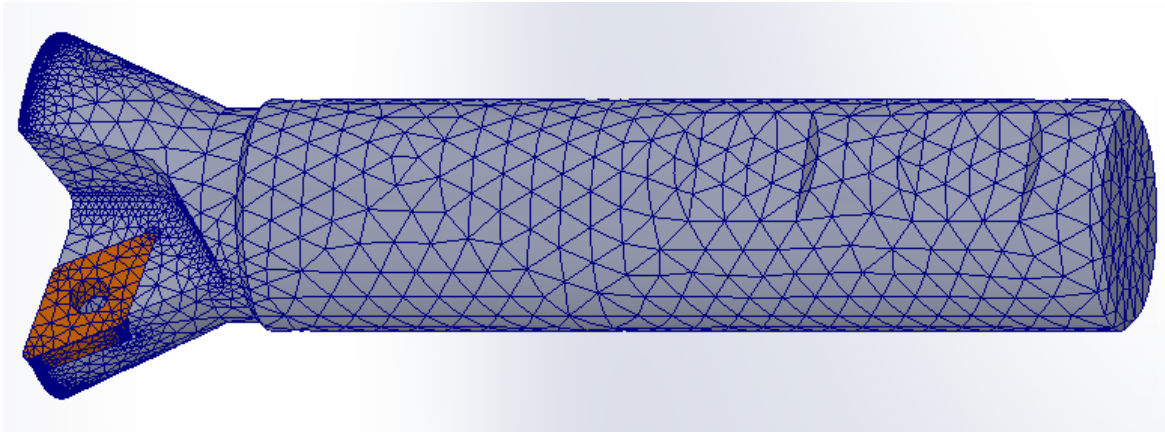
Posteriormente, se implementaron las cargas correspondientes al proceso de mecanizado, las cuales se aplicaron directamente sobre las caras y en las direcciones que representan de manera más fiel las condiciones reales de trabajo, utilizando los valores previamente calculados. En particular, se tuvo en cuenta que la fuerza de avance actúa de forma perpendicular a la línea del filo de corte, lo que permite una representación más precisa del comportamiento mecánico de la herramienta durante la operación.

Figura 23. Fuerzas filo de corte



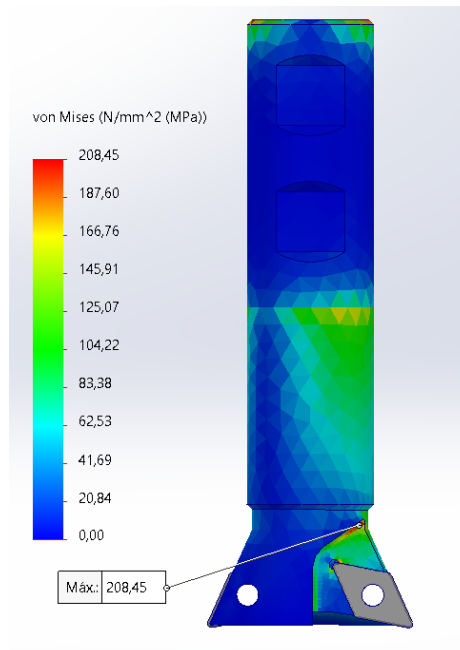
Finalmente, se generó una malla (Figura 24) automática configurada con el mayor nivel de calidad posible, con el fin de identificar de manera precisa las zonas donde se presentan los máximos esfuerzos y poder diferenciar entre regiones sin riesgo y zonas con mayor probabilidad de falla. La malla fue refinada cuidadosamente para evitar que la presencia de aristas o geometrías agudas afectara la estabilidad numérica de los cálculos y la correcta interpretación de los resultados obtenidos.

Figura 24. Malla



- **Simulación estática.** Con la configuración previamente definida, se ejecutó la simulación estática, obteniéndose los resultados que se muestran a continuación.

Figura 25. Simulación estática

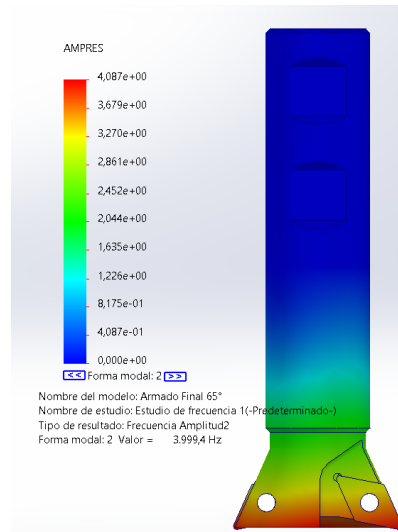


Como se observa, el punto donde se presenta el esfuerzo máximo corresponde a una región asociada a un concentrador de esfuerzos originado por la geometría local. En particular, este punto se ubica en el canal de refrigeración, el cual presenta una geometría redondeada que, además de facilitar el deslizamiento de la viruta sobre la herramienta, contribuye a reducir de manera considerable la severidad del concentrador de esfuerzos en comparación con una geometría de aristas vivas. El valor máximo de esfuerzo obtenido fue de 208,45 MPa, el cual, a pesar de ser el mayor registrado en el modelo, no resulta crítico al compararse con la resistencia del material, cuyo límite de fluencia es de 770 MPa, evidenciando que la herramienta opera dentro de un régimen seguro desde el punto de vista estático.

- **Simulación modal.** Con el fin de evaluar el comportamiento dinámico de la herramienta y descartar la aparición de fenómenos de resonancia durante el proceso de mecanizado, se realizó un análisis modal en SolidWorks Simulation. Para este estudio se utilizó el mismo modelo geométrico, material y condiciones de sujeción previamente definidos en el análisis estático, garantizando coherencia entre los distintos estudios realizados. La herramienta fue considerada empotrada en el cono BT-40, representando de manera adecuada las condiciones reales de montaje durante la operación.

El análisis modal se configuró para obtener la frecuencia natural dominante de la herramienta, así como su correspondiente forma modal. Las deformaciones obtenidas en este tipo de análisis corresponden a formas modales normalizadas, por lo que no representan desplazamientos reales, sino que permiten identificar las regiones con mayor participación dinámica y el tipo de vibración predominante. En la Figura 26 se puede observar la frecuencia natural que presenta la pieza, obtenida a partir del análisis realizado. Adicionalmente, se consideró el número de dientes de la herramienta para relacionar la frecuencia natural obtenida con la frecuencia de excitación generada durante el mecanizado, asociada al paso de los dientes.

Figura 26. Simulación modal



3.2 CONSTRUCCIÓN

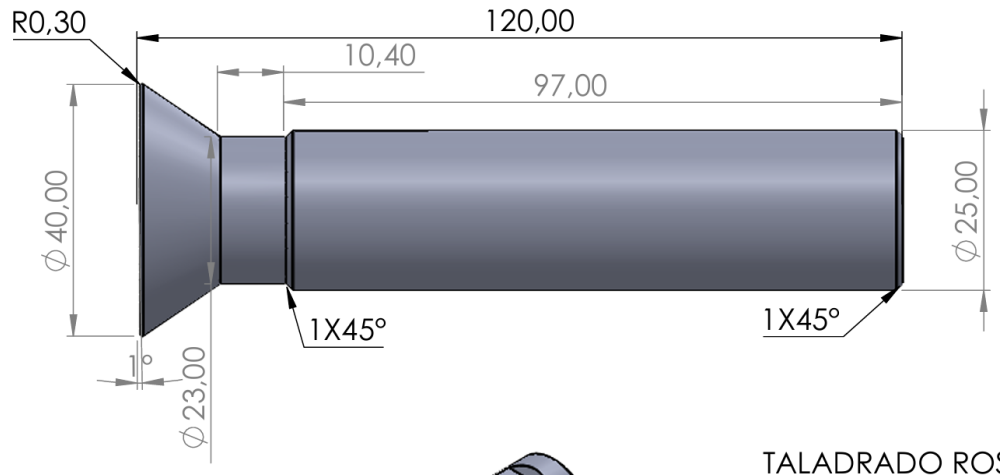
Después de haber analizado la resistencia estructural de la herramienta, se procedió a la fase de construcción, en la cual se materializaron las geometrías propuestas en los planos finales. Para llevar a cabo esta etapa, se definieron inicialmente los procesos de manufactura requeridos por cada pieza y se evaluaron las alternativas de fabricación, considerando tanto la posibilidad de realizarla de manera manual como la opción de externalizarla en un taller especializado equipado con torno de cuatro ejes.

3.2.1 Procesos de manufactura. Para obtener la geometría final propuesta en los planos, se partió de una pieza en bruto. Para ello, se adquirieron tres barras del material seleccionado, acero AISI 4140, las cuales no contaban con ningún tratamiento térmico, lo que hizo posible el proceso de mecanizado. Estas barras tenían un diámetro de 1 3/4" y una longitud de 120 mm.

Posteriormente, se elaboró un plano que detallaba una serie de pasos mediante los cuales, a través de distintos procesos de mecanizado, se alcanzaría la geometría final

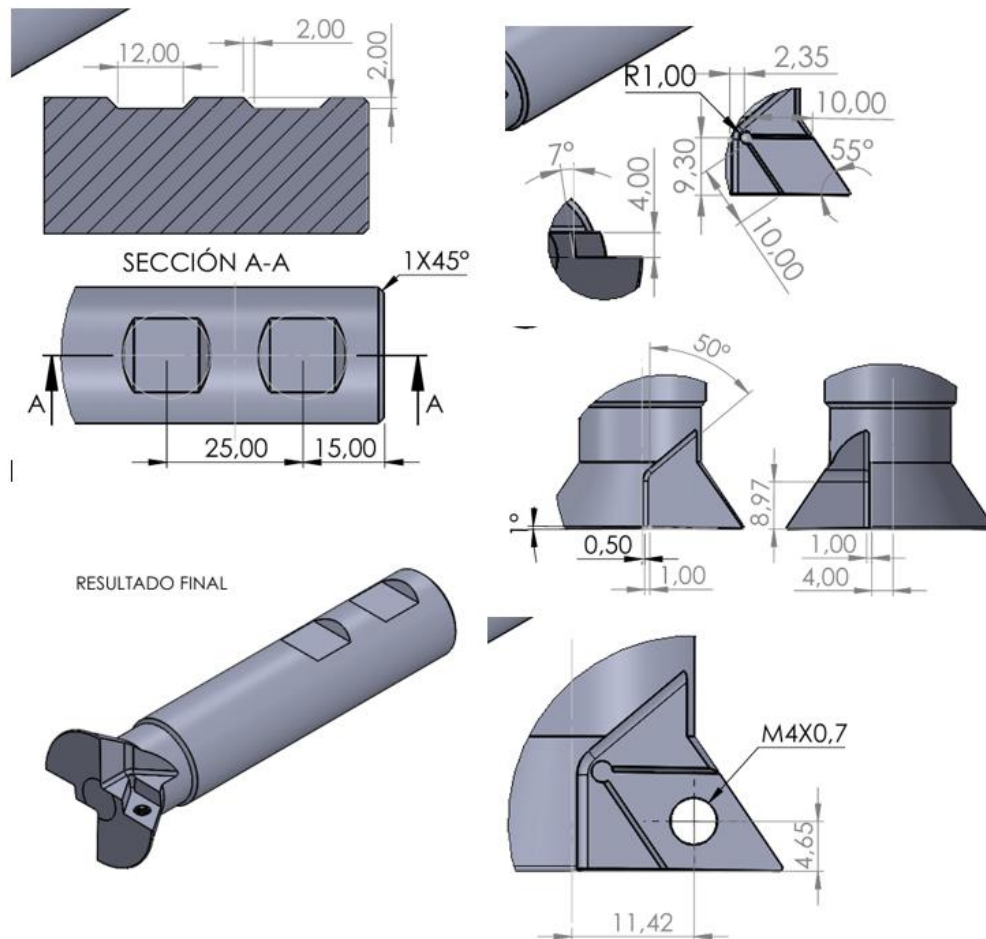
deseada; dicho documento se presenta en el Anexo C, donde el primer paso consistió en un torneado que permitió obtener las dimensiones mostradas en la Figura 27.

Figura 27. Dimensiones finales



Con las tres piezas una vez finalizada la etapa de torneado, se procede al desarrollo de los pasos tres, cuatro y cinco del proceso de manufactura, correspondientes a las operaciones de fresado. En estas etapas se mecanizan las cavidades destinadas al alojamiento del inserto y el espacio para el tornillo de sujeción; adicionalmente, se realizan los canales de evacuación de viruta, los cuales permiten la correcta salida del material durante el mecanizado, evitando acumulaciones y posibles defectos en la operación. Asimismo, se mecanizan las cavidades donde encajan los prisioneros del cono BT-40, garantizando un acople preciso y seguro del conjunto a la fresadora. Los resultados correspondientes a los pasos dos, tres, cuatro y cinco se presentan a continuación.

Figura 28. Pasos 2-3-4-5 proceso mecanizado



En esta etapa se definió un proceso fundamental: la pieza debía girarse 180° sobre su propio eje para realizar el mecanizado correspondiente a la cavidad del segundo inserto. La geometría resultante debía ser idéntica a la anterior, pero desfasada exactamente 180°. Se consideraron dos alternativas para lograrlo: emplear un diferencial mecánico o utilizar un torno de cuatro ejes.

El diferencial mecánico es un accesorio empleado en fresadoras o máquinas de taller para girar la pieza de trabajo un ángulo determinado y preciso, permitiendo dividir la circunferencia en un número exacto de partes, por ejemplo, para cortar engranajes, cavidades equidistantes, ranuras, taladros etc. Como se puede ver en la figura 29, este

permite indexar con precisión el trabajo mediante un plato de agujeros, una manivela y un tren de tornillo sin fin, de modo que cada movimiento de la manivela se traduce en una rotación controlada del husillo que sujeta la pieza (John F's Workshop)¹⁸. En este proyecto, emplear el diferencial mecánico habría implicado una

reducción significativa en los costos, debido a que era un dispositivo disponible en la Universidad Industrial de Santander. Sin embargo, al ser un sistema puramente mecánico, no estaba exento de errores. El uso de esta máquina suponía el riesgo de generar pequeñas imperfecciones geométricas, las cuales podían provocar que la herramienta no cortara de manera uniforme, ocasionando un desgaste desigual en los filos, una reducción en la vida útil y, en el peor de los casos, una falla estructural irreversible en la herramienta.

Figura 29. Diferencial mecánico



Fuente: TR PRECISION MACHINING ASTURIAS. Plato Divisor Semiuniversal BS0 - Una Opcion A Tener en Cuenta. [video]. YouTube, 2024. [consultado 17, marzo, 2025]. Disponible en: <https://youtu.be/pwjKijago3c>

¹⁸ SAUNDERS, John S. Dividing head – dividing the circle [en línea]. [Consultado el 16 de febrero de 2026]. Disponible en: <https://johnfsworkshop.org/>

Por su parte, el torno de cuatro ejes CNC como el de la figura 30, es una máquina herramienta de control numérico computarizado que permite mecanizar piezas con una alta precisión, controlando simultáneamente el movimiento de los ejes X, Z, Y y C. Este tipo de torno permite realizar operaciones complejas y simétricas sin necesidad de reposicionar la pieza manualmente, garantizando uniformidad y precisión dimensional (Hernández & Torres, 2020)¹⁹. Optar por esta alternativa habría permitido eliminar los problemas de simetría, ya que la herramienta podría mecanizar ambas cavidades con gran exactitud, asegurando así un corte óptimo y equilibrado entre los filos. El inconveniente principal de esta opción radicaba en el costo operativo, pues esta máquina no se encontraba disponible en los laboratorios de la universidad, haciendo necesario tercerizar el proceso en un taller especializado, lo que incrementaría el presupuesto total del proyecto.

Figura 30. Torno 4 ejes



Fuente: RUNSOM PRECISION. Guía de mecanizado CNC de 4 ejes. [en línea]. China: Ransom Precision Co., Ltd., 2024. [consultado 1, marzo, 2026]. Disponible en: <https://www.ransom.com/es/technology/guide-to-4-axis-cnc-machining/>

¹⁹ HERNÁNDEZ, Roberto y TORRES, Manuel. Procesos de mecanizado avanzado. Bogotá: Editorial Técnica, 2020. 250 p.

Finalmente, una vez obtenida la geometría final, se planificó la aplicación de un tratamiento térmico de temple y revenido, por ser la opción más sencilla, económica y eficiente. Este proceso se programó para realizarse internamente con los equipos adecuados en la universidad.

3.2.2 Alternativas. Una vez definidos los procesos, se evaluó la factibilidad de manufacturar las piezas íntegramente en la universidad mediante el centro de mecanizado CNC, frente a la opción de externalizar servicios de tornos y fresadoras especializadas. En esta decisión, el factor económico fue determinante. Si bien la contratación externa implicaba costos elevados por hora de operación y mano de obra calificada, la fabricación interna exigía la adquisición de herramientas de corte específicas para el torno institucional, lo cual equiparaba o incluso superaba el presupuesto externo. Asimismo, se consideró que la curva de aprendizaje y la limitada experiencia práctica en procesos complejos aumentaban el riesgo de errores críticos durante la fabricación.

También se tuvo en cuenta el acabado superficial de las piezas, puesto que en un centro de mecanizado se podía obtener una mayor precisión gracias al uso de tornos de cuatro ejes. En contraste, en la universidad fue necesario adaptar un diferencial a la fresadora para cumplir con el proceso de fresado descrito anteriormente; sin embargo, esta alternativa no ofrecía la misma calidad de acabado.

Dado que ningún criterio predominó de manera significativa y las diferencias entre las opciones no fueron sustanciales, se decidió realizar un primer intento de fabricación empleando las herramientas especializadas disponibles en el torno de la universidad.

3.2.3 Intento 1. Para el primer intento de fabricación, se optó por realizar una prueba utilizando un material de menor dureza que el acero AISI 4140, el cual se emplearía posteriormente en la manufactura final de las herramientas. Esta decisión tuvo como propósito verificar de manera segura el correcto funcionamiento de los programas CNC y evaluar la durabilidad de las herramientas especializadas, minimizando el riesgo de daños en materiales de alto costo. Adicionalmente, se buscó realizar los ajustes iniciales sobre una pieza sin valor comercial, de modo que, en caso de presentarse un fallo durante el proceso, no se comprometiera la barra de AISI 4140.

En el Anexo D se presentan los programas CNC utilizados durante los ensayos experimentales. En particular, se incluye el código correspondiente al mecanizado de una de las cavidades destinadas al alojamiento del inserto de carburo de tungsteno, el cual se muestra a continuación.

Para este proceso de mecanizado se emplearon dos herramientas: una de 2 mm de diámetro para las operaciones de desbaste y otra de 1 mm para las operaciones de acabado. Las herramientas seleccionadas fueron 2,0 ENDMILL 4FL SQ TA y la 1,5 ENDMILL 4FL SQ TA y una vez finalizada la ejecución del programa inicial, se observaron rebabas y pequeñas imperfecciones en la superficie de la herramienta, evidenciando la necesidad de ajustar tanto los parámetros de corte como las trayectorias generadas en el software de control numérico. Estos defectos se muestran en la Figura 31

Figura 31. Primer mecanizado realizado en la UIS



Posteriormente, se modificaron las condiciones de corte, principalmente la velocidad de avance, la profundidad de pasada y el tiempo de permanencia en las zonas críticas, obteniéndose un programa optimizado con trayectorias corregidas. Dichas correcciones se realizaron directamente sobre el código, el cual fue ajustado y validado durante el proceso de mecanizado, sin recurrir a simulaciones previas.

Con el programa corregido se obtuvo un resultado notablemente superior, evidenciado en la reducción significativa de las rebabas y en la mejora del acabado superficial. Al verificar el correcto desempeño del mecanizado, se procedió a ejecutar la siguiente etapa del proceso, correspondiente a la generación de la cavidad donde descansaría el inserto, asegurando la geometría y las dimensiones requeridas.

Figura 32. Resultado final cavidad



Aun cuando se obtuvieron resultados favorables tras la modificación de las condiciones de corte, se observó que el material empleado, al ser más blando que el AISI 4140, generó un desgaste acelerado en las herramientas de corte. Durante el proceso de mecanizado se utilizaron dos herramientas para fabricar aproximadamente el 40 % de dos cavidades, quedando ambas completamente inutilizables. Al inspeccionarlas, se evidenció que una presentó fractura y la otra un desgaste considerable debido a la pérdida progresiva del filo, lo cual ocasionó un deterioro gradual del acabado superficial con cada pasada de mecanizado.

A partir de este comportamiento, se realizó una estimación del consumo de herramientas requerido para completar una cavidad. Considerando que dos herramientas permitieron mecanizar aproximadamente el 40 % de dos cavidades, se estimó un rendimiento aproximado de 0,4 cavidades por herramienta, lo que equivale a un consumo cercano a 2,5 herramientas por cavidad. Este valor permitió proyectar el consumo total de herramientas necesario para la fabricación del conjunto de cavidades consideradas en el estudio.

Para un total de seis cavidades, se requirió un consumo estimado de aproximadamente 15 herramientas de corte. Teniendo en cuenta un costo unitario aproximado de 100.000 COP por herramienta, el costo total asociado exclusivamente al consumo de herramientas de corte se estimó en un valor cercano a 1.500.000 COP. Este análisis permitió dimensionar el impacto económico del desgaste de herramienta dentro del proceso de mecanizado evaluado.

Teniendo ya un aproximado de los costos asociados al consumo de herramientas, y sin considerar procesos adicionales como el taladrado, el cual incrementaría aún más el valor del mecanizado al interior de la universidad debido a la falta de la herramienta correspondiente, se procedió a indagar en centros de mecanizado externos. Como resultado de este análisis, se cotizó una alternativa cuyo costo resultó inferior incluso al valor de las herramientas necesarias para ejecutar el proceso internamente.

Dado que el costo de realizar el mecanizado dentro de la universidad y el de ejecutarlo en un centro de mecanizado externo no presentó una diferencia significativa, se identificó que la alternativa externa representaba una opción viable desde el punto de vista económico y operativo. Adicionalmente, esta decisión se alineó con el enfoque del presente proyecto de grado, orientado hacia las pequeñas y medianas industrias del área metropolitana de Bucaramanga, las cuales, en su mayoría, cuentan con centros de mecanizado propios y herramientas especializadas que pueden emplearse en este tipo de procesos. Esta condición permite reducir de manera considerable el costo final de la herramienta, sin necesidad de recurrir a servicios externos adicionales.

3.2.4 Intento 2. Para esta modalidad de fabricación no fue necesario realizar pruebas preliminares, ya que se contó con la experiencia técnica y la capacidad operativa del centro de mecanizado encargado del proceso, lo cual garantizó el correcto desarrollo de todas las etapas de manufactura. En consecuencia, se procedió directamente al torneado de las piezas, etapa en la cual se removió una cantidad significativa de material mediante el uso de un torno CNC. Como resultado de este proceso, se obtuvo una pieza con la geometría externa definida, correspondiente a la etapa inicial del procedimiento de fabricación, la cual se muestra en la figura siguiente.

Figura 33. Mecanizado torno



Posteriormente, la primera pieza fue asegurada de manera firme en el cuarto eje de la fresadora CNC, con el fin de evitar cualquier desplazamiento durante el mecanizado que pudiera generar imperfecciones geométricas. Este montaje resultó sencillo debido a la

forma cilíndrica del mango de la pieza, lo que permitió una sujeción adecuada y estable. A continuación, se realizó el mecanizado de las cavidades destinadas al alojamiento del inserto, así como de los canales de evacuación de viruta, cuya función es evitar interferencias durante el proceso de corte. De igual manera, se efectuó el roscado correspondiente para los tornillos encargados de asegurar el inserto al portaherramientas.

Gracias al magazine de herramientas disponible en el centro de mecanizado, fue posible emplear cinco herramientas diferentes, cada una destinada a una operación específica. Esta estrategia permitió ejecutar el mecanizado en una sola sujeción, garantizando la precisión geométrica requerida y evitando posibles desviaciones dimensionales que podrían presentarse si la pieza fuera liberada y fijada nuevamente, incluso con variaciones del orden de milímetros. Una vez finalizadas las operaciones de mecanizado y roscado, la pieza presentó la geometría mostrada en la Figura 34, a excepción de las ranuras de acople, las cuales serían mecanizadas posteriormente en los laboratorios de la universidad. Seguidamente, sin modificar la sujeción, el cuarto eje fue utilizado para rotar la pieza exactamente 180° , lo que permitió mecanizar el lado opuesto con la misma geometría y dimensiones. De esta manera, se aseguró que ambos insertos trabajaran de forma uniforme, removiendo la misma cantidad de material y bajo condiciones equivalentes durante la operación de corte.

Este procedimiento se repitió para las dos piezas restantes, obteniéndose como resultado componentes que cumplen con las especificaciones establecidas en el plano, el cual se presenta en la Figura 28.

Figura 34. Forma final herramienta cola de milano



3.2.4.1 Ranurado Universidad. Debido a que las operaciones de torneado y mecanizado de cavidades no podían realizarse en la universidad, las piezas fueron entregadas con una geometría parcial, lo que permitió completar su fabricación utilizando las máquinas disponibles en los laboratorios institucionales. En esta etapa final, se llevó a cabo el ranurado necesario para que la herramienta pudiera ser utilizada junto con el cono BT-40, permitiendo que los prisioneros aseguraran correctamente el portaherramientas a la máquina y evitando cualquier deslizamiento o giro durante el proceso de mecanizado.

Para esta operación se desarrolló el programa CNC correspondiente, el cual se presenta en el Anexo E, y se empleó una herramienta tipo escariador de 16 mm de diámetro.

Mediante este proceso se mecanizaron las ranuras en las tres piezas, obteniéndose como resultado final un componente completamente terminado, con la geometría esperada y apto para su uso en las pruebas posteriores.

Figura 35. Mecanizado ranurado



Finalmente, se verificó la calidad dimensional de las piezas mediante el uso de un calibrador, midiendo el diámetro del mango e insertando cada pieza en el cono BT-40 para comprobar su correcto acople. Se evidenció que el ajuste obtenido corresponde a un ajuste tipo H, garantizando una adecuada sujeción y alineación durante la operación. La geometría final del portaherramientas se presenta en la Figura 36.

Figura 36. Geometría final cola de milano



3.2.4.2 Tratamiento Térmico. Una vez obtenida la geometría final de la pieza, en la universidad se procedió a realizar el tratamiento térmico, cuyo objetivo fue mejorar las propiedades mecánicas del material, específicamente la dureza, la rigidez y la resistencia al desgaste, manteniendo al mismo tiempo una adecuada tenacidad. Este proceso se realizó al finalizar todas las operaciones de mecanizado, dado que el acero AISI 4140, tras ser tratado térmicamente, adquiere una dureza elevada que dificulta considerablemente su mecanizado mediante procesos convencionales.

El tratamiento térmico aplicado se llevó a cabo en el horno (Figura 37) ubicado en el taller de la escuela siguiendo una secuencia controlada de normalizado, temple y revenido, la cual permitió obtener un equilibrio adecuado entre resistencia mecánica y estabilidad dimensional. Las etapas del proceso se describen a continuación.

Figura 37. Horno localizado en el taller de la UIS



- **Precautado.** En una primera etapa, las piezas fueron sometidas a un proceso de precalentamiento, calentándose de manera progresiva desde temperatura ambiente hasta $650\text{ }^{\circ}\text{C}$, temperatura que se alcanzó de forma controlada, tal como se observa en la Figura 38. Este nivel térmico se mantuvo durante 30 minutos con el propósito de homogeneizar la temperatura en toda la sección de la pieza y aliviar las tensiones internas acumuladas durante las operaciones previas de mecanizado. La selección de esta temperatura permitió reducir los gradientes térmicos sin inducir transformaciones microestructurales significativas, disminuyendo así el riesgo de deformaciones, agrietamientos o fallas durante el calentamiento posterior. Un precalentamiento insuficiente o inexistente habría incrementado la probabilidad de choques térmicos, mientras que temperaturas excesivas en esta etapa podrían haber afectado negativamente la estabilidad dimensional del material.

Figura 38. Temperatura precalentada



- **Templado.** Posteriormente, el calentamiento continuó hasta alcanzar los 830 °C, temperatura correspondiente al rango de austenización del acero AISI 4140. Esta temperatura se mantuvo durante 20 minutos adicionales con el fin de asegurar la completa transformación de la microestructura a austenita y permitir una adecuada disolución de los carburos presentes en el material. La correcta austenización es fundamental para garantizar una transformación martensítica eficiente durante el enfriamiento rápido. Una vez finalizado el tiempo de mantenimiento, las piezas fueron enfriadas de manera brusca mediante inmersión en agua a 40 °C, realizando así el proceso de temple.

El uso de agua como medio de enfriamiento se seleccionó debido a su mayor severidad en comparación con el aceite, lo cual permitió alcanzar una velocidad de enfriamiento suficientemente alta para asegurar la transformación completa de la austenita en martensita en el acero AISI 4140. Esta condición fue especialmente relevante considerando la geometría y el espesor de las piezas, así como el

requerimiento de obtener una elevada dureza y resistencia al desgaste en la herramienta. El empleo de aceite como medio de temple habría generado una velocidad de enfriamiento menor, lo que podría haber dado lugar a la formación parcial de bainita o perlita, reduciendo la dureza final del material.

Como consecuencia del enfriamiento brusco en agua, las piezas presentaron una superficie con apariencia grisácea y la formación de cascarilla superficial, producto de la oxidación generada a las altas temperaturas alcanzadas, tal como se aprecia en la Figura 39. Si bien el temple en agua implica un mayor riesgo de tensiones internas y deformaciones, este efecto fue posteriormente mitigado mediante el proceso de revenido, el cual permitió aliviar dichas tensiones y mejorar la tenacidad del material sin comprometer de manera significativa la dureza obtenida.

Figura 39. Estado de las herramientas posterior al enfriamiento en agua



- **Revenido.** Poco después del proceso de temple, se limpiaron las piezas y se llevó a cabo el revenido con el fin de reducir la fragilidad inducida por la formación de martensita y aliviar las tensiones internas generadas durante el enfriamiento brusco. Para ello, se permitió que la temperatura del horno descendiera hasta 240 °C, manteniendo posteriormente esta temperatura durante un periodo de 2 horas. Finalizado este tiempo, las piezas fueron retiradas del horno y enfriadas al aire libre.

Tras el revenido, las piezas presentaron una apariencia superficial oscura con tonalidades azuladas, como se observa en la Figura 40. Estas coloraciones corresponden a los denominados colores de revenido y son indicativas de que el material alcanzó el rango de temperaturas propio de un revenido bajo, adecuado para aplicaciones que requieren alta dureza y resistencia al desgaste sin comprometer de manera significativa la tenacidad del material.

Figura 40. Estado final cola de milano finalizado el tratamiento térmico



3.3 PRUEBAS

Con las tres herramientas construidas, se procedió a la fase de pruebas, en la cual las herramientas diseñadas y fabricadas debían ser comparadas con una herramienta comercial adquirida a un proveedor. El ensayo consistió en realizar un mecanizado empleando el mismo código de programación, los mismos insertos de carburo de tungsteno y el mismo material de trabajo, con el fin de garantizar condiciones equivalentes. Finalmente, los criterios de evaluación establecidos fueron los costos de fabricación y el acabado superficial de la pieza mecanizada por cada herramienta.

3.3.1 Programación de prueba. En cuanto al programa de control numérico, se desarrolló un código sencillo (Anexo F) cuyo objetivo fue realizar una comparación directa entre una herramienta comercial adquirida a un proveedor y la herramienta diseñada y construida en el presente proyecto. El programa consistió en posicionar la herramienta, descenderla hasta una profundidad tal que los insertos realizaran el corte a lo largo de toda su superficie activa, recorrer una distancia de 200 mm para efectuar la remoción de material y, finalmente, retornar la herramienta a su posición inicial con el fin de realizar el cambio de herramienta y repetir el mismo proceso de mecanizado utilizando la herramienta diseñada. Para efectos del programa, se asignó la denominación T1 a la herramienta comercial y T2 a la herramienta diseñada y construida.

Para la obtención de los parámetros de corte empleados en estas pruebas, se calcularon la velocidad de giro y la velocidad de avance a partir de las expresiones correspondientes. Para ello, se definió un diámetro exterior de la herramienta de $D = 40 \text{ mm}$, un avance por diente de $F_x = 0,05 \text{ mm}$, valor recomendado para operaciones de desbaste con herramientas de carburo de tungsteno en aceros para moldes, y una velocidad de corte de $V_n = 90 \text{ m/min}$, considerada un valor conservador y adecuado para este tipo de material y herramienta.

La velocidad de giro se calculó mediante la siguiente expresión:

$$N = \frac{1000 \cdot V_c}{\pi \cdot D}$$

$$N = \frac{1000 \cdot 90}{\pi \cdot 40}$$

$$N = 716,197 \text{ RPM}$$

Posteriormente, la velocidad de avance se determinó a partir de la relación entre la velocidad de giro y el avance por diente, obteniéndose el siguiente valor:

$$F = N \cdot Z \cdot f_z$$

$$F = 716,197 \cdot 2 \cdot 0,05$$

$$F = 71,619 \text{ mm/min}$$

Finalmente, los valores calculados fueron redondeados con el fin de facilitar su programación en la máquina CNC, estableciéndose una velocidad de giro de 720 RPM y una velocidad de avance de 72 mm/min , parámetros que fueron utilizados durante la ejecución de las pruebas de mecanizado.

3.3.2 Herramienta comprada. Para la ejecución de las pruebas fue necesario contar con una herramienta de referencia con la cual comparar el rendimiento de la herramienta diseñada. Con el fin de garantizar una comparación equitativa, se optó por seleccionar una opción que presentara características lo más similares posible en cuanto a sus especificaciones. Para ello, se tuvieron en cuenta los siguientes criterios:

- Cono BT-40:

Debido a que las pruebas se realizaron en la maquina Leadwell V-20 de la universidad, se hizo necesario utilizar el mismo método de sujeción tanto para la herramienta construida como para la herramienta comercial, este método es a través del cono BT40

del cual se pueden ver sus dimensiones en la Figura 13. Se selecciono un portaherramientas que fuera compatible con este tipo de cono, esto quiere decir que debía contar con un diámetro de 25 mm, garantizando una correcta fijación. Además de esta medida para el mango, era necesario que el portaherramientas contara también con dos ranuras en el mango, esto debido a que aquí encajaban los dos prisioneros que garantizan una mejor fijación entre el cono y la herramienta.

- Diámetro de corte:

El diámetro de corte influye directamente en la cantidad de viruta removida y, por lo tanto, en las condiciones de mecanizado. Una variación en este parámetro impediría realizar una comparación justa entre las herramientas. Por ello, se seleccionó una herramienta con un diámetro exterior de 40 mm, asegurando condiciones de corte uniformes durante todas las pruebas.

- Uso de los mismos insertos:

El hecho de que la herramienta de comparación pudiera utilizar los mismos insertos empleados en la herramienta diseñada representó una ventaja económica y práctica. Esto permitió realizar todas las pruebas sin necesidad de adquirir insertos adicionales, manteniendo la uniformidad en el tipo de filo, tornillos y roscas utilizadas.

- Número de filos:

El número de filos influye significativamente en la calidad del acabado, el tiempo de mecanizado y el desgaste de la herramienta. Una herramienta de un solo filo resultaría más frágil y menos duradera, mientras que una con tres o más filos ofrecería un mejor rendimiento y mayor estabilidad. Por esta razón, este parámetro fue uno de los factores más determinantes en la selección de la herramienta de comparación.

- Ángulo de inclinación:

Para que las condiciones de corte fueran equivalentes, se buscó una herramienta cuyo ángulo de ataque estuviera dentro del rango de 55°, 60° o 65°, de manera que fuera comparable con las herramientas diseñadas y fabricadas en el presente proyecto.

Con las condiciones previamente definidas, se realizó una investigación para identificar la herramienta más adecuada con la cual comparar el desempeño de la herramienta desarrollada en este proyecto. Como resultado de dicho análisis, se determinó que la opción más apropiada corresponde a la herramienta de denominación YW55-DC11-40-20T2-160, cuyas especificaciones son las siguientes:

YW55: Ángulo de corte de 55°, lo cual permite una comparación directa con la geometría de la herramienta diseñada.

DC11: Indica que utiliza los mismos insertos que las herramientas construidas en este proyecto, garantizando uniformidad en las condiciones de corte.

40: Corresponde al diámetro de corte de la herramienta.

20T2: Representa el diámetro del mango (20 mm) y el número de filos (2).

160: Indica la longitud total de la herramienta en milímetros.

La herramienta YW55-DC11-40-20T2-160, mostrada en la Figura 41, fue seleccionada como referencia por cumplir con los criterios técnicos establecidos y por encontrarse

Figura 41. Herramienta comercial comprada dentro de un rango de precio bajo en comparación con otras herramientas de características similares. Esto permitió disponer de una opción económica y funcional, adecuada para las pruebas experimentales y coherente con los objetivos del proyecto. De este modo, la herramienta seleccionada representó una alternativa eficiente tanto desde el punto de vista técnico como económico.




ZINAF

Fresa de cola de milano 25mm-100mm 45 grados 60 grados 90 grados para DCMT07 DCMT11 VCMT11 serie inserto de carburo de tungsteno CNC

De - ZINAF Official Store (★ 5 | 5.000+ vendido(s))

\$494.509,00

2% de descuento extra

🔥 Compra 5 piezas y obtén -3% dto. >

Dimensiones: DC11-D40-C25-2T-160

DC07-D25-C16-2T-120	DC07-D25-C20-2T-120
DC07-D30-C20-3T-120	DC11-D40-C25-2T-160
DC11-D50-C32-3T-160	DC11-D60-C32-4T-160
DC11-D80-C32-5T-160	VC11-D40-C20-3T-160

Fuente: ALIEXPRESS. Fresa de cola de milano: herramienta de corte para mecanizado CNC. [en línea]. China: Alibaba Group, 2024. [consultado 17, marzo, 2025]. Disponible en: <https://es.aliexpress.com/i/1005006116876717.html>

Durante el proceso de adquisición de la herramienta de referencia se presentaron diversas dificultades que afectaron parcialmente la ejecución de las pruebas comparativas. En primer lugar, a pesar de haberse adquirido y pagado una herramienta con dos filos de corte, el producto recibido presentaba una configuración diferente, ya que contaba con tres filos, como se puede evidenciar en la Figura 42. Esta variación alteró las condiciones inicialmente planificadas, pues una herramienta con tres filos tiende a generar un corte más limpio y estable, reduciendo el esfuerzo sobre los insertos y mejorando la calidad superficial de la pieza. No obstante, se realizaron los ajustes necesarios en las pruebas experimentales para mantener la mayor objetividad posible en los resultados y garantizar la validez de las conclusiones obtenidas.

Figura 42. Herramienta de prueba



Adicionalmente, se identificó que la herramienta entregada no contaba con las ranuras especiales en el mango destinadas a los prisioneros del cono BT-40, como se puede ver en la Figura 42, esto dificultaba su correcta sujeción en el portaherramientas de la máquina Leadwell V-20, utilizada para la ejecución de las pruebas. Esta ausencia de ranuras impedía un acople adecuado, por lo que fue necesario recurrir al uso de pinzas de sujeción. Si bien este método permitió fijar la herramienta y realizar el mecanizado, no ofreció el mismo nivel de rigidez ni precisión que el sistema BT40. Aun así, esta solución temporal fue suficiente para llevar a cabo las pruebas de corte y obtener resultados comparativos válidos.

Por otro lado, otro inconveniente importante fue el tiempo de entrega de la herramienta, ya que este tipo de productos suele tener un plazo de entre 20 y 30 días. Este periodo resulta excesivo en entornos productivos donde se requieren herramientas especializadas de forma inmediata, y en los cuales las líneas de producción no pueden detenerse durante tanto tiempo. Esta limitación pone en evidencia la dependencia de proveedores externos y los riesgos asociados a la adquisición de herramientas comerciales que pueden no cumplir con las especificaciones solicitadas o llegar con retrasos significativos.

En conjunto, estos problemas refuerzan uno de los objetivos principales del presente proyecto, al demostrar que el diseño y la fabricación propia de herramientas especializadas resulta una alternativa más confiable, rápida y adaptada a las necesidades reales del proceso. De esta manera, se evita la incertidumbre en las compras, se reducen los tiempos de espera y se garantiza la compatibilidad con los equipos disponibles. En consecuencia, el desarrollo local de herramientas contribuye a la autonomía técnica, la eficiencia y la competitividad de los procesos productivos, fortaleciendo las capacidades de innovación y respuesta de los talleres y empresas nacionales.

3.3.3 Montaje. Para la realización de las pruebas experimentales se utilizaron dos herramientas de corte: una herramienta comercial adquirida y una herramienta con ángulo de 55° construida específicamente para el desarrollo del proyecto. Ambas herramientas fueron preparadas y montadas en la fresadora CNC Leadwell V-20, ubicada en el laboratorio de manufactura de la Universidad Industrial de Santander.

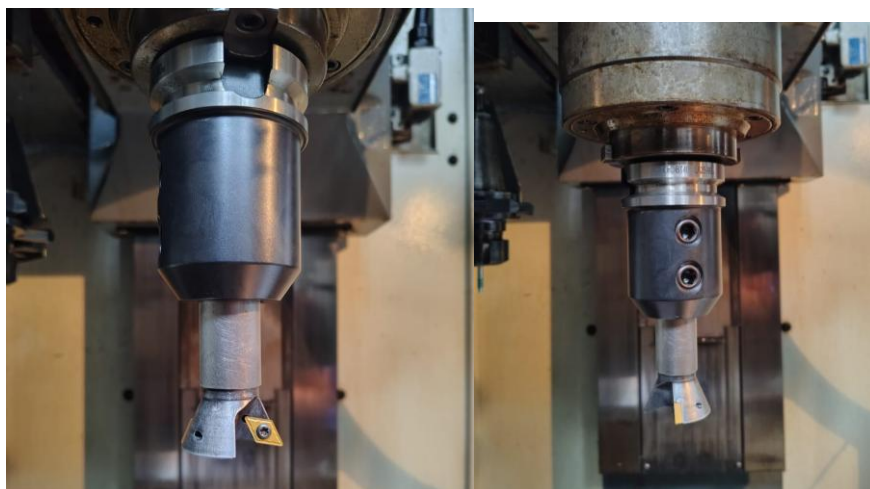
En el caso de la herramienta comercial, se adaptaron tres insertos DCMT 11 T, fijados mediante tornillos Torx M4, garantizando una adecuada sujeción y alineación para las operaciones de mecanizado. La disposición de los insertos permitió una distribución equilibrada del corte y facilitó la evacuación de la viruta durante el proceso.

Por su parte, a la herramienta construida se le adaptaron dos insertos de la misma denominación DCMT 11 T, los cuales fueron fijados mediante tornillos Torx M4 idénticos a los empleados en la herramienta comercial, asegurando condiciones de sujeción comparables entre ambas configuraciones.

La herramienta comercial fue fijada a la máquina mediante una pinza de sujeción, lo que permitió su adaptación al portaherramientas del equipo y proporcionó una concentricidad aceptable durante el mecanizado. No obstante, este sistema de sujeción no resultó el más adecuado para este tipo de operación, debido a las elevadas fuerzas de corte y vibraciones generadas. Idealmente, se habría empleado un cono BT-40, el cual ofrece una mayor rigidez y estabilidad; sin embargo, la herramienta comercial no contaba con esta adaptación y la fabricación de un sistema de acople adicional no fue viable debido a las limitaciones técnicas y económicas del proyecto.

En cuanto a la herramienta construida, su diseño incorporó ranuras laterales que permitieron el acoplamiento directo al cono BT-40 utilizado por la máquina CNC. Gracias a este diseño, fue posible asegurar el portaherramientas mediante los prisioneros del cono, garantizando una sujeción firme y estable durante la operación. El montaje de la herramienta construida en el cono BT-40 se presenta en la Figura 43.

Figura 43. Montaje de la herramienta



Previo a la aplicación del tratamiento térmico, la herramienta construida presentaba un ajuste adecuado dentro del cono BT-40, cumpliendo con las tolerancias dimensionales requeridas. Sin embargo, tras el tratamiento térmico se evidenció un ligero incremento dimensional en el sector del mango, atribuible a las transformaciones microestructurales y a las tensiones internas generadas durante el temple. Dado que el cono BT-40 posee tolerancias geométricas reducidas, este incremento dimensional impidió inicialmente la correcta inserción de la herramienta.

Para corregir esta condición, se realizó un ajuste dimensional mediante lijado controlado de las piezas, hasta alcanzar nuevamente las dimensiones requeridas para un acople adecuado. Este ajuste se manifestó en la eliminación parcial de la coloración superficial generada durante el revenido, sin afectar las propiedades mecánicas del material, permitiendo finalmente un montaje correcto y seguro de la herramienta en el cono BT-40.

Una vez preparadas, ambas herramientas fueron acopladas al magazine de la fresadora CNC Leadwell V-20, lo que permitió su intercambio automático durante la ejecución del programa de mecanizado. La herramienta comercial fue asignada a la posición T1, mientras que la herramienta desarrollada en el proyecto ocupó la posición T2, quedando ambas listas para la realización de las pruebas experimentales.

Posteriormente, se prepararon las piezas de trabajo, correspondientes a dos bloques de acero P20 para moldes, con dimensiones de 100 mm × 200 mm. La pieza fue fijada sobre la mesa de trabajo mediante una prensa manual, garantizando su inmovilización y minimizando vibraciones o desplazamientos durante las operaciones de corte.

Finalmente, se procedió a cargar el programa de mecanizado previamente desarrollado. Para ello, se utilizó un sistema de transferencia de datos que permitió la carga del código G en la máquina CNC. Una vez verificada la correcta asignación de herramientas y la integridad del programa, se dio inicio a la secuencia de mecanizado.

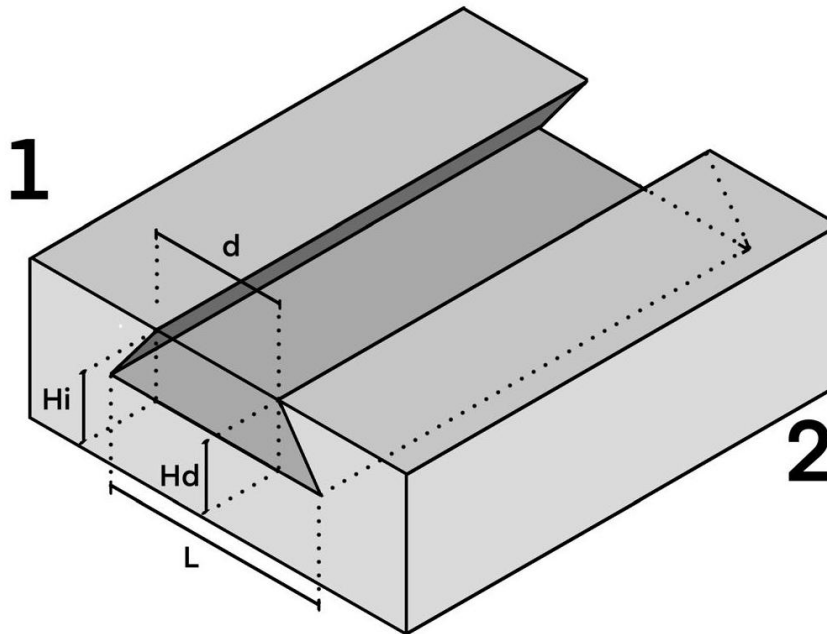
3.3.4 Medición de resultados. Después de realizar el proceso de mecanizado, se obtuvieron dos ranuras con geometría tipo cola de milano, las cuales fueron evaluadas dimensionalmente mediante el uso de un calibrador. Estas mediciones se realizaron con el objetivo de comprobar la calidad dimensional de cada uno de los cortes y, de esta manera, corroborar el nivel de aptitud tanto de la herramienta comercial como de la herramienta diseñada y construida en el presente proyecto.

Para llevar a cabo esta evaluación, el análisis se dividió en dos etapas. La primera etapa consistió en la toma de medidas en puntos específicos de las ranuras, con el fin de modelarlas posteriormente en un software CAD (SolidWorks) y analizar el grado de correspondencia entre la geometría obtenida y el diseño teórico. Este procedimiento permitió identificar posibles desviaciones dimensionales y geométricas derivadas del proceso de mecanizado.

La segunda etapa correspondió a una inspección visual, en la cual, con ayuda de un microscopio de aumento, se analizaron aspectos como la presencia de imperfecciones superficiales, rebabas y otros defectos asociados al acabado del mecanizado. A partir de esta inspección, se realizó una comparación cualitativa entre ambas piezas, con el propósito de determinar cuál de las herramientas evaluadas presentó un mejor desempeño en términos de calidad superficial.

3.3.4.1 Comparación de dimensiones geométricas. Para realizar una comparación dimensional adecuada, se utilizó un calibrador, con el cual se tomaron las medidas en los puntos indicados en la Figura 44. Estas mediciones permitieron caracterizar geoméricamente las ranuras obtenidas durante el proceso de mecanizado.

Figura 44. Toma de mediciones



Los puntos 1 y 2 identifican el inicio y el final del corte, respectivamente. Las dimensiones H_d y H_i , diferenciadas en izquierda y derecha, corresponden a la altura de la ranura. La dimensión L representa la longitud total de la ranura, mientras que la dimensión D corresponde a la distancia superior entre las caras de la ranura.

A partir de las medidas obtenidas, se realizó el modelado de cada una de las ranuras en el software CAD SolidWorks. Este procedimiento permitió identificar y comparar la geometría resultante del corte realizado con cada una de las herramientas evaluadas, facilitando así el análisis dimensional y la diferenciación de los resultados obtenidos.

4.3.4.2 Inspección visual del acabado superficial. Para la inspección visual del acabado superficial se empleó un lente de aumento, con el fin de identificar de manera cualitativa las imperfecciones presentes en las superficies mecanizadas. Esta metodología permitió evaluar defectos visibles tales como rebabas, marcas de herramienta y acumulación de material remanente, sin recurrir a instrumentos de medición de rugosidad, dado que el objetivo de esta etapa fue exclusivamente visual.

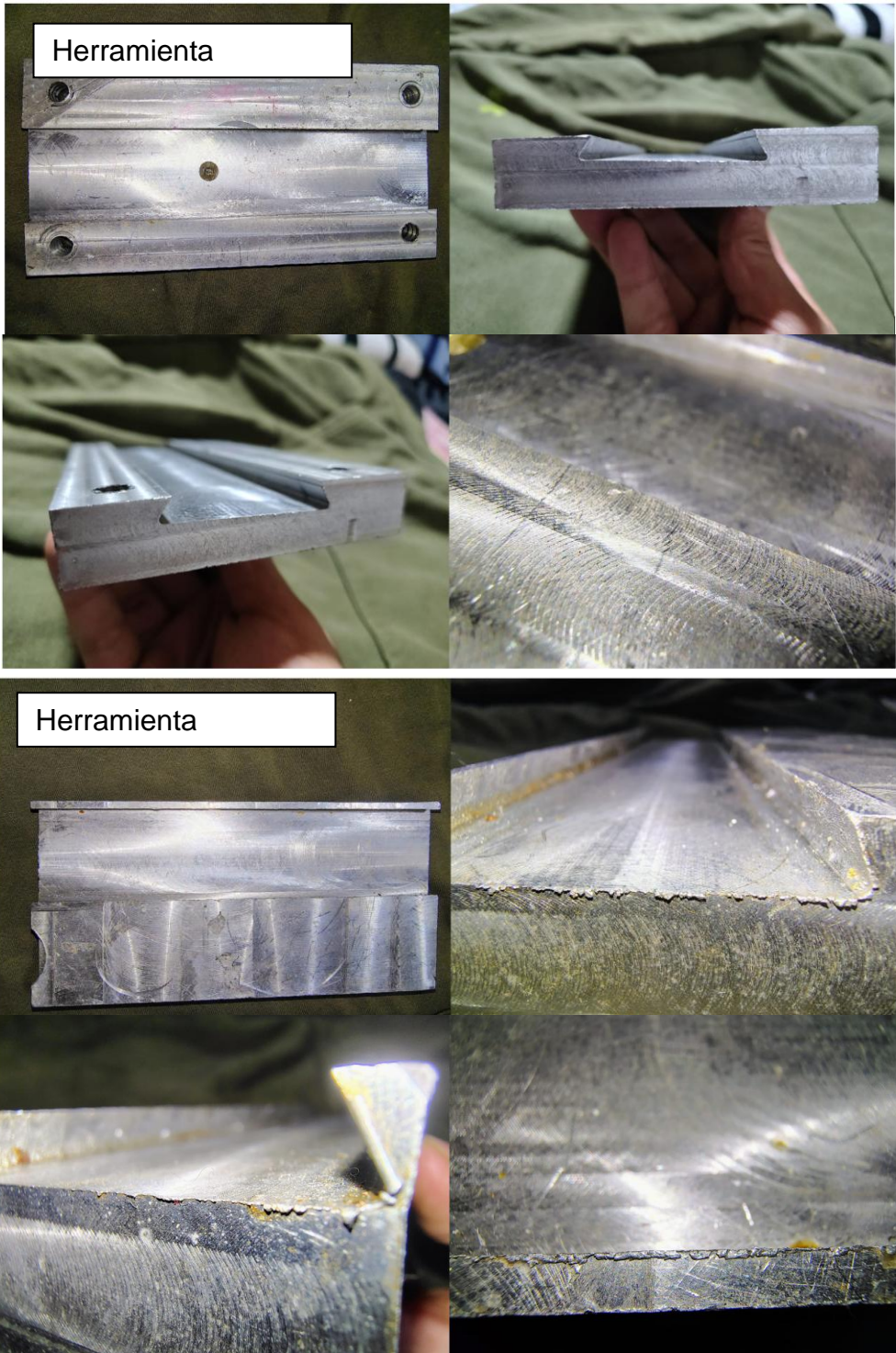
El registro fotográfico se realizó en tres zonas específicas de cada una de las piezas mecanizadas: la zona de entrada de la herramienta, la zona de salida de la herramienta y la parte superior de la ranura, siendo esta última la región donde se presentó una mayor concentración de rebabas. La selección de estas zonas permitió analizar el comportamiento del proceso de mecanizado a lo largo de todo el recorrido de corte.

En el cuerpo del documento se incluyen imágenes generales representativas del acabado superficial obtenidas durante la prueba con la herramienta diseñada y construida, así como durante la prueba con la herramienta comercial, con el fin de facilitar una comparación visual directa entre ambos casos. Estas imágenes permiten ilustrar de manera global las diferencias observadas en términos de presencia de rebabas y marcas de herramienta.

El registro fotográfico completo se presenta en el anexo G, donde las imágenes se organizan en dos grupos claramente diferenciados: por un lado, las correspondientes a la prueba realizada con la herramienta diseñada y construida, y por otro, las obtenidas durante la prueba con la herramienta comercial. Esta organización permite un análisis comparativo más detallado y ordenado del acabado superficial en ambas condiciones de mecanizado.

Las fotografías constituyen el soporte visual para la comparación posterior entre las superficies mecanizadas con la herramienta comercial y aquellas obtenidas con la herramienta diseñada y construida, facilitando el análisis cualitativo del acabado superficial.

Figura 45. Inspección visual



4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Después de obtener los resultados correspondientes al diseño, al análisis estructural y a las pruebas realizadas, se llevó a cabo una evaluación integral de cada uno de los aspectos involucrados, incluyendo los resultados analíticos obtenidos mediante las ecuaciones de resistencia de materiales, los valores proporcionados por las simulaciones numéricas y los registros fotográficos del proceso. Este análisis permitió identificar de manera clara tanto las fortalezas como las posibles limitaciones de la herramienta, proporcionando una visión global de su viabilidad. De esta forma, se demuestra no solo la factibilidad técnica de la herramienta diseñada, sino también la del proyecto en su conjunto, al establecer una base metodológica que sirve como guía para el diseño futuro de herramientas de corte orientadas a emprendedores y pequeños talleres de mecanizado, garantizando al mismo tiempo un diseño robusto y funcional.

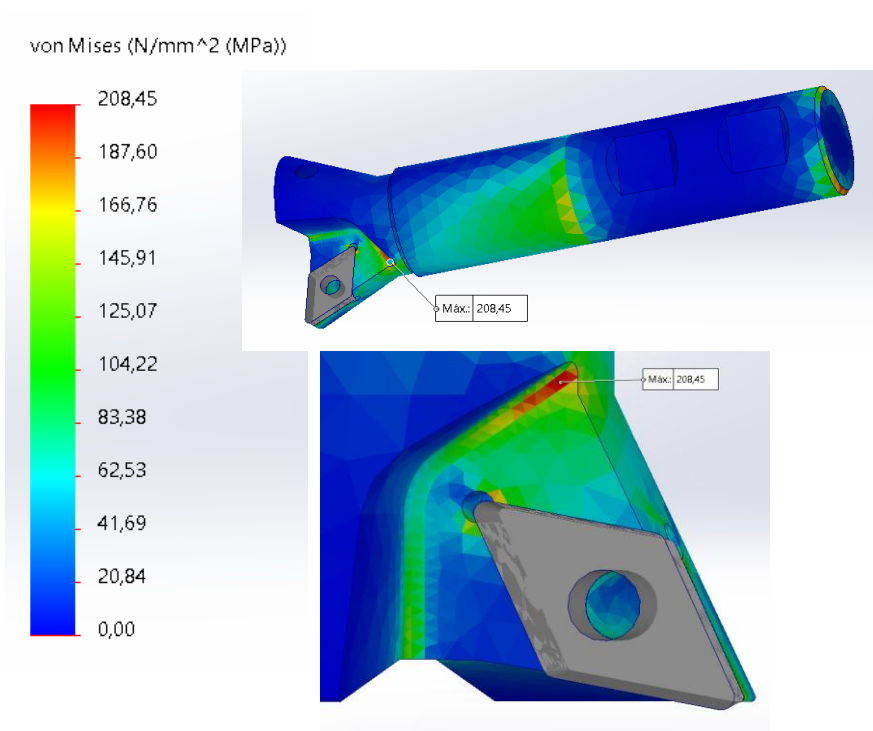
4.1 ANÁLISIS DE DISEÑO

Para el análisis del diseño se consideraron tanto los resultados obtenidos a partir de las ecuaciones analíticas como los derivados de las simulaciones numéricas realizadas. En particular, se evaluó la resistencia estructural de la herramienta frente a los modos de falla asociados a compresión, flexión, torsión y fatiga, así como su comportamiento bajo análisis estático y modal de frecuencia.

En cuanto a los resultados analíticos, se obtuvieron factores de seguridad de $N = 615.366$ para compresión, $N = 2.811$ para flexión, $N = 20.58$ para torsión y $N = 1.607$ para fatiga considerando carga combinada. Estos valores indican que la herramienta es capaz de soportar adecuadamente las cargas calculadas, incluso bajo las condiciones más desfavorables analizadas, las cuales fueron seleccionadas con el fin de maximizar los esfuerzos y evaluar el diseño en un escenario conservador.

A partir de la simulación estática realizada en SolidWorks Simulation, se obtuvo un esfuerzo equivalente máximo de 208,45 MPa, el cual se localiza en una región cercana al canal de refrigeración por donde se evacua la viruta. Esta zona corresponde a una discontinuidad geométrica del modelo, por lo que es esperable la aparición de concentraciones de esfuerzo asociadas a cambios locales de sección.

Figura 46. Simulación estática



Sin embargo, el canal de refrigeración presenta una geometría redondeada que contribuye a reducir de manera significativa la severidad del concentrador de esfuerzos en comparación con configuraciones con aristas vivas. Adicionalmente, esta geometría favorece el deslizamiento de la viruta sobre la superficie de la herramienta, lo cual mejora el comportamiento mecánico local y disminuye la probabilidad de acumulación de material.

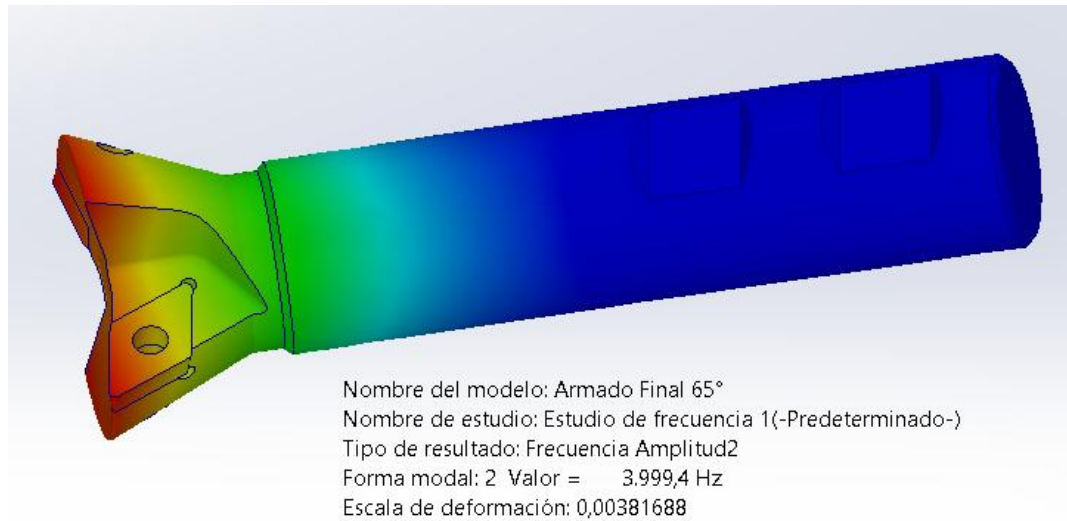
El esfuerzo máximo obtenido en la simulación estática fue de 208,45 MPa, valor que, aunque corresponde al mayor registrado en el modelo, se encuentra considerablemente por debajo del límite de fluencia del material, establecido en 770 MPa. Para cuantificar esta diferencia, se calculó el factor de seguridad frente a fluencia mediante la expresión:

$$N = \frac{\sigma_y}{\sigma_{max}}$$

donde σ_y corresponde al límite de fluencia del material y σ_{max} al esfuerzo máximo obtenido en la simulación. Al sustituir los valores, se obtiene un factor de seguridad aproximado de 3,7, lo que indica que la herramienta opera holgadamente dentro del régimen elástico bajo las condiciones de carga analizadas, sin riesgo de deformaciones permanentes desde el punto de vista estático y con un margen adecuado frente a posibles incertidumbres en las cargas y propiedades del material.

El análisis modal arrojó como resultado un primer modo elástico significativo a una frecuencia de 3999,4 Hz. La forma modal asociada a esta frecuencia muestra deformaciones concentradas principalmente en la zona libre de la herramienta, mientras que la región correspondiente al cono BT-40 presenta desplazamientos prácticamente nulos. Este comportamiento es coherente con las condiciones de sujeción empleadas en el modelo y confirma una adecuada rigidez dinámica del conjunto herramienta–portaherramientas.

Figura 47. Simulación modal



A partir de la frecuencia natural obtenida, se determinó el rango de velocidades de giro seguras para la operación de la herramienta. Considerando que la principal fuente de excitación durante el mecanizado está asociada al paso de los dientes de la fresa, la frecuencia de excitación puede expresarse como:

$$f_{exc} = \frac{z \cdot n}{60}$$

donde z corresponde al número de dientes de la herramienta y n a la velocidad de giro en revoluciones por minuto. Para este caso, la herramienta cuenta con dos dientes.

Con el fin de adoptar un criterio conservador y garantizar una separación suficiente entre la frecuencia de excitación y la frecuencia natural, se estableció que la frecuencia de excitación debe ser inferior a una quinta parte de la frecuencia natural:

$$f_{exc} < \frac{f_n}{5}$$

Sustituyendo los valores obtenidos:

$$\frac{2 \cdot n}{60} < \frac{3999.4}{5}$$

$$n < 23996 \text{ rpm}$$

Este resultado indica que la herramienta puede operar de manera segura hasta aproximadamente 24000 *rpm*, valor que se encuentra por encima del rango típico de operación de husillos con cono BT-40. Por lo tanto, desde el punto de vista dinámico, la herramienta presenta un comportamiento estable y no se ve comprometida por fenómenos de resonancia dentro de las condiciones normales de trabajo.

4.2 ANÁLISIS ESTRUCTURAL

Como parte del análisis de resultados, se evaluó el comportamiento estructural de la herramienta construida, considerando tanto las piezas que la conforman como cada una de las etapas del proceso de fabricación a las que fue sometido el material inicial hasta alcanzar su configuración final. Este análisis permitió identificar el impacto de cada operación sobre la integridad estructural y la funcionalidad de la herramienta.

4.2.1 Torneado. La primera etapa del proceso de fabricación correspondió al torneado, la cual se caracterizó por ser una de las fases más prolifas y controladas. Durante esta operación, las piezas obtenidas presentaron las dimensiones y geometrías establecidas en el diseño, sin evidenciar defectos significativos ni desviaciones que comprometieran la calidad dimensional o la resistencia estructural de la herramienta.

El buen desempeño de esta etapa permitió establecer una base geométrica adecuada para las operaciones posteriores, garantizando la correcta continuidad del proceso de fabricación.

4.2.2 Fresado. Las etapas de fresado y ranurado se desarrollaron de manera satisfactoria, permitiendo la obtención de las geometrías requeridas para el correcto funcionamiento de la herramienta. Durante el proceso de fresado se identificaron algunas imperfecciones superficiales de carácter menor, propias del mecanizado, las cuales no tuvieron un impacto significativo sobre la integridad estructural ni sobre la funcionalidad de la herramienta.

Por su parte, el proceso de ranurado presentó un comportamiento adecuado tanto en términos dimensionales como funcionales. Las ranuras obtenidas cumplieron con las dimensiones establecidas en la etapa de diseño, facilitando un ensamblaje correcto de los componentes y garantizando su desempeño durante las pruebas de mecanizado.

En conjunto, ambos procesos contribuyeron positivamente al comportamiento estructural general de la herramienta, sin evidenciar defectos que comprometieran su resistencia o su capacidad de operación bajo las condiciones de trabajo evaluadas.

4.2.3 Tratamiento térmico. El tratamiento térmico fue la etapa que presentó mayores dificultades dentro del proceso de fabricación. Las condiciones de temperatura y tiempo aplicadas generaron una variación dimensional leve en las piezas; no obstante, dicha variación resultó significativa, ya que impidió el correcto acoplamiento de la herramienta en el cono para el cual había sido diseñada.

Este comportamiento evidenció la sensibilidad de las piezas a las condiciones del tratamiento térmico y puso de manifiesto la necesidad de un control más riguroso de este proceso, especialmente en herramientas que requieren tolerancias ajustadas para su correcto funcionamiento.

4.2.4 General. De manera general, la herramienta construida presentó un comportamiento acorde a lo esperado desde el punto de vista estructural. A pesar de las dificultades asociadas al tratamiento térmico, la herramienta demostró una resistencia suficiente para soportar múltiples ciclos adicionales de fresado sin comprometer su funcionalidad ni su integridad estructural.

Figura 48. *Plaquitas de trabajo final*



4.3 RESULTADOS DE PRUEBAS

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir de las pruebas de mecanizado realizadas con la herramienta comercial y la herramienta diseñada y

construida en el presente proyecto. El análisis se centra en la evaluación dimensional y en la inspección visual del acabado superficial, con el fin de comparar el comportamiento de ambas herramientas bajo condiciones de corte similares, sin emitir aún juicios concluyentes sobre su desempeño.

4.3.1 Análisis dimensional. A partir del análisis de las pruebas realizadas, se identificó que ambos cortes presentaron ligeras desviaciones a nivel dimensional. No obstante, dichas variaciones no representaron un inconveniente significativo, ya que las dimensiones obtenidas en ambos casos se mantuvieron dentro de rangos aceptables para la funcionalidad de la ranura mecanizada.

Mediante el modelado realizado en SolidWorks se observó que el corte efectuado con la herramienta comercial se ejecutó de manera recta y uniforme a lo largo de toda la longitud de la ranura, lo que evidencia una adecuada estabilidad geométrica durante el proceso de mecanizado.

En contraste, el corte realizado con la herramienta diseñada y construida presentó una ligera desviación en la orientación del mecanizado, atribuida a un inconveniente durante la fijación de la pieza a mecanizar. Esta condición ocasionó que el corte se realizara de forma levemente diagonal, tal como se aprecia en el modelado CAD. Sin embargo, dicha desviación no comprometió las dimensiones finales ni la funcionalidad del mecanizado, manteniéndose dentro de los parámetros aceptables para su aplicación.

Figura 49. Resultado herramienta construida



Figura 50. Resultado herramienta comprada



Tabla 7. Medidas comparativas

Parámetro	Herramienta construida (mm)	Herramienta comercial (mm)
Hi ₁	6.25	7.35
Hd ₁	8.10	7.50
L ₁	47.10	47.65
d ₁	40.50	42.50
Hi ₂	4.85	7.10
Hd ₂	6.20	7.90
L ₂	47.25	47.70
d ₂	42.00	42.85

4.3.2 Análisis visual. En cuanto al acabado superficial, el análisis visual permitió identificar diferencias más evidentes entre ambos cortes. En el caso de la herramienta comercial, se observó una presencia considerable de rebabas y material sobrante, principalmente en las zonas de entrada y salida de la herramienta, así como en la parte superior de la ranura.

Por su parte, el acabado superficial obtenido con la herramienta diseñada y construida presentó una menor cantidad de rebabas y una superficie más uniforme a lo largo del recorrido de corte. Estas observaciones indican diferencias en la calidad superficial obtenida con cada herramienta, aun cuando las condiciones de mecanizado fueron similares y se pueden visualizar mejor en el anexo G.

De manera general, el análisis visual complementó los resultados dimensionales, permitiendo una evaluación conjunta del comportamiento de ambas herramientas durante las pruebas de mecanizado.

4.4 ANÁLISIS ECONÓMICO

Finalmente, se realizó un análisis económico y cualitativo comparativo entre la herramienta comercial y la herramienta diseñada y construida en el marco del presente proyecto. Para dicho análisis se consideraron tres escenarios: la adquisición de una herramienta comercial, la fabricación de la herramienta en un taller local por parte de un usuario externo que requiere este tipo de herramienta para una aplicación específica, y la fabricación de la herramienta por parte de un estudiante que dispone de las máquinas necesarias, pero no cuenta con las herramientas especializadas requeridas para su manufactura.

El comparativo general de estas alternativas se presenta en la Tabla 8, la cual integra tanto los costos asociados como diversos criterios cualitativos relevantes para la toma de decisiones. Desde el punto de vista económico, la herramienta comercial presenta el menor costo unitario, con un valor de \$494.509 COP por herramienta. En consecuencia, la adquisición de tres herramientas comerciales representa un costo total de \$1.484.529 COP, valor inferior al costo total asociado a la fabricación de tres herramientas por parte de un estudiante, el cual asciende a \$1.880.000 COP.

La ventaja económica de la herramienta comercial se explica principalmente por su producción a escala industrial, el uso de maquinaria optimizada y la disponibilidad de herramientas especializadas, factores que permiten reducir significativamente el costo unitario de fabricación. No obstante, esta alternativa presenta limitaciones en cuanto a flexibilidad dimensional y control del proceso, dado que se trata de un producto estandarizado cuyo diseño no puede ser ajustado a requerimientos específicos.

Tabla 8. Cuadro costos

Criterio	Herramienta comercial	Fabricación en taller local	Fabricación por estudiante
Costo total (3 herramientas) [COP]	\$1.484.529	\$980.000	\$1.880.000
Costo de material (por herramienta)	Incluido	\$60.000	\$60.000
Costo de herramientas (3 herramientas)	Incluidas	≤ \$800.000	\$1.700.000
Mecanizado	Incluido	\$0	\$0
Tratamiento térmico	Incluido	\$0	\$0
Mano de obra	Incluida	\$0	\$0
Tiempo de disponibilidad	30–40 días (importación)	Bajo (fabricación local)	Alto (limitado por recursos)
Flexibilidad dimensional	Baja (estándar comercial)	Alta (diseño a medida)	Alta (limitada por capacidades)
Posibilidad de ajustes	Nula	Alta	Alta
Experiencia técnica del fabricante	Alta (producción especializada)	Alta (experiencia directa en manufactura)	Media (proceso formativo)
Fiabilidad del producto	Media	Alta	Media

En el escenario correspondiente a la fabricación de la herramienta en un taller local, el costo total para las tres herramientas es de aproximadamente \$980.000 COP, valor inferior al costo total de la alternativa comercial y significativamente menor que el

correspondiente a la fabricación por parte de un estudiante. Este costo considera el material y el uso de herramientas propias del taller, ya que el fabricante dispone de maquinaria, horno para tratamiento térmico y mano de obra especializada. Aunque esta alternativa no representa el menor costo unitario, ofrece ventajas relevantes asociadas al control del proceso de manufactura y a la posibilidad de definir dimensiones, ángulos y características geométricas específicas según las necesidades de la aplicación.

Por su parte, la fabricación de la herramienta por parte de un estudiante presenta el mayor costo total, alcanzando un valor aproximado de \$1.880.000 COP para el conjunto de tres herramientas. Este comportamiento se atribuye principalmente al elevado costo de adquisición de las herramientas especializadas necesarias para el proceso de fabricación, las cuales, debido a su variedad y dimensiones reducidas, presentan mayor fragilidad, dificultad de manipulación y un costo elevado. Si bien el estudiante dispone de las máquinas necesarias, la ausencia de herramientas específicas convierte esta alternativa en la menos favorable desde el punto de vista económico.

Desde un enfoque cualitativo, la herramienta comercial presenta desventajas asociadas principalmente a los tiempos de entrega, los cuales dependen de procesos de importación que pueden oscilar entre treinta y cuarenta días. Adicionalmente, existe un grado de incertidumbre respecto a la fiabilidad del producto recibido, dado que el usuario no tiene control directo sobre el proceso de fabricación, pudiendo presentarse discrepancias entre el producto solicitado y el producto entregado, situación evidenciada durante el desarrollo del presente proyecto. En estos casos, una eventual devolución incrementa los tiempos de espera y puede generar sobrecostos asociados a envíos acelerados.

En contraste, tanto el fabricante comercial como el responsable del taller local cuentan con la experiencia técnica necesaria para la fabricación de este tipo de herramientas, lo que garantiza un nivel adecuado de calidad y funcionalidad del producto final. No obstante, la fabricación en un taller local ofrece ventajas adicionales, como una mayor

flexibilidad dimensional y geométrica, la posibilidad de realizar ajustes directos durante el proceso de manufactura y una menor dependencia de tiempos de importación, aspectos que resultan determinantes al enfrentar condiciones específicas de mecanizado o requerimientos particulares del usuario.

En el caso de la fabricación por parte de un estudiante, si bien esta alternativa permite un alto grado de personalización y constituye una experiencia formativa valiosa, estos beneficios se ven limitados por la experiencia técnica en proceso de formación y por la disponibilidad restringida de recursos, lo que incrementa los tiempos de ejecución y el riesgo asociado al proceso.

En conjunto, el análisis económico y cualitativo evidencia que, aunque la herramienta comercial presenta el menor costo unitario, la fabricación en un taller local representa una alternativa competitiva al ofrecer un costo total reducido para el conjunto de herramientas, mayor flexibilidad, menor tiempo de disponibilidad y un mayor control del proceso de manufactura. Por su parte, la fabricación de la herramienta por parte de un estudiante, si bien es viable desde el punto de vista técnico y formativo, no resulta favorable en términos económicos dentro del contexto del presente proyecto, debido principalmente al elevado costo asociado a la adquisición de herramientas especializadas.

5. CONCLUSIONES

El proyecto permitió cumplir el objetivo general al fortalecer la formación en el diseño de herramientas de corte mediante el desarrollo integral de las etapas de diseño, fabricación y validación de fresas tipo cola de milano para mecanizado CNC, contribuyendo a la articulación entre el ámbito académico y el sector productivo.

Se diseñaron y construyeron tres fresas tipo cola de milano con ángulos de 55°, 60° y 65°, compatibles con la máquina CNC Leadwell V-20 y el sistema de sujeción BT-40, empleando una configuración de dos filos con insertos de carburo de tungsteno y materiales disponibles en la industria local, lo cual demostró la viabilidad técnica de su fabricación.

Los análisis estructurales y las simulaciones numéricas confirmaron que el diseño propuesto es capaz de soportar las fuerzas generadas durante el proceso de fresado sin presentar fallas estructurales, garantizando un factor de seguridad adecuado y un comportamiento mecánico confiable bajo condiciones normales de operación.

Las pruebas experimentales realizadas evidenciaron que las fresas fabricadas presentan un desempeño comparable al de una herramienta comercial equivalente, alcanzando resultados satisfactorios en términos de precisión dimensional y acabado superficial, lo que valida la efectividad del diseño y del proceso de manufactura desarrollado.

6. RECOMENDACIONES

Se recomienda ampliar el alcance del proyecto hacia el diseño y la fabricación de herramientas de corte de distintos tipos, geometrías, ángulos y dimensiones, en función de las necesidades específicas de cada proceso de mecanizado. Esta extensión permitiría cubrir una mayor variedad de aplicaciones industriales y fortalecer la capacidad de desarrollo de herramientas personalizadas a nivel regional.

Para futuros trabajos, resulta pertinente evaluar el desempeño de las herramientas bajo condiciones críticas de operación, considerando variaciones significativas en velocidad de corte, avance y profundidad de pasada, así como su comportamiento al mecanizar materiales de mayor dureza. Este enfoque permitiría validar el desempeño de las herramientas en escenarios industriales reales de alta exigencia.

Asimismo, se sugiere profundizar en el análisis del desgaste de los filos o insertos y en la influencia de los tratamientos térmicos aplicados, incorporando procesos como el rectificado cilíndrico posterior al temple para corregir distorsiones geométricas, asegurar la concentricidad y mejorar la estabilidad dimensional y la vida útil de las herramientas.

Finalmente, se recomienda integrar metodologías de optimización del diseño y la manufactura, así como explorar procesos de mecanizado que permitan la generación de geometrías complejas orientadas a mejorar la refrigeración y la evacuación de viruta, con el fin de optimizar el desempeño térmico y prolongar la vida útil de las herramientas desarrolladas.

7. BIBLIOGRAFÍA

ALIEXPRESS. Fresa de cola de milano: herramienta de corte para mecanizado CNC. [en línea]. China: Alibaba Group, 2024. [consultado 17, marzo, 2025]. Disponible en: <https://es.aliexpress.com/i/1005006116876717.html>

ALTINTAS, Yusuf. Predicting the cutting forces in milling processes. En: International Journal of Machine Tools and Manufacture. Vol. 40, No. 11 (sep. 2000); p. 1561-1574. PII: S0890-6955(99)00080-2.

AZOM. AISI 4140 Alloy Steel (UNS G41400): mechanical properties. [en línea]. Manchester, RU: AZoNetwork, 2012. [consultado 20, abril, 2026]. Disponible en: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6769>

BEER, Ferdinand P.; JOHNSTON, E. Russell; MAZUREK, David F. y EISENBERG, Elliot R. Estática vectorial para ingenieros. 9 ed. México: McGraw-Hill, 2010. 600 p.

CALLISTER, William D. Fundamentos de ciencia e ingeniería de materiales. 2 ed. México: Limusa Wiley, 2012. 960 p.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. Specific cutting force values for machining with single-point tools. DIN 6583:1983. Berlín: DIN, 1983. 12 p.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. Programmaufbau für numerisch gesteuerte Arbeitsmaschinen; Schaltfunktionen. DIN 66025. Berlín: DIN, 1983. 14 p

EBAY. M3 M4 304 Stainless Steel Pin Tamper Torx Security Screw Flat Head Machine Screw. [en línea]. San José, EE. UU.: eBay Inc., [s.f.]. [consultado 20, marzo, 2025]. Disponible en: <https://www.ebay.com/itm/385032187072>

GROOVER, Mikell P. Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas. 3 ed. México: McGraw-Hill, 2007. 1024 p.

HERNÁNDEZ, Roberto y TORRES, Manuel. Procesos de mecanizado avanzado. Bogotá: Editorial Técnica, 2020. 250 p.

HIBBELER, Russell C. Mecánica de materiales. 8 ed. México: Pearson Educación, 2011. 896 p.

HIBBELER, Russell C. Ingeniería mecánica: dinámica. 12 ed. México: Pearson Educación, 2010. 752 p.

IMAT COLOMBIA. Fresa cola de milano 25 mm - 45°. [en línea]. Medellín: Imat Herramientas y Accesorios, 2024. [consultado 17, marzo, 2025]. Disponible en: <https://imat.com.co/accesorios/524-fresa-cola-de-milano-25-mm-45.html>

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. Documentación. Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación. NTC 1486. Bogotá: El Instituto, 2018. p.26

KENNAMETAL. Soluciones de herramientas de corte y metalurgia. [en línea]. Latrobe, EE. UU.: Kennametal Inc., 2024. [consultado 15, abril, 2026]. Disponible en: <https://www.kennametal.com/es/es/home.html>

KIENZLE, O. Die Bestimmung von Kräften und Leistungen an spanenden Werkzeugen und Werkzeugmaschinen. En: Forschung im Ingenieurwesen. 1952. vol. 20, no. 1, p. 5-7.

MITSUBISHI MATERIALS CORPORATION. Cutting Power for Turning - Technical Info/Cutting Formula [en línea]. 2026. [Consultado el 10 de Octubre de 2025]. Disponible en: <https://www.mmc-carbide.com/en-US/technical-info/cutting-formula/turning/cutting-power>

ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DE NORMALIZACIÓN. Plaquetas amovibles para herramientas de corte: designación. ISO 1832:2017. Ginebra: ISO, 2017. 48 p.

ÖZEL, Tug̃rul y ALTAN, Taylan. Process simulation using finite element method — prediction of cutting forces, tool stresses and temperatures in highspeed flat end milling. En: Journal of Materials Processing Technology. 2000. vol. 103, no. 3. p. 430-438.

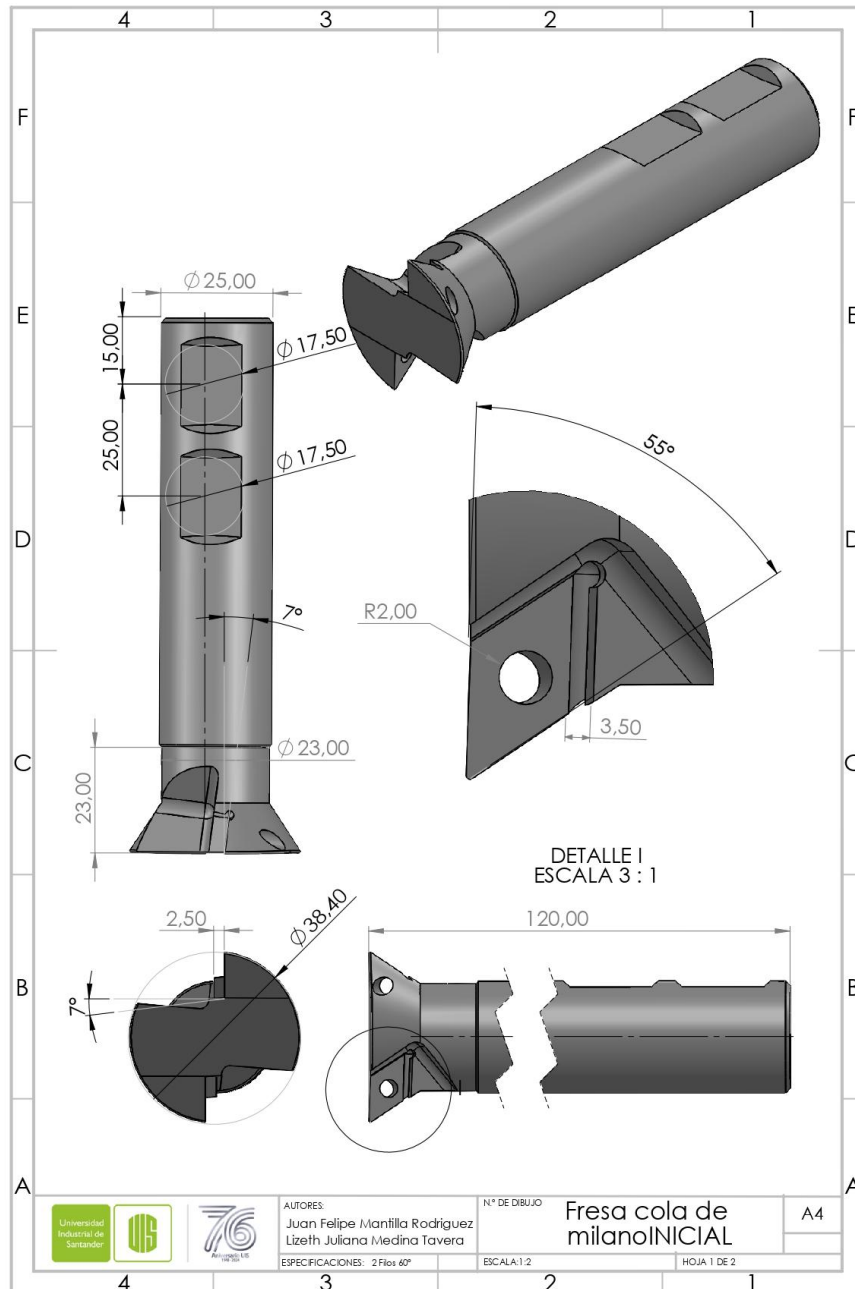
RUNSOM PRECISION. Guía de mecanizado CNC de 4 ejes. [en línea]. China: Ransom Precision Co., Ltd., 2024. [consultado 1, marzo, 2026]. Disponible en: <https://www.ransom.com/es/technology/guide-to-4-axis-cnc-machining/>

SAUNDERS, John S. Dividing head – dividing the circle [en línea]. [Consultado el 16 de febrero de 2026]. Disponible en: <https://johnfsworkshop.org/>

TR PRECISION MACHINING ASTURIAS. Plato Divisor Semiuniversal BS0 - Una Opcion A Tener en Cuenta. [video]. YouTube, 2024. [consultado 17, marzo, 2025]. Disponible en: <https://youtu.be/pwjKijago3c>

ANEXOS

ANEXO A. PLANOS DISEÑO INICIAL COLA DE MILANO



AUTORES
 Juan Felipe Mantilla Rodriguez
 Lizeth Juliana Medina Tavera

N° DE DIBUJO
 Fresa cola de milano INICIAL

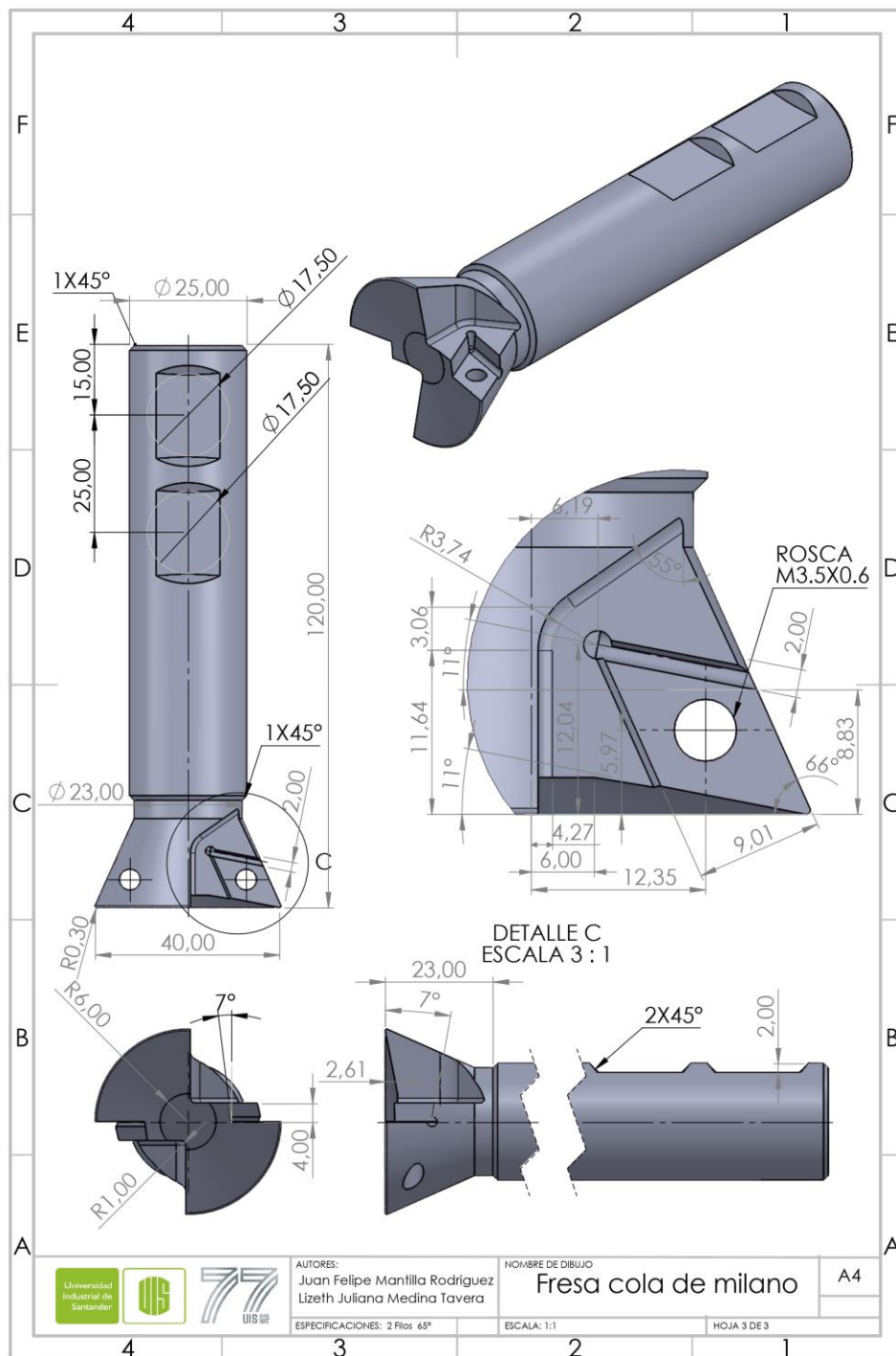
A4

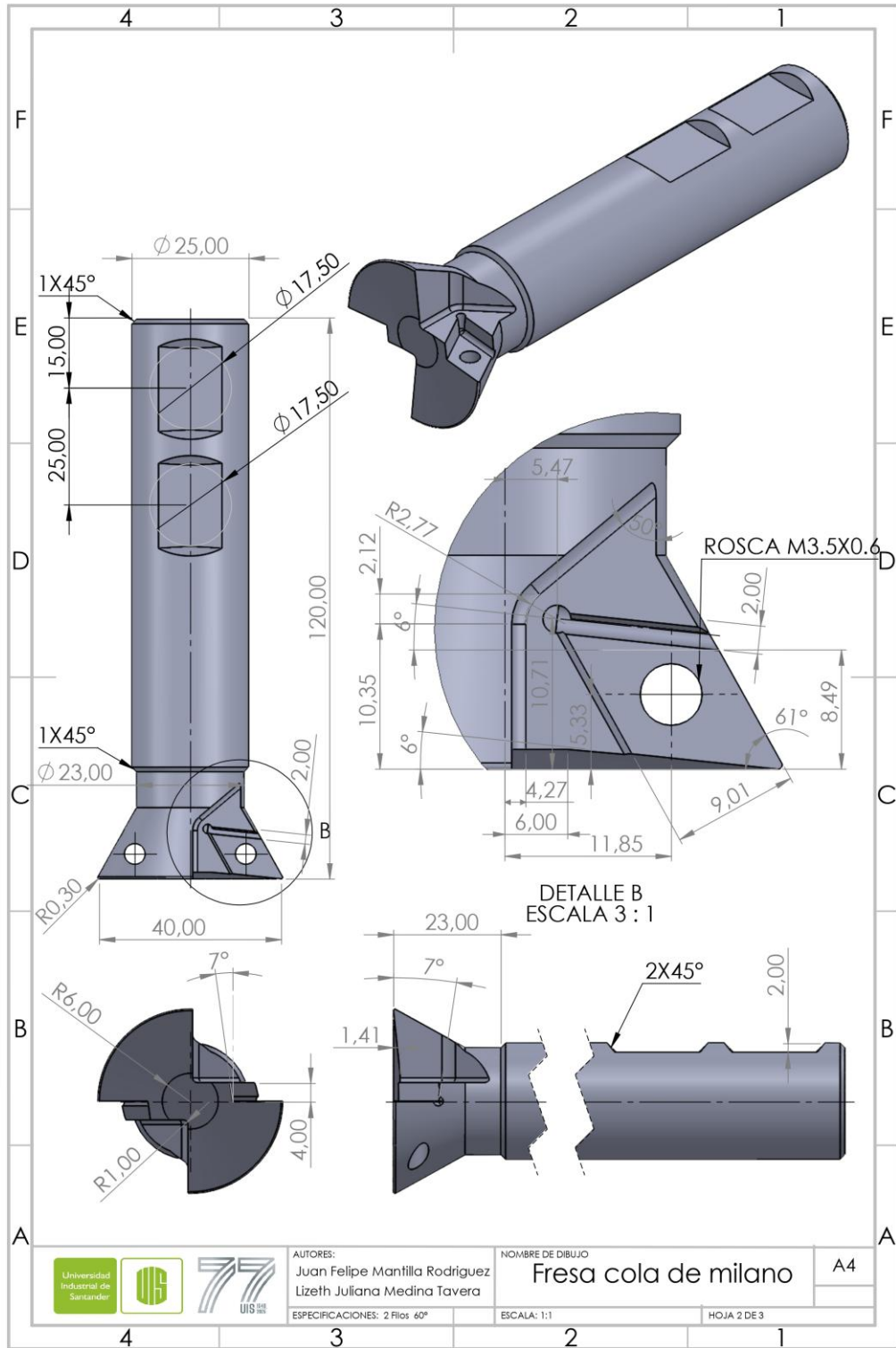
ESPECIFICACIONES: 2 Filos 60°

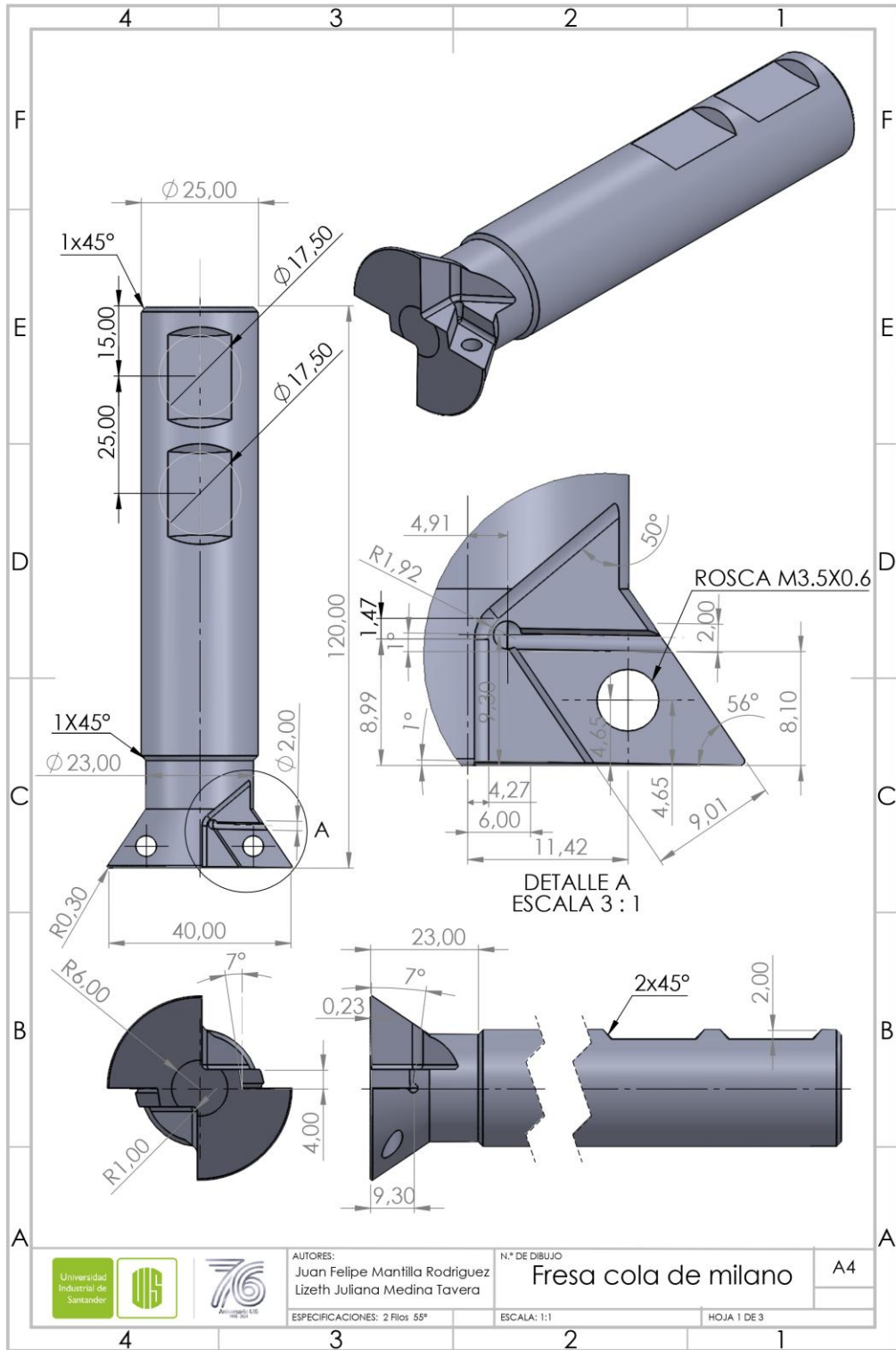
ESCALA: 1:2

HOJA 1 DE 2

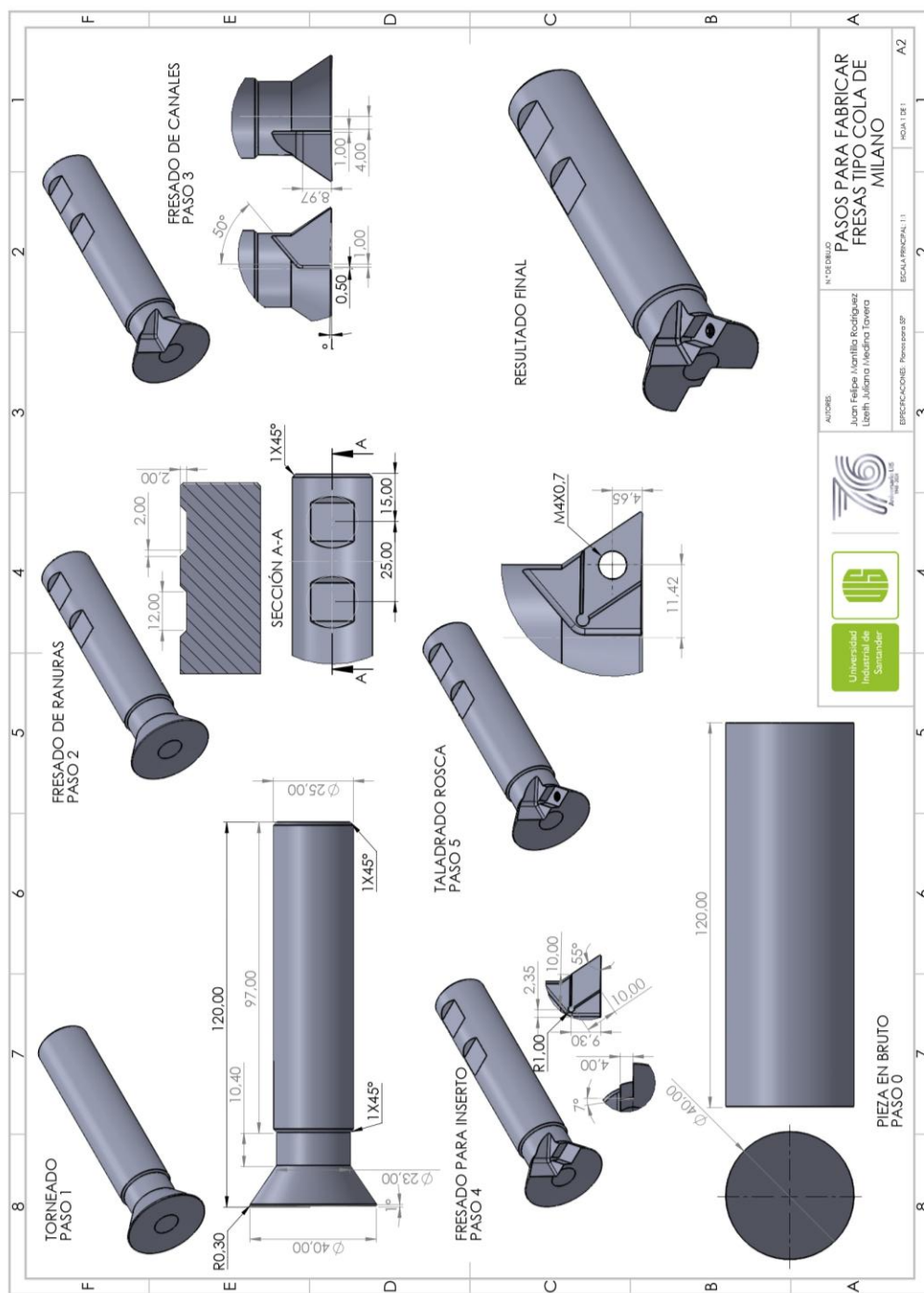
ANEXO B. PLANO DISEÑO FINAL COLA DE MILANO







ANEXO C. MECANIZADO PASO A PASO



Nº DE DISEÑO PASOS PARA FABRICAR FRESAS TIPO COLA DE MILANO		BOCAL PRINCIPAL 1.1	HOJA 1 DE 1	A2
AUTORES: Juan Felipe Montiel Rodríguez Leidy Juliana Medina Tavera	ESECCIONES: Pormenor 8º			

ANEXO D. CÓDIGO G CAVIDAD UNIVERSIDAD

%	G90 G00 X-17.951 Y-4.01 (posicion inicial)
O2680 (PROGRAMA PRINCIPAL)	
G15 G17 G21 G40 G80 G94 (cancelacion polar, plano XY, mm, cancela compensaciones y ciclos)	G43 H1 Z3.000 (compensacion de longitud herramienta)
G28 G91 Z0.00 (retorno seguro del eje Z a cero maquina)	M98 P12019 (primera pasada subprograma 2019)
G28 X0.000 Y0.000 (retorno ejes X e Y a home)	G90 X-17.888 Y-4.041 (reposicionamiento fino)
M6 T2 (cambio a herramienta 2)	M98 P12019 (segunda pasada)
M3 S2500 (husillo horario a 2500 rpm)	G90 X-17.771 Y-4.1 (nuevo desplazamiento)
G90 G54 (modo absoluto y cero pieza G54)	M98 P12019 (tercera pasada)
G00 X-10.000 Y-7.500 (posicion inicial rapida)	G90 X-17.571 Y-4.199 (ultimo desplazamiento)
Z5.000 (altura segura)	M98 P12019 (cuarta pasada)
M98 P101632 (llamada subprograma 1632)	M05 (detiene husillo)
M98 P51631 (llamada subprograma 1631)	G28 G91 Z0.000 (retorno eje Z)
M05 (detiene husillo)	M6 T2 (cambio a herramienta 2)
G28 G91 Z0.0 (retorno Z a cero maquina)	M3 S2500 (husillo a 2500 rpm)
M6 T1 (cambio a herramienta 1)	G90 G00 X1.103 Y-7 (posicion inicial)
M3 S2300 (husillo horario a 2300 rpm)	G49 G00 Z-3.00 (cancela compensacion y baja rapido)
	M98 P201228 (llamada subprograma 1228)
	M05 (detiene husillo)

G28 G91 Z0.000 (retorno eje Z)	G01 X-9.499 Y15.418 (trayectoria superior)
M6 T1 (cambio a herramienta 1)	X-9.499 Y11.402
M3 S2300 (husillo a 2300 rpm)	X-1.243 Y-0.839
G90 G00 X-6.312 Y-5.000 (posicion inicial)	X-15.471 Y-0.839
G43 H1 Z-3.000 (activa compensacion y baja)	X-15.471 Y8.403
M98 P202018 (llamada subprograma 2018)	X-11.499 Y11.401
M05 (detiene husillo)	X-11.499 Y10.790
G28 G91 Z0.000 (retorno eje Z)	X-5.005 Y1.161
G28 X0.000 Y0.000 (retorno ejes X e Y a home)	X-13.471 Y1.161
M30 (fin del programa)	X-13.471 Y7.407
%	X-12.251 Y8.328
%	X-8.766 Y3.161
O1632 (SUBPROGRAMA PERFIL PRINCIPAL 1)	X-11.704 Y4.000 (cierre del perfil)
G91 Z-5.20 (descenso incremental a profundidad)	G00 G91 Z5.00 (retiro herramienta)
G90 G01 X-14.971 Y-2.500 F200 (inicio del perfil)	G90 X-10.000 Y-7.500 (retorno a posicion inicial)
G02 X-17.471 Y0.000 I0.000 J2.500 (arco de entrada)	M90 (fin subprograma)
G01 X-17.471 Y8.502 (movimiento recto)	%
G02 X-16.756 Y9.939 I1.80 J0.00 (arco suave)	%
	O1631 (SUBPROGRAMA PERFIL PRINCIPAL 2)
	G91 Z-5.20 (descenso incremental)
	G90 G01 X-14.774 Y-2.500 F200 (inicio del perfil)

G02 X-16.473 Y0.000 I0.000 J2.500
 (arco inicial)
 G01 X-16.473 Y8.502
 G02 X-16.155 Y9.147 I0.800 J0.00
 G01 X-9.499 Y14.171
 X-9.499 Y11.402
 X-1.243 Y-0.839
 X-15.471 Y-0.839
 X-15.471 Y8.403
 X-11.499 Y11.401
 X-11.499 Y10.790
 X-5.005 Y1.161
 X-13.471 Y1.161
 X-13.471 Y7.407
 X-12.251 Y8.328
 X-8.766 Y3.161
 X-11.704 Y4.000 (cierre del perfil)
 G00 G91 Z5.00 (retiro herramienta)
 G90 X-10.000 Y-7.500 (retorno seguro)
 M90 (fin subprograma)
 %
 %
 O2019 (SUBPROGRAMA RANURA /
 CONTORNO)
 G91 G00 Z-5.2 (descenso rapido)

G01 X0.000 Y12.502 F200 (avance
 lineal)
 G02 X0.914 Y1.835 I2.300 J0.000 (arco
 de transición)
 G01 X7.057 Y5.329 (movimiento final)
 G00 Z5.000 (retiro herramienta)
 M90 (fin subprograma)
 %
 %
 O1228 (SUBPROGRAMA PERFIL
 CIRCULAR)
 G91 Z-0.20 (pasada superficial)
 G90 G02 X-8.488 Y-0.000 I0.00 J9.159
 F200 (arco principal)
 G01 X-13.387 Y7.262
 X-6.628 Y7.144
 X-0.797 Y-1.500
 X-4.072 Y-1.500
 G02 X-6.559 Y-0.177 I0.00 J3.000
 G01 X-10.035 Y4.975
 G02 X-7.932 Y6.394 I1.052 J0.709
 G01 X1.103 Y-7 (retorno al inicio)
 M90 (fin subprograma)
 %
 %

O2018 (SUBPROGRAMA CONTORNO LINEAL)

G01 X-8.961 Y13.287 F200 (trayectoria lineal)

G91 G00 Z-0.200 (descenso incremental)

X8.550 Y-0.149

X0.458 Y-13.162

M90 (fin subprograma)

ANEXO E. CÓDIGO G RANURADO UNIVERSIDAD

% (codigo para el ranurado completo)

O0001 (programa principal)

G00 G21 G17 G40 G49 G80 G90 G94 (linea de seguridad: mm, plano XY, modo absoluto)

G54 (cero de trabajo)

G28 G91 Z0.000 (retorno seguro del eje Z a cero maquina)

T1 M06 (seleccion y cambio de herramienta)

G90 (asegura modo absoluto)

S720 M03 F72 (velocidad de husillo, giro horario y avance)

G00 X-11.957 Y-2.825 (posición inicial del ranurado)

G43 G01 Z0.000 (compensación de longitud y descenso a profundidad inicial)

M98 P100002 (llamada subprograma perfil principal)

G00 Z1.000 (retiro de herramienta)

G01 X-11.782 Y4.825 (posicion para pasada lateral)

M98 P100003 (llamada subprograma pasada desplazada)

G00 Z1.000 (retiro de herramienta)

G01 X11.782 Y-4.825 (posicion para ultima pasada)

M98 P100004 (llamada subprograma pasada opuesta)

M09 M05 (apaga refrigerante y detiene husillo)

G00 G28 G91 Z0 (retorno eje Z a cero maquina)

G28 X0 Y0 (retorno ejes X e Y a home)

G90 (modo absoluto)

M30 (fin del programa)

%

O0002 (subprograma perfil principal del ranurado)

G91 G01 Z-0.200 (descenso incremental para profundidad)

G90 X-9.957 Y-0.175 F120 (inicio del perfil)

G02 X-6.957 Y2.825 R3.000 (arco extremo izquierdo)

G01 X9.957 (tramo recto)

Y0.175 (desplazamiento en Y)

G02 X6.957 Y-2.825 R3.000 (arco extremo derecho)

G01 X-11.957 (cierre del perfil)

M99 (retorno al programa principal)

%

O0003 (subprograma pasada lateral negativa)

G91 G00 Y-0.200 Z-1.200 (desplazamiento lateral y descenso)

G01 G90 X9.625 (pasada en X)

G91 Z1 (retiro de herramienta)

G90 G00 X-11.782 (retorno a inicio)

M99 (retorno al programa principal)

%

O0004 (subprograma pasada lateral positiva)

G91 G00 Y0.200 Z-1.200 (desplazamiento lateral y descenso)

G01 G90 X-9.625 (pasada en X)

G91 Z1 (retiro de herramienta)

G90 G00 X11.782 (retorno a posición segura)

M99 (retorno al programa principal)

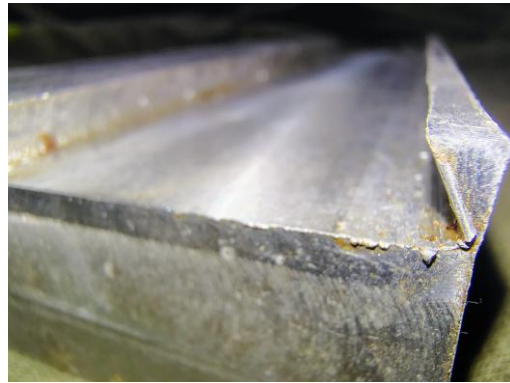
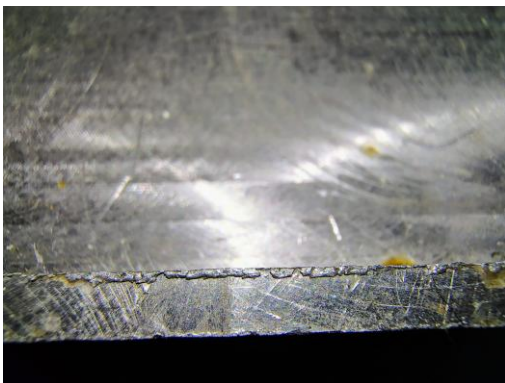
%

ANEXO F. CÓDIGO G PRUEBAS FINALES

%	G28 G91 Z0.0 (retorno eje Z a cero maquina)
O3000 (PROGRAMA PRINCIPAL)	
G28 X0 Y0 (retorno X e Y a home)	
G00 G21 G17 G40 G49 G80 G90 G94 (linea de seguridad)	G90 (modo absoluto)
G54 (cero de trabajo)	M30 (fin del programa)
G28 G91 Z0.0 (envia Z a cero maquina)	%
G90 (modo absoluto)	%
T1 M06 (cambio de herramienta)	O3001 (SUBPROGRAMA MOVIMIENTO REPETITIVO EN Y)
S2000 M03 (husillo horario)	
F200 (avance de trabajo)	G91 Z-0.5 (baja 0.5 mm incremental en Z)
G00 X0 Y-135 Z0 (posicion inicial)	G90 G01 Y135 (avanza hasta Y positivo en absolutas)
M98 P3001 L7 (ejecuta subprograma 7 veces)	G91 Z-0.5 (baja nuevamente 0.5 mm en Z)
G00 X-4 (desplazamiento lateral negativo)	G90 G01 Y-135 (regresa hasta Y negativo)
G01 Y135 (avance hasta Y positivo)	M99 (retorno al programa principal)
G01 X4 (cruce lateral positivo)	
G01 Y-135 (retorno a Y negativo)	%
M05 (detiene husillo)	

ANEXO G. FOTOGRAFIAS

(HERRAMIENTA COMERCIAL)



(HERRAMIENTA CONSTRUIDA)

