

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA



**MAESTRÍA EN MECÁNICA, MENCIÓN MANUFACTURA
COHORTE 2019**

TEMA:

**“OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE TORNEADO DEL ACERO AISI 304
MEDIANTE EL SISTEMA DE LUBRICACIÓN / ENFRIAMIENTO CON
NANOFLUIDO CRIOGÉNICO”**

Trabajo de titulación

Previo a la obtención del Grado Académico de Magíster en Mecánica, Mención Manufactura

Autor: Ing. Diego Armando Chadán Llumitasig

Director: Ing. Diego Fernando Núñez Núñez MSc.

Ambato- Ecuador

2021

APROBACIÓN DEL TUTOR.

En calidad de tutor del trabajo de Titulación presentado, previo a la obtención del título Magister en Mecánica, Mención Manufactura. Con el tema “OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE TORNEADO DEL ACERO AISI 304 MEDIANTE EL SISTEMA DE LUBRICACIÓN / ENFRIAMIENTO CON NANOFLUIDO CRIOGÉNICO” elaborado por el Ing. Diego Armando Chadán Llunitasig con cedula de identidad C.I.: 1804781720, Maestrante de la MAESTRÍA EN MECÁNICA, MENCIÓN MANUFACTURA COHORTE 2019 de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica

Certifico:

- El presente Trabajo de Titulación es original de su autor.
- Ha sido revisado cada uno de los capítulos componentes.
- Esta concluido en su totalidad.

.....
Ing. Diego Fernando Núñez Núñez MSc.
C.I.: 1803367729
TUTOR

AUTORÍA DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

La responsabilidad de las opiniones, comentarios y críticas emitidas en el Trabajo de Titulación, presentado con el tema: “OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE TORNEADO DEL ACERO AISI 304 MEDIANTE EL SISTEMA DE LUBRICACIÓN / ENFRIAMIENTO CON NANOFUIDO CRIOGÉNICO”, le corresponde exclusivamente al: Ing. Diego Armando Chadán Llumitasig, Autor bajo la Dirección del Ing. Diego Fernando Núñez Núñez MSc., Director del Trabajo de Investigación; y el patrimonio intelectual a la Universidad Técnica de Ambato.

Ing. Diego Armando Chadán Llumitasig
C.I.: 1804781720
AUTOR

Ing. Diego Fernando Núñez Núñez MSc.
C.I.: 1803367729
TUTOR

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que el Trabajo de Investigación, sirva como un documento disponible para su lectura, consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los Derechos de mi trabajo, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este, dentro de las regulaciones de la Universidad.

Ing. Diego Armando Chadán Llumitasig
C.I.: 1804781720

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

A la Unidad Académica de Titulación de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica. El Tribunal receptor del Trabajo de Titulación presidido por el Ingeniero Wilson Santiago Medina Robalino Mg., e integrado por los señores: Ing. Wilson Henry Vaca Ortega Mg. y Ing. Jorge Enrique López Velástegui Mg., designados por la Unidad Académica de Titulación de la Universidad Técnica de Ambato, para receptor el Trabajo de Titulación con el tema: “OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE TORNEADO DEL ACERO AISI 304 MEDIANTE EL SISTEMA DE LUBRICACIÓN / ENFRIAMIENTO CON NANOFUIDO CRIOGÉNICO”, elaborado y presentado por el Ing. Diego Armando Chadán Llumitasig para optar por el Grado Académico de Magíster en Mecánica, Mención Manufactura; una vez escuchada la defensa oral del Trabajo de Investigación el Tribunal aprueba y remite el trabajo para uso y custodia en las bibliotecas de la UTA.

Ing. Wilson Santiago Medina Robalino Mg.
Presidente del Tribunal

Ing. Wilson Henry Vaca Ortega Mg.
Miembro del Tribunal

Ing. Jorge Enrique López Velástegui Mg.
Miembro del Tribunal

DEDICATORIA

A mis padres Luis Chadán y María Llunitasig por el apoyo incondicional en estos años de mi vida, y el ejemplo de humildad, amor, y entrega a sus hijos.

A mi esposa Fernanda Guzmán y mi hija Salome Chadán, que me han acompañado de la mano siempre en esta etapa de mi vida, gracias por motivarme a ser una mejor persona día a día.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, a sus autoridades, personal administrativo, docentes de la Maestría en Mecánica mención Manufactura – Cohorte 2019, de manera especial al Ing. Diego Núñez. Mg. Por los conocimientos compartidos, por el apoyo y confianza brindada, quien con su gran ética y profesionalismo supo guiarme en el correcto desarrollo del presente trabajo de investigación.

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

PÁGINAS PRELIMINARES

APROBACIÓN DEL TUTOR.....	ii
AUTORÍA DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN.....	iii
DERECHOS DE AUTOR.....	iv
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO	v
DEDICATORIA	vi
AGRADECIMIENTO.....	vii
ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS.....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xv
ÍNDICE DE TABLAS.	xx
RESUMEN EJECUTIVO	xxiii
ABSTRACT	xxiv
CAPITULO I.....	1
MARCO TEÓRICO.....	1
1.1 Antecedentes Investigativos.....	1
1.1.1 Fundamentación matemática del fluido dinámica computacional.....	7
1.1.2 Uso de nano fluido en forma de aerosol en sistemas MQL.	10
1.1.3 Influencia de los fluidos criogénicos en el desgaste de flanco de la herramienta de corte y calidad superficial de los elementos mecanizados.....	15
1.2 Justificación.....	16
1.3 Problema:	17
1.4 Objetivos (Descripción del cumplimiento de objetivos):.....	17
1.4.1 Objetivo general.....	17
1.4.2 Objetivos específicos	17

1.5 Hipótesis.....	18
Variable dependiente.....	18
Variable Independiente.	19
1.6. Operacionalización de variables.	19
1.6.1. Variable dependiente	19
1.6.2. Variable independiente	20
CAPÍTULO II	21
METODOLOGÍA	21
2.1. Materiales.....	21
2.1.1. Torno Convencional	21
2.1.2. Plaquitas de metal duro.....	22
2.1.3 Selección de la plaquita seleccionada.....	22
2.1.4 Selección de la calidad de plaquita.....	22
2.1.6 Geometría de la plaquita de torneado.....	23
2.1.7 Forma del Inserto.....	24
2.1.8. Símbolo de espacio libre normal.....	24
2.1.9 Símbolo de clase de tolerancia.....	24
2.1.10. Símbolo de rompe virutas.....	25
2.1.11. Selección del porta herramientas.....	27
2.2. Sistema MQL.....	28
2.3. Aceite vegetal para el sistema MQL.....	28
2.4. Nano partículas de dióxido de Titanio.....	29
2.6. Acero Inoxidable AISI 304	30
2.7. Microscopio electrónico de barrido SEM.....	31
2.8. Rugosímetro Mitutoyo SJ-210.....	32
2.9. Sistema criogénico de CO ₂ Líquido + MQL.....	32

2.10. Metodología.	33
2.10.1. Diseño experimental.	33
2.10.2. Cálculo de parámetros de mecanizado.....	34
Cálculo de la velocidad de husillo y avance de torreta.....	35
Velocidad de husillo.	35
Velocidad de avance.	35
2.10.3. Análisis y optimización de la boquilla distribuidora por medio de Dinámica de fluidos computacional (CFD).	36
2.10.4. Modelo CFD.	37
2.10.5. Geometría planteada.	39
2.10.6. Pre-procesado.....	40
2.10.7. Mallado.	40
2.10.8. Propiedades de los fluidos utilizados en el análisis.	42
CAPÍTULO III.....	45
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	45
3.1. Resultados del Análisis CFD.	45
3.1.2. Adaptador de Boquilla 30° 2 Racores.....	45
3.1.3. Adaptador de Boquilla 45° 2 Racores.....	49
3.1.4. Adaptador de Boquilla 30° 3 Racores.....	53
3.1.5. Adaptador de Boquilla 45° 3 Racores.....	57
3.2. Validación del modelo CFD comparada con los valores registrados en el equipo criogénico construido.	61
3.2.1. Comparativa y análisis de resultados.	62
3.2.2. Rango de Temperaturas Registradas para cada caso.....	63
CAPÍTULO IV.....	64
DESARROLLO DE LA PROPUESTA.....	64

4.1. Tema.....	64
4.2. Objetivos.	64
4.2.1 General.....	64
4.2.2 Específicos.....	64
4.3. Desarrollo de la propuesta.....	64
4.4. Procedimiento experimental.....	65
4.4.1. Evaluación de Calidad superficial.	65
4.4.2. Condiciones de la probeta y el ambiente de análisis.	66
4.5. Resultados Obtenidos de calidad superficial.....	67
Experimento 1, 195 m/min 0,2 mm/rev 2 racores 45°	67
Experimento 2, 235 m/min 0,2 mm/rev 2 racores 45°	69
Experimento 3, 195 m/min 0,2 mm/rev 2 racores 30°	71
Experimento 4, 235 m/min 0,2 mm/rev 2 racores 30°	73
Experimento 5, 195 m/min 0,2 mm/rev 3 racores 45°	75
Experimento 6, 235 m/min 0,2 mm/rev 3 racores 45°	77
Experimento 7, 195 m/min 0,2 mm/rev 3 racores 30°	79
Experimento 8, 235 m/min 0,2 mm/rev 3 racores 30°	81
Comparación experimento 1 y 2.	83
Comparación experimento 3 y 4.	85
Comparación experimento 5 y 6.	87
Comparación experimento 7 y 8.	89
Comportamiento de Promedios de cada experimento desde el 1 al 8.....	91
4.6. Evaluación del desgaste de flanco.....	93
4.6.1. Experimento 1, 195 m/min 2 racores 45°	96
Reporte de desgaste del flanco, Tiempo 5 min.....	96
Reporte de desgaste del flanco, Tiempo 20 min.....	97

Reporte de desgaste del flanco, Tiempo 40 min.....	98
Reporte de desgaste del flanco, Tiempo 60 min.....	99
4.6.2. Experimento 2, 235 m/min 2 racores 45°	100
Reporte de desgaste del flanco, Tiempo 5 min.....	100
Reporte de desgaste del flanco, Tiempo 20 min.....	101
Reporte de desgaste del flanco, Tiempo 40 min.....	102
Reporte de desgaste del flanco, Tiempo 60 min.....	103
4.6.2. Experimento 3, 195 m/min 2 racores 30°	104
Reporte de desgaste del flanco, Tiempo 5 min.....	104
Reporte de desgaste del flanco, Tiempo 20 min.....	105
Reporte de desgaste del flanco, Tiempo 40 min.....	106
Reporte de desgaste del flanco, Tiempo 60 min.....	107
4.6.2. Experimento 4, 235 m/min 2 racores 30°	108
Reporte de desgaste del flanco, Tiempo 5 min.....	108
Reporte de desgaste del flanco, Tiempo 20 min.....	109
Reporte de desgaste del flanco, Tiempo 40 min.....	110
Reporte de desgaste del flanco, Tiempo 60 min.....	111
4.6.2. Experimento 5, 195 m/min 3 racores 45°	112
Reporte de desgaste del flanco, Tiempo 5 min.....	112
Reporte de desgaste del flanco, Tiempo 20 min.....	113
Reporte de desgaste del flanco, Tiempo 40 min.....	114
Reporte de desgaste del flanco, Tiempo 60 min.....	115
4.6.2. Experimento 6, 235 m/min 3 racores 45°	116
Reporte de desgaste del flanco, Tiempo 5 min.....	116
Reporte de desgaste del flanco, Tiempo 20 min.....	117
Reporte de desgaste del flanco, Tiempo 40 min.....	118

Reporte de desgaste del flanco, Tiempo 60 min.....	119
4.6.2. Experimento 7, 195 m/min 3 racores 30°	120
Reporte de desgaste del flanco, Tiempo 5 min.....	120
Reporte de desgaste del flanco, Tiempo 20 min.....	121
Reporte de desgaste del flanco, Tiempo 40 min.....	122
Reporte de desgaste del flanco, Tiempo 60 min.....	123
4.6.2. Experimento 8, 235 m/min 3 racores 30°	124
Reporte de desgaste del flanco, Tiempo 5 min.....	124
Reporte de desgaste del flanco, Tiempo 20 min.....	125
Reporte de desgaste del flanco, Tiempo 40 min.....	126
Reporte de desgaste del flanco, Tiempo 60 min.....	127
4.7. Interpretación de resultados.	129
Comparación experimento 1 y 5.	131
Comparación experimento 2 y 6.	133
Comparación experimento 3 y 7.	135
Comparación experimento 4 y 8.	137
4.8. Ecuación de Taylor.	138
Constante C.	139
Constante k.....	139
Constante C.	139
4.9. Verificación de la hipótesis.....	142
Hipótesis.....	142
Variable dependiente.....	142
Variable Independiente.	143
Hipótesis nula Ho:.....	143
Hipótesis alterna Ha:.....	143

Modelo matemático:.....	143
CAPITULO V	147
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	147
5.1. Conclusiones.	147
5.2. Recomendaciones.....	149
Bibliografía.	150
ANEXOS.....	154

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Boquilla de efecto Coanda.....	6
Figura 2. Influencia del diámetro de la salida de CO ₂ en la velocidad y forma de inyección.....	8
Figura 3. Comparativa de varios métodos de lubricación-refrigeración con el método CO ₂ +MQL y su influencia en la vida útil de la herramienta y la remoción del material.....	9
Figura 4. Propiedades físicas de un nano fluido de aceite vegetal y nano partículas de dióxido de titanio a diferentes concentraciones.....	12
Figura 5. Variación del calor específico y la densidad en función de la concentración de nano partículas de TiO ₂ en aceite vegetal.....	13
Figura 6. Variación del calor específico y la densidad en función de la concentración de nano partículas de TiO ₂ en aceite vegetal.....	15
Figura 7. Torno Semiautomático.....	21
Figura 8. Geometría de la herramienta de corte seleccionada.....	22
Figura 9. Geometría de la herramienta de corte seleccionada.....	23
Figura 10. Geometría de la herramienta de corte seleccionada.....	23
Figura 11. Geometría de la herramienta de corte seleccionada.....	24
Figura 12. Ángulo de espacio libre normal.....	24
Figura 13. Características dimensionales del inserto en donde se aplican las tolerancias.....	24
Figura 14. Parámetros de mecanizado, máximos recomendados y mínimos para el inserto CNMG 120408 MF 2025.....	26
Figura 15. Parámetros del porta insertos seleccionado para la plaquita CNMG 120408 MF 2025.....	27
Figura 16. Selección del porta insertos para la plaquita seleccionada.....	27
Figura 17. Sistema de mínima cantidad de lubricante para herramientas de mecanizado.....	28
Figura 18. Aceite vegetal para mecanizado.....	29
Figura 19. Microscopía de nanopartículas de dióxido de titanio donde se aprecia su tamaño en una escala de 50 nm.....	29
Figura 20. Salida de CO ₂ líquido hacia la zona de contacto pieza-herramienta.....	30

Figura 21. Microscopio Electrónico de Barrido SEM.	31
Figura 22. Rugosímetro Mitutoyo SJ-210 y su calibración con un patrón estándar..	32
Figura 23. Sistema criogénico de distribución y dosificación de CO ₂	33
Figura 24. Boquilla soporte para la distribución de CO ₂ criogénico y aceite enriquecido con nano partículas de dióxido de titanio.....	37
Figura 25. Modelos 3D de las diferentes configuraciones en la boquilla distribuidora.	37
Figura 26. Modelo CFD para 2 racores, dimensionamiento.	40
Figura 27. Modelo CFD para 3 racores, dimensionamiento.	40
Figura 28. Modelo CFD planteado para la simulación del adaptador de boquilla.....	41
Figura 29. Modelo VOF (Volume of fluid) que involucra los 3 tipos de fluido para el análisis.....	42
Figura 30. Configuración de turbulencia K-E considerado en la simulación.	42
Figura 31. Propiedades del aceite Coolube 2210 consideradas en el análisis.....	43
Figura 32. Propiedades del aceite CO ₂ consideradas en el análisis..	43
Figura 33. Propiedades del aceite aire consideradas en el análisis..	44
Figura 34. Enfriamiento de la herramienta de corte mediante fluido criogénico (CO ₂) y aceite vegetal + Nano TiO ₂	61
Figura 35. Comportamiento de la calidad superficial Ra en función del tiempo de mecanizado para la combinación de parámetros 195 m/min 2 racores 45°.	68
Figura 36. Comportamiento de la calidad superficial Rz en función del tiempo de mecanizado para la combinación de parámetros 195 m/min 2 racores 45°.	68
Figura 37. Comportamiento de la calidad superficial Ra en función del tiempo de mecanizado para la combinación de parámetros 235 m/min 2 racores 45°.	70
Figura 38. Comportamiento de la calidad superficial Rz en función del tiempo de mecanizado para la combinación de parámetros 235 m/min 2 racores 45°.	70
Figura 39. Comportamiento de la calidad superficial Ra en función del tiempo de mecanizado para la combinación de parámetros 195 m/min 2 racores 30°.	72
Figura 40. Comportamiento de la calidad superficial Rz en función del tiempo de mecanizado para la combinación de parámetros 195 m/min 2 racores 30°.	72
Figura 41. Comportamiento de la calidad superficial Ra en función del tiempo de mecanizado para la combinación de parámetros 235 m/min 2 racores 30°.	74

Figura 42. Comportamiento de la calidad superficial Rz en función del tiempo de mecanizado para la combinación de parámetros 235 m/min 2 racores 30°.....	74
Figura 43. Comportamiento de la calidad superficial Ra en función del tiempo de mecanizado para la combinación de parámetros 195 m/min 3 racores 45°.....	76
Figura 44. Comportamiento de la calidad superficial Rz en función del tiempo de mecanizado para la combinación de parámetros 195 m/min 3 racores 45°.....	76
Figura 45. Comportamiento de la calidad superficial Ra en función del tiempo de mecanizado para la combinación de parámetros 235 m/min 3 racores 45°.....	78
Figura 46. Comportamiento de la calidad superficial Rz en función del tiempo de mecanizado para la combinación de parámetros 235 m/min 3 racores 45°.....	78
Figura 47. Comportamiento de la calidad superficial Ra en función del tiempo de mecanizado para la combinación de parámetros 195 m/min 3 racores 30°.....	80
Figura 48. Comportamiento de la calidad superficial Rz en función del tiempo de mecanizado para la combinación de parámetros 195 m/min 3 racores 30°.....	80
Figura 49. Comportamiento de la calidad superficial Ra en función del tiempo de mecanizado para la combinación de parámetros 235 m/min 3 racores 30°.....	82
Figura 50. Comportamiento de la calidad superficial Rz en función del tiempo de mecanizado para la combinación de parámetros 235 m/min 3 racores 30°.....	82
Figura 51. Comportamiento de la calidad superficial Ra en función del tiempo de mecanizado para la combinación de parámetros 195 y 235 m/min 2 racores 45°.....	83
Figura 52. Comportamiento de la calidad superficial Rz en función del tiempo de mecanizado para la combinación de parámetros 195 y 235 m/min 2 racores 45°.....	84
Figura 53. Comportamiento de la calidad superficial Ra en función del tiempo de mecanizado para la combinación de parámetros 195 y 235 m/min 2 racores 30°.....	85
Figura 54. Comportamiento de la calidad superficial Rz en función del tiempo de mecanizado para la combinación de parámetros 195 y 235 m/min 2 racores 30°.....	86
Figura 55. Comportamiento de la calidad superficial Ra en función del tiempo de mecanizado para la combinación de parámetros 195 y 235 m/min 3 racores 45°.....	87
Figura 56. Comportamiento de la calidad superficial Rz en función del tiempo de mecanizado para la combinación de parámetros 195 y 235 m/min 3 racores 45°.....	88
Figura 57. Comportamiento de la calidad superficial Ra en función del tiempo de mecanizado para la combinación de parámetros 195 y 235 m/min 3 racores 30°.....	89

Figura 58. Comportamiento de la calidad superficial Rz en función del tiempo de mecanizado para la combinación de parámetros 195 y 235 m/min 3 racores 30°	90
Figura 59. Comportamiento de la calidad superficial Ra en función del tiempo de mecanizado para los promedios de cada experimento	91
Figura 60. Comportamiento de la calidad superficial Rz en función del tiempo de mecanizado para los promedios de cada experimento	92
Figura 61. Zonas del flanco del inserto establecidas por la ISO 3685.....	94
Figura 62. Micrografía SEM del inserto CNMG 120408 MF 2025 sin desgaste.	95
Figura 63. Comportamiento del desgaste de flanco en relación con los parámetros que fueron variados en cada experimento.....	128
Figura 64. Desgaste de flanco medido en función del tiempo de mecanizado experimentos 1 y 5.	131
Figura 65. Evolución del desgaste de flanco en función del tiempo hasta alcanzar el criterio máximo de desgaste, se presentan las líneas de tendencia y las ecuaciones que gobiernan el desgaste de la herramienta de corte. Comparando el experimento 1 con el 5.....	132
Figura 66. Desgaste de flanco medido en función del tiempo de mecanizado experimentos 2 y 6.	133
Figura 67. Evolución del desgaste de flanco en función del tiempo hasta alcanzar el criterio máximo, se presentan las líneas de tendencia y las ecuaciones que gobiernan el desgaste de la herramienta de corte. Comparando el experimento 2 con el 6.	134
Figura 68. Desgaste de flanco medido en función del tiempo de mecanizado experimentos 3 y 7.	135
Figura 69. Evolución del desgaste de flanco en función del tiempo hasta alcanzar el criterio máximo, se presentan las líneas de tendencia y las ecuaciones que gobiernan el desgaste de la herramienta de corte. Comparando el experimento 3 con el 7.	136
Figura 70. Desgaste de flanco medido en función del tiempo de mecanizado experimentos 4 y 8.	137
Figura 71. Evolución del desgaste de flanco en función del tiempo hasta alcanzar el criterio máximo, se presentan las líneas de tendencia y las ecuaciones que gobiernan el desgaste de la herramienta de corte. Comparando el experimento 4 con el 8.	138

Figura 72. Tiempo de vida útil del inserto en función de la velocidad de corte, se aprecia que los resultados son más favorables para el adaptador de boquilla de 3 racores.	142
Figura 73. Propuesta de adaptador de boquilla para la optimización del sistema Cryo MQL el modelo propuesto consta de 2 racores orientados a 30° del eje del adaptador, se evidencia el haz de fluido criogénico y el enfriamiento en la herramienta de corte.	146

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1. Operacionalización de variables variable dependiente.	19
Tabla 2 Operacionalización de la variable independiente.....	20
Tabla 3. Selección del inserto usado en los experimentos del trabajo de investigación del catálogo del fabricante..	26
Tabla 4. Propiedades mecánicas del Acero inoxidable AISI 304..	30
Tabla 5. Propiedades químicas del acero AISI 304.	31
Tabla 6. Diseño experimental para la investigación propuesta, utilizando todos los parámetros con los cuales se realizarán las comparaciones..	34
Tabla 7. Condiciones de Análisis CFD de los modelos de boquilla distribuidora planteados en el sistema de lubricación híbrida.....	39
Tabla 8. Condiciones de Frontera para el adaptador de 2 racores orientados a 30°. .	45
Tabla 9. Resultados del Análisis CFD de velocidad de fluido para el adaptador con 2 racores orientados a 30° del eje.....	46
Tabla 10. Resultados del Análisis CFD de la temperatura de fluido para el adaptador con 2 racores orientados a 30° del eje.....	47
Tabla 11. Resultados del Análisis CFD de la presión de fluido para el adaptador con 2 racores orientados a 30° del eje.....	48
Tabla 12. Condiciones de Frontera para el adaptador de 2 racores orientados a 30°..	49
Tabla 13. Resultados del Análisis CFD de velocidad de fluido para el adaptador con 2 racores orientados a 45° del eje.....	50
Tabla 14. Resultados del Análisis CFD de la temperatura de fluido para el adaptador con 2 racores orientados a 45° del eje.....	51
Tabla 15. Resultados del Análisis CFD de la presión de fluido para el adaptador con 2 racores orientados a 30° del eje.....	52
Tabla 16. Condiciones de Frontera para el adaptador de 2 racores orientados a 30°.	53
Tabla 17. Resultados del Análisis CFD de la velocidad de fluido para el adaptador con 3 racores orientados a 30° del eje.....	54

Tabla 18. Resultados del Análisis CFD de la presión de fluido para el adaptador con 3 racores orientados a 30° del eje.....	55
Tabla 19. Resultados del Análisis CFD de la Temperatura de fluido para el adaptador con 3 racores orientados a 30° del eje.....	56
Tabla 20. Condiciones de Frontera para el adaptador de 2 racores orientados a 30°..	57
Tabla 21. Resultados del Análisis CFD de la Velocidad de fluido para el adaptador con 3 racores orientados a 45° del eje.....	58
Tabla 22. Resultados del Análisis CFD de la presión de fluido para el adaptador con 3 racores orientados a 45° del eje.....	59
Tabla 23. Resultados del Análisis CFD de la temperatura de fluido para el adaptador con 3 racores orientados a 45° del eje.....	60
Tabla 24. Comparativa visual entre la simulación CFD y el equipo construido en sus diferentes configuraciones.	62
Tabla 25. Comparativa entre temperaturas obtenidas mediante el análisis CFD y medidas en campo.....	63
Tabla 26. Longitud de muestreo de rugosidad en función de Ra teórica calculada en función del avance por revolución y el radio de punta de la herramienta de corte....	65
Tabla 27. Datos obtenidos mediante microscopía SEM del desgaste de flanco en cada experimento.....	130
Tabla 28. Desgaste de flanco del inserto alcanzando el criterio de desgaste establecido por la norma ISO 3685 para la combinación de parámetros 195 m/min 45° para 2 y 3 racores.	131
Tabla 29. Desgaste de flanco del inserto alcanzando el criterio de desgaste establecido por la norma ISO 3685 para la combinación de parámetros 235 m/min 45° para 2 y 3 racores.	133
Tabla 30. Desgaste de flanco del inserto alcanzando el criterio de desgaste establecido por la norma ISO 3685 para la combinación de parámetros 195 m/min 30° para 2 y 3 racores.	135
Tabla 31. Desgaste de flanco del inserto alcanzando el criterio de desgaste establecido por la norma ISO 3685 para la combinación de parámetros 235 m/min 30° para 2 y 3 racores.	137

Tabla 32. Parámetros de las constantes C y k para mecanizado criogénico con 2 racores.	139
Tabla 33. Resultados para las constantes C & k calculados para mecanizado criogénico con 2 racores.	140
Tabla 34. Parámetros de las constantes C y k para mecanizado criogénico con 3 racores.	140
Tabla 35. Parámetros de las constantes C y k para mecanizado criogénico con 3 racores.	140
Tabla 36. Parámetros de las constantes C y k para mecanizado criogénico con 3 racores.	141
Tabla 37. Valores estadísticos de los experimentos para la distribución calculada...	144
Tabla 38. Distribución t student tabulada..	145
Tabla 39. Parámetros del experimento 3, la configuración más óptima de condiciones de corte y características del adaptador de boquilla.....	145

RESUMEN EJECUTIVO

En el presente trabajo investigativo se empleó dióxido de carbono para el enfriamiento y el sistema MQL con aceite biodegradable Unist Coolube 221 O EP, con nano partículas de óxido de titanio como aditivo para la lubricación pulverizada de los modelos utilizados con la ayuda del software, donde el experimento con 2 racores de, orientación a 30 grados y velocidad de corte de 195 m/min, presentan resultados más favorables en el análisis CFD como de calidad superficial y vida útil de la herramienta debido a varios factores relacionados con la hidráulica del sistema y su geometría hace que esta configuración del fluido de corte alcance adecuadamente a la herramienta; mediante análisis CFD se determinó el valor mínimo de temperatura a la que el modelo propuesto enfría la herramienta de corte y da como resultado -74.15 grados Celsius, este es un valor superior al medido de -62 grados Celsius con la termocupla en el sistema construido, esto se debe a que el software de elementos finitos considera condiciones ideales sin tomar en cuenta las pérdidas que se presentan en el sistema, estos fueron validados con la experimentación in situ, que arrojaron valores similares en la forma del haz de fluido criogénico, validando los diseños planteados, lo que ayudó en la propuesta de optimización, verificando con los análisis de laboratorio, donde la vida útil de la herramienta de corte en el experimento alcanzaría el criterio de desgaste a los 140 minutos de mecanizado que es el más adecuado.

Descriptorios: Análisis CFD, Lubricación, Fluido criogénico, Refrigeración híbrida, Rugosidad superficial, Desgaste de herramientas.

ABSTRACT

In the present research work, carbon dioxide was used for cooling and the MQL system with biodegradable oil Unist Coolube 221 O EP, with nanoparticles of titanium oxide as an additive for spray lubrication of the models used with the help of the software, where the experiment with two fittings of, The experiment with two fittings of 30 degrees orientation and cutting speed of 195 m/min, presented more favorable results in the CFD analysis as surface quality and tool life due to several factors related to the hydraulics of the system and its geometry makes this configuration of the cutting fluid to reach the tool adequately; applying CFD analysis, the minimum temperature value at which the proposed model cools the cutting tool was determined and results in - 74.15 degrees Celsius, this is a higher value than the measured value of -62 degrees Celsius with the thermocouple in the constructed system, that is because the finite element software considers ideal conditions without taking into account the losses that occur in the system, these were validated with in situ experimentation, which yielded similar values in the shape of the cryogenic fluid beam, validating the proposed designs, which helped in the optimization proposal, verifying with the laboratory analysis, where the useful life of the cutting tool in the experiment would reach the wear criterion at 140 minutes of machining which is the most appropriate.

Descriptors: CFD analysis, Lubrication, Cryogenic fluid, Hybrid cooling, Surface roughness, Tool wear.

CAPITULO I

MARCO TEÓRICO

1.1 Antecedentes Investigativos

La industria se encuentra en un constante proceso de cambio y mejora tecnológica; el aumento de las exigencias del mercado internacional demanda un producto cada vez más acorde a los requerimientos del cliente con bajos costos, el aumento de la producción y un control en la calidad de los productos [1].

El proceso de fabricación y mantenimiento de maquinarias o componentes, constituyen un sector importante por los recursos y esfuerzos demandados, por su directa influencia en los costos de producción. Las empresas que fabrican piezas o componentes para la industria buscan reducir los niveles de consumo energético y de materiales, lo que ha demandado el análisis de los métodos y tecnologías utilizadas en el diseño y procesos de manufactura [2].

En los últimos años el avance tecnológico que ha alcanzado en las máquinas herramientas, como es en el proceso de corte y en las tecnologías de maquinado han posibilitado el maquinado de alta velocidad. Esto facilita una mayor velocidad de remoción de material, mejora en los tiempos de maquinado obteniendo un elevado acabado superficial, disminuyendo la vida útil de la herramienta de corte [2].

La importancia de medir el desgaste y valorar la vida de la herramienta reside en reducir los efectos indeseables que provocan: una menor exactitud dimensional de la pieza terminada, tensiones residuales superficiales, deficiente acabado superficial durante el proceso de torneado [3].

Algunos autores dan soluciones para aumentar la vida útil de la herramienta están dirigidas a disminuir la temperatura en la interface herramienta pieza, utilizando y desarrollando fluidos de corte de diferentes naturalezas. La utilización de estos aumenta el costo en el proceso de fabricación, provocando daños en la salud de los operarios y afectando el medio ambiente. Las nuevas tecnologías para disminuir estos

efectos perjudiciales de los fluidos de corte se respaldan en el corte en seco (mínima cantidad de lubricación) y desarrollo de nuevos fluidos de corte [1].

Últimamente algunas investigaciones relacionadas con la evaluación de la vida útil de la herramienta han estado dirigidas a efectuar el corte refrigerado de metales, mejorar el acabado superficial, sin embargo, el discreto el número de las investigaciones relacionadas con el mecanizado en seco a altas velocidades utilizadas en el torneado de aceros inoxidables en la industria [2] [3].

A continuación, se muestra un resumen de los trabajos investigativos más relevantes.

Korkut en el 2004, investigaron la influencia de la velocidad de corte en el desgaste de la herramienta y en la rugosidad superficial en el acero AISI 304, empleando velocidades de corte entre 120 m/min y 210 m/min. Lin (2008) evaluó el comportamiento de la rugosidad superficial aplicado en el torneado en seco de los aceros AISI 303 y 304, utilizando velocidades de corte entre 250 m/min y 450 m/min. Estos autores utilizaron velocidades de corte bajas y altas en sus análisis respectivamente. Xavior y Adithan (2009) determinaron la influencia de los fluidos de corte en el desgaste de la herramienta y en la rugosidad superficial durante el torneado de AISI 304 con herramientas de carburo y velocidades de corte bajas. Galanis y Manolakos (2010) desarrollaron un modelo para predecir la rugosidad superficial en el torneado del acero inoxidable AISI 316L utilizando velocidades de hasta 440 m/min, no midieron el desgaste de la herramienta de corte en el 2012 ejecutaron un estudio experimental para optimizar los parámetros de corte del torneado en seco, con fluidos de corte para el acero inoxidable AISI 304 [4].

Naves y otros investigadores analizaron la aplicación de fluidos de corte a alta presión en las herramientas de corte para alargar la vida de estas, evaluando el desgaste del flanco para 300 m/min como velocidad de corte. En el 2014 Gerth y otros realizaron una investigación para ahondar en el estudio del proceso de adhesión que se produce entre la viruta y la arista de corte de la herramienta. Estas últimas investigaciones no valoraron el rango de alta velocidad, además utilizaron fluidos de corte para alargar la vida útil de las herramientas [1].

Otros estudios realizados en 2019 por Damir, Shi, y Attia, empezaron por la comprensión fundamental de las características de los chorros, su interacción y su posición se llevaron a cabo utilizando modelos CFD y FE validados experimentalmente en la zona de corte, este sistema optimizado fue evaluado experimentalmente y comparado con el método tradicional de inundación, alta presión y refrigeración criogénica para el mecanizado de aleaciones Titanio. Estos resultados mostraron una mejora en la vida útil de la herramienta con una técnica de refrigeración híbrida optimizada [5].

Pereira, A. Rodríguez, realizó el estudio con ordenador, establecieron la velocidad mínima en la que el CO₂ es ventajoso para ayudar a las microgotas de aceite, que se utiliza en los procesos, se obtuvo que a partir de la comparación entre las pruebas numéricas y las experimentales realizadas. Este valor se estableció en 325 m/s. Según el diámetro de salida elegido, este valor se alcanzó en diferentes distancias, siendo el tamaño adecuado 1,5 mm. Con este tamaño, el CO₂ alcanza los 35 mm de distancia sin ser esparcido en la atmósfera. La boquilla convergente tubo un punto de pulverización 1,7 veces más focalizada en cuanto a la velocidad del fluido de corte es superior a 325 m/s [4].

Actualmente en el Ecuador se realizan los procesos de maquinado y fabricación de elementos mecánicos, con los métodos tradicionales de inundación utilizando taladrina, este lubricante generalmente contiene agua y un 10% de aceite, como refrigerante de buena calidad, pero puede causar enfermedades al operador, dañar la herramienta de corte, afectar el acabado superficial del elemento mecánico también afecta el medio ambiente [6].

Varios estudios realizados en la Universidad Técnica de Ambato concluyeron que los nanos lubricantes como, Óxido de aluminio solo se utiliza en laboratorios de materiales especializados en metalografías, estos se utilizan como material tribológico para ayudar a pulir las superficies de estudios. Según este estudio la vida útil de la herramienta fue definida por la velocidad de corte expuesta, el tiempo de vida útil es inversamente proporcional a la velocidad de corte, esto sucedió porque el flanco está sometido a mayor concentración de esfuerzo, además demostró que la vida útil de la herramienta aumenta trabajando con MQL+0.5%TiO₂, ya que esta ayuda a lubricar y

disipar el calor, y así obtuvieron menor rugosidad superficial y ayudo a conservar la herramienta de trabajo [7].

Del análisis anterior se aprecia que las investigaciones se han centrado en el estudio de la rugosidad superficial y las fuerzas de corte, siendo menos estudiadas las deformaciones superficiales y el desgaste de la herramienta en el mecanizado de alta velocidad en seco de los aceros inoxidable. La industria que se desarrolla hoy en día exige de un uso adecuado de los procesos mecanizados, especialización de la producción y el incremento de la productividad del trabajo sobre la base de los rendimientos empresariales, con una disminución de los costos, reparación y mantenimiento, además que esta tecnología presenta un equilibrio entre las cuestiones técnicas y medioambientales [8].

Las tendencias recientes apuntan a eficiencia y a estrategias de enfriamiento sostenibles para el mecanizado de materiales difíciles de cortar, este trabajo se refiere a la combinación de refrigeración criogénica y lubricación de cantidad mínima un beneficio desde sus respectivas capacidades de refrigeración y lubricación [8].

Una alternativa a los fluidos de corte convencionales como la taladrina es la tecnología de lubricación por cantidad mínima. Usando este método en lugar aceites emulsificables para ser aplicado en la zona de corte, se pulverizan micropartículas de aceite biodegradable en forma de aerosol. Con esta técnica se reduce el caudal de aceite hasta valores entre 10 y 100 mL / h [4].

Al mismo tiempo, se mejora la distribución del aceite en la zona de corte contribuyendo al mismo tiempo con mejorar la salud ocupacional. Sin embargo, los sistemas MQL carecen de capacidad de enfriamiento, y aunque tiene buenas propiedades de lubricación, pierden las capacidades evacuación de viruta, lo que hace que la tecnología sea insuficiente para ser aplicada en materiales de maquinabilidad difícil [4].

Por ello es necesario utilizar métodos de enfriamiento criogénico combinado con MQL en las operaciones de mecanizado. Este método consiste en inyectar un gas a bajas temperaturas en la zona de corte. Los fluidos criogénicos más utilizados son nitrógeno líquido o dióxido de carbono líquido. La obtención del CO₂ se realiza extrayéndolo de

la misma atmósfera, siendo un proceso amigable con el medio ambiente. El uso de fluidos criogénicos presenta ventajas relacionadas con la economía además de que se reduce la temperatura de corte y se mejora la evacuación de la viruta [4].

Los gases usados son inertes lo que no genera residuos y no compromete la salud del personal que opera la maquinaria. Combinando esta tecnología con los sistemas de mínima cantidad de lubricación se logra obtener un sistema ideal, económico que garantice la vida útil prolongada de las herramientas de corte, amigable con el medio ambiente y que mantiene la integridad de los trabajadores [4].

Para garantizar que el fluido criogénico y el MQL se mezclen adecuadamente es necesario diseñar un sistema de distribución que proporcione las condiciones adecuadas para obtener un fluido mixto que garantice el resultado deseado de lubricación, enfriamiento y evacuación de viruta, para ello es necesario seleccionar o fabricar los accesorios adecuados para conducir ambos fluidos hacia un punto en donde se combinen, y se dirija su mezcla hacia la zona de corte mejorando el producto, su calidad superficial y prolongando la vida útil de la herramienta de corte [3].

El sistema comprende todos los accesorios necesarios para conducir los gases inertes de forma líquida y gaseosa para formar una mezcla a la salida que se combina con el aerosol del MQL este sistema comprende dos depósitos de gas, uno criogénico y uno gaseoso, cuya función es facilitar el movimiento del fluido más frío a través de los conductos, en algunos casos es conveniente utilizar una bomba de vacío con la finalidad de evitar que el fluido criogénico condense a la salida [2] [5].

Es necesario también seleccionar los accesorios más adecuados como neoprenos, codos y tees para construir el sistema evitando fugas y al mismo tiempo garantizando el mantenimiento, una parte muy importante del sistema de distribución son las electroválvulas, las cuales abren o cierran el paso de los gases dirigiéndolos a su punto de combinación que normalmente es una boquilla diseñada en donde el MQL y el gas criogénico se dirigen hacia el punto de contacto entre el filo de la herramienta y la superficie del eje a mecanizar [4].

Existen muchas formas de mezclar el fluido criogénico con el aerosol del MQL una de ellas es la boquilla planteada por [4]. en su trabajo de investigación “Diseño de

boquilla para uso combinado de MQL y gas criogénico en mecanizado” esta boquilla se compone de tres entradas y dos salidas, La primera salida está en el medio del cuerpo de la boquilla y la otra está en la punta de la boquilla, las entradas centrales transportan CO₂, aire y aceite, respectivamente [4].

La entrada de CO₂ lo transporta desde el sistema de inyección hasta la punta de la boquilla, de este modo las entradas de aire y aceite se descargan en una cámara de mezcla interna donde se generan micropartículas de aceite por efecto de Venturi, las cuales alcanzan la punta de la boquilla atravesando la pared exterior de esta por un fenómeno hidráulico denominado efecto coanda. Una vez alcanzada la punta de la boquilla, las micropartículas son arrastradas por el chorro de CO₂ generando el fluido que llegaría a la zona de contacto entre la herramienta de corte y la superficie del eje [4]. Esta configuración de sistema de mezclado se aprecia claramente en la figura 1.

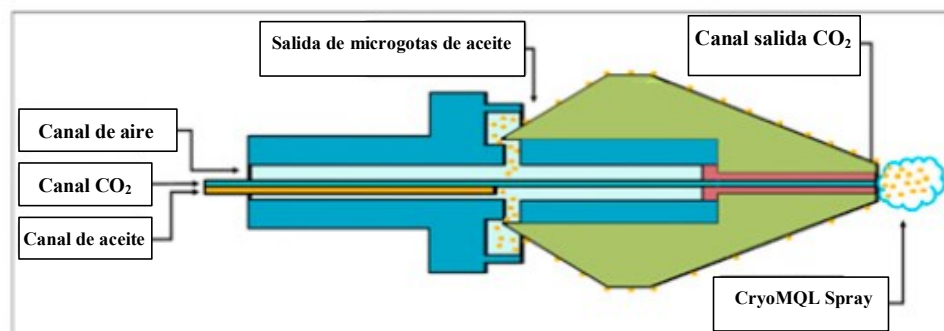


Figura 1. Boquilla de efecto Coanda. Fuente: [4].

Este tipo de boquilla es la más adecuada para mezclar fluidos criogénicos con aerosoles de aceite, la desventaja es que resulta demasiado costosa ya que implica una inversión inicial considerable en sistemas de regulación e inyección de Gas criogénico y MQL [4].

El adaptador de boquilla propuesto por [4]. para evitar el gasto excesivo en los accesorios de inyección y regulación, mantener la pulverización a bajas temperaturas y lograr una tecnología que combine sistemas MQL existentes con sistemas criogénicos, constituye una buena alternativa, para aplicar un sistema de lubricación híbrida aplicable en procesos de mecanizado de materiales con maquinabilidad complicada.

Para obtener un adaptador de boquilla que garantice que ambos fluidos se combinen además de la pulverización del aceite del MQL, es necesario realizar varias simulaciones mediante fluido dinámica computacional CFD considerando varios parámetros como los diámetros de salida, su configuración, los ángulos en los que están posicionadas las salidas con la finalidad de obtener la mejor combinación de parámetros y validar el diseño de adaptador de boquilla más adecuado, que garantice la combinación de la tecnología MQL con la criogénica en el mismo sistema, los resultados de estos análisis pueden ser validados en la práctica mediante mediciones de parámetros como caudales y velocidades a la salida [9].

1.1.1 Fundamentación matemática del fluido dinámica computacional.

Para obtener convergencias rápidas y soluciones realistas se debe plantear un modelo de elementos finitos adecuado combinado con una buena malla que garantice la convergencia de las soluciones en el menor tiempo posible, optimizando recursos computacionales [10].

En este tipo de análisis es adecuado utilizar modelos de volumen de fluido para calcular la velocidad de pulverización y su concentración en la zona de contacto de la herramienta de corte con la superficie mecanizada, este tipo de modelos es adecuado para modelar dos o más fluidos inmiscibles con diferentes velocidades. En este modelo, los volúmenes de control deben estar definidos por un fluido de fase simple o sus combinaciones, es decir, que en todos los nodos se debe considerar la masa [11].

En otros modelos de fluido dinámica computacional se resuelven ecuaciones de conservación de masa, momento y energía, por otro lado, en el modelo VOF, la ecuación de conservación de masa se reemplaza por la ecuación de fracción de volumen en cada nodo modelado [11].

En varios estudios previos el algoritmo más adecuado para la resolución del modelo CFD es el de presión implícita con división de operadores, este modelo de resolución involucra un modelo de presión-velocidad desarrollado para el cálculo no iterativo de flujos compresibles inestables. Aunque también se puede adaptar para la solución iterativa de problemas de flujo inestable compresible como constante incompresible [12].

Este algoritmo permite obtener resultados de varios parámetros de operación del sistema de refrigeración y lubricación híbrida como las velocidades, caudales y otros parámetros relevantes para el funcionamiento del sistema, una de las ventajas es que una vez que se consolida el modelo este es paramétrico lo que permite variar los parámetros fácilmente para obtener nuevos resultados que pueden ser fácilmente comparados con los anteriores, de este modo se escoge la combinación de parámetros más adecuada, en un estudio previo realizado por [4]. se obtuvo el diámetro más óptimo para la salida de CO₂ criogénico. Tomando en cuenta que los racores con un diámetro mayor implican un aumento del consumo de CO₂. Este es un parámetro importante para tomar en cuenta ya que el sistema debe ser eficiente económicamente por ello es necesario optimizar las salidas de gas criogénico al mínimo posible, garantizando al mismo tiempo que el fluido criogénico se mezcle adecuadamente con el aerosol del MQL [13].

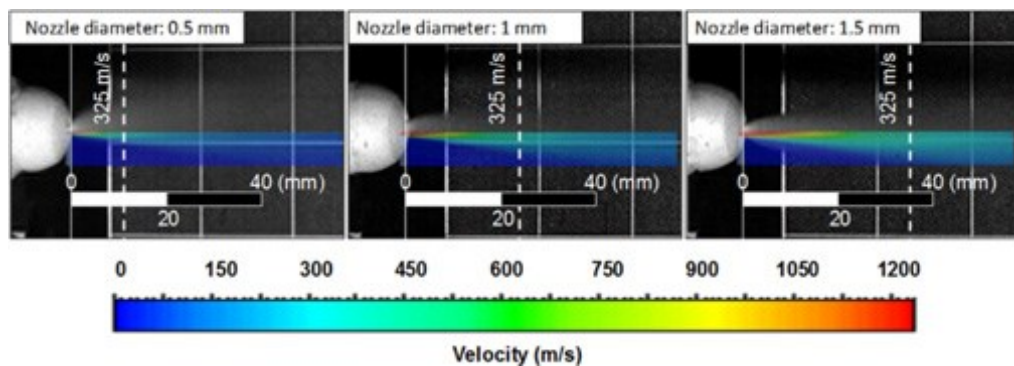


Figura 2. Influencia del diámetro de la salida de CO₂ en la velocidad y forma de inyección. Fuente: [4].

Otro factor que influye en la correcta salida del dióxido de carbono en estado líquido es la forma del orificio del racor, existen tres tipos de salida, recta, convergente y divergente estas opciones son las más viables porque, según la dinámica de fluidos clásica, un área más pequeña implica una mayor velocidad del fluido, aunque también se puede producir un flujo compresible lo que incrementaría la velocidad significativamente [4].

La siguiente etapa posterior al diseño del adaptador de boquilla consiste en realizar una adaptación al ámbito industrial considerando las necesidades del sector metalmeccánico y sus condiciones reales para poder desarrollar un equipo que cubra los requerimientos y exigencias en la fabricación mecánica garantizando la calidad del

producto e incrementando la vida útil de las herramientas de corte y al mismo tiempo disminuyendo la contaminación ambiental y efectos adversos en los operarios que se presentan con el uso de métodos convencionales de refrigeración y enfriamiento de las herramientas de corte.

El método de lubricación híbrida propuesto contribuye a disminuir el desgaste prematuro de las herramientas de corte y está enfocado principalmente para mecanizado de materiales de baja maquinabilidad que debido a su baja conductividad térmica y composición de matrices austeníticas tienden a endurecerse luego de cada pasada de corte con la herramienta, este comportamiento provoca un desgaste elevado de la herramienta y una baja tasa de remoción de material para dar forma al elemento [14].

En un estudio previo en el que se hizo uso de CO₂ criogénico y MQL como método de lubricación y refrigeración de la herramienta de corte realizado por [1], tomando en cuenta los valores promedio del desgaste máximo del flanco de los dos filos de corte. En la figura 3, se representa el desgaste [μm], vs a la tasa de eliminación de material [mm³], la longitud mecanizada [mm], y el tiempo mecanizado [min] [15].

El material que se utilizó para este estudio fue una aleación de Inconel®718 que es un material considerado como difícil de mecanizar, en la gráfica se puede apreciar la comparativa entre varios métodos de refrigeración y lubricación convencionales como la taladrina además del mecanizado en seco, el MQL y el CO₂ sin ninguna combinación [16].

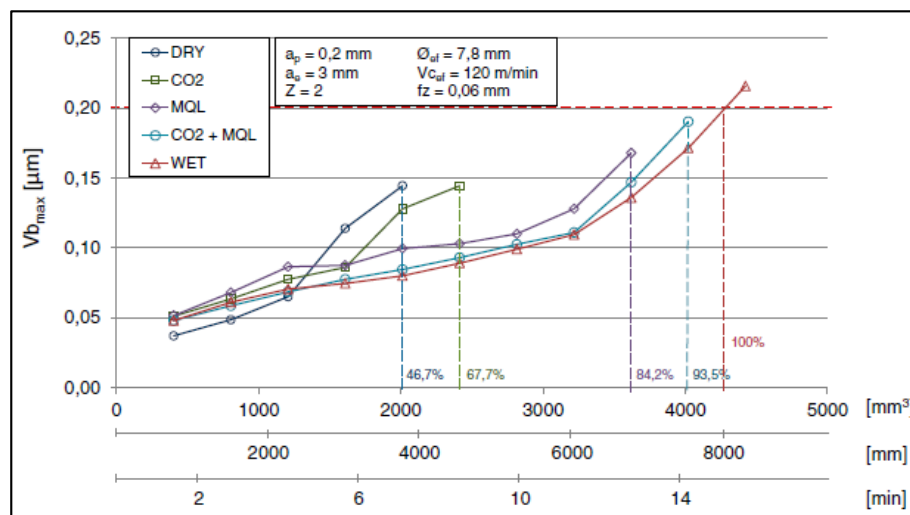


Figura 3. Comparativa de varios métodos de lubricación-refrigeración con el método CO₂+MQL y su influencia en la vida útil de la herramienta y la remoción del material. Fuente: [1].

En la figura 3 se puede apreciar que con el nuevo método propuesto mejoró considerablemente la vida útil de la herramienta de corte, además de la tasa de remoción del material, esto debido a que las bajas temperaturas alcanzadas garantizan que el material no se endurezca con cada pasada de la herramienta, debido a la composición del mismo y a las temperaturas generadas por la fricción, esto no se consigue con métodos tradicionales dado que el sistema propuesto baja la temperatura considerablemente a temperaturas inferiores a 0° C, además que el chorro favorece la evacuación de la viruta garantizando la calidad superficial del elemento mecanizado ya que no se forman virutas largas que puedan comprometer la superficie [17].

1.1.2 Uso de nano fluido en forma de aerosol en sistemas MQL.

El MQL es un sistema muy versátil al que se le puede adicionar otros elementos que puedan contribuir a mejorar el enfriamiento de la herramienta de corte como partículas en suspensión y otros elementos líquidos que mejoren la capacidad de disipación de calor del fluido de corte, uno de estos elementos son las nano partículas de dióxido de titanio que han sido adicionadas en el sistema MQL en estudios previos [18].

El uso de nano fluidos es una buena alternativa en los fluidos de corte constituyen una mezcla disgregada de partículas de tamaño nanométrico metálicas o no metálicas en un fluido base [19].

El uso de nanopartículas de dióxido de titanio ayuda a mejorar las propiedades térmicas y tribológicas del aceite vegetal del MQL en los procesos de mecanizado. En el trabajo “Investigación tribológica del fluido de corte a base de nanopartículas de TiO₂” El nano fluido desarrollado se caracteriza por su conductividad térmica y viscosidad para varias concentraciones de nanopartículas a diferentes temperaturas. Además, su rendimiento en procesos de mecanizado [19].

Los resultados obtenidos también se comparan con los del mecanizado en seco y el mecanizado con taladrina que es un fluido de corte convencional. El estudio experimental revela claramente que el rendimiento del nano fluido de TiO₂ en términos de rugosidad de la superficie, desgaste de la herramienta, fuerza de corte y morfología de la viruta es mejor en comparación con el mecanizado en seco, el mecanizado con el fluido de corte convencional [19].

El nano fluido se compone de una mezcla de nanopartículas de TiO_2 auto sintetizadas en diferentes proporciones por unidad de volumen como 0%, 0.25%, 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2% y 3% con emulsión de aceite vegetal 5% de volumen con algún agente que permita la suspensión de las nanopartículas en el fluido oleoso [19].

Para obtener una dispersión uniforme y una suspensión estable, se deben mezclar los componentes del nano fluido bajo vibración ultrasónica de forma continua durante largos periodos de tiempo. Usualmente se utilizan agitadores ultrasónicos que generan pulsos de 100 W a 36 ± 3 kHz además de agitadores magnéticos que rompen la aglomeración de las nanopartículas. Por otro lado es necesaria la adición de tensioactivos, para lograr una estabilidad adecuada, muchas veces es necesario repetir la mezcla mecánica y ultrasónica luego de cierto tiempo cuando las partículas empiezan a decantarse [19].

Para evitar una posible sedimentación o formación de grumos, siempre es necesario tener un nano fluido fresco y utilizarlo inmediatamente. Esta sustancia se caracteriza por su conductividad térmica y viscosidad para cada porcentaje en peso a diferentes temperaturas que depende de la concentración de nanopartículas en sus propiedades. La conductividad térmica del nano fluido se puede medir usando un Analizador de propiedades térmicas que se compone de un hilo caliente el cual mide la conductividad térmica y la resistividad a partir de la tasa de aumento de temperatura de la sonda para una tasa de calentamiento constante [19].

Otro parámetro para tomar en cuenta es la viscosidad del nano fluido que puede medirse utilizando viscosímetros digitales con un baño de temperatura controlada por computadora. Por otro lado, la capacidad calorífica específica se mide mediante calorimetría de barrido diferencial. La temperatura tanto de la muestra como de una sustancia de referencia se aumenta con la misma velocidad y el calor específico de la muestra se calcula midiendo la diferencia de calor requerida para elevar la temperatura [19].

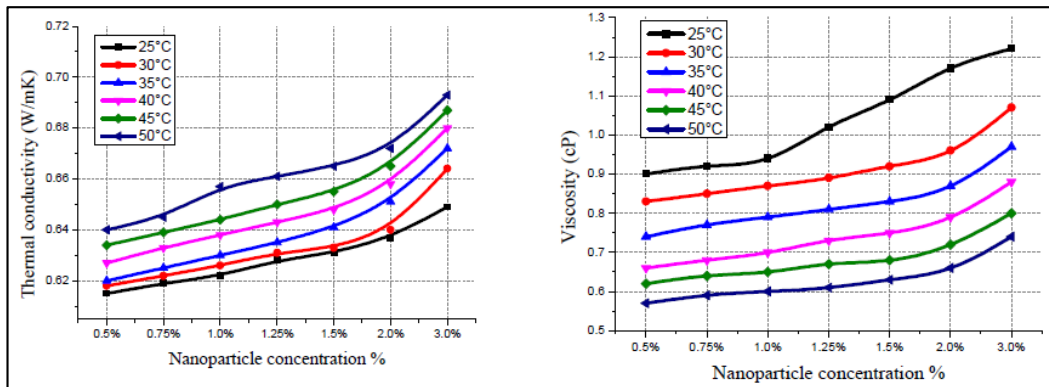


Figura 4. Propiedades físicas de un nano fluido de aceite vegetal y nano partículas de dióxido de titanio a diferentes concentraciones. Fuente: [19].

La conductividad térmica del nano fluido juega un papel muy importante en la disipación de calor de la pieza de trabajo, así como la viscosidad para garantizar una buena penetración en la zona de contacto de la herramienta de corte con la superficie mecanizada [20].

La conductividad térmica del nano fluido se incrementa en función de la concentración de nano partículas esto está justificado por la presencia de más elementos en suspensión lo que aumenta tanto la conductividad térmica como la viscosidad. La conductividad térmica elevada mejora el enfriamiento de la interfaz herramienta-pieza de trabajo, mientras que una mayor viscosidad crea un problema que es la caída de presión al rociar fluido con el sistema MQL [19].

Para equilibrar el beneficio obtenido debido a una mayor conductividad térmica y la potencia de bombeo del nano fluido a una viscosidad determinada, es necesario determinar la concentración más adecuada de TiO_2 en suspensión y escoger el método más adecuado de mezclado que en ese caso es el de ultrasonidos durante varias horas para obtener un fluido nano de corte estable en el tiempo [19]. Es importante que, en la operación de torneado, no exista precipitación de nanopartículas. Ni variación de calor específico ni densidad [21].

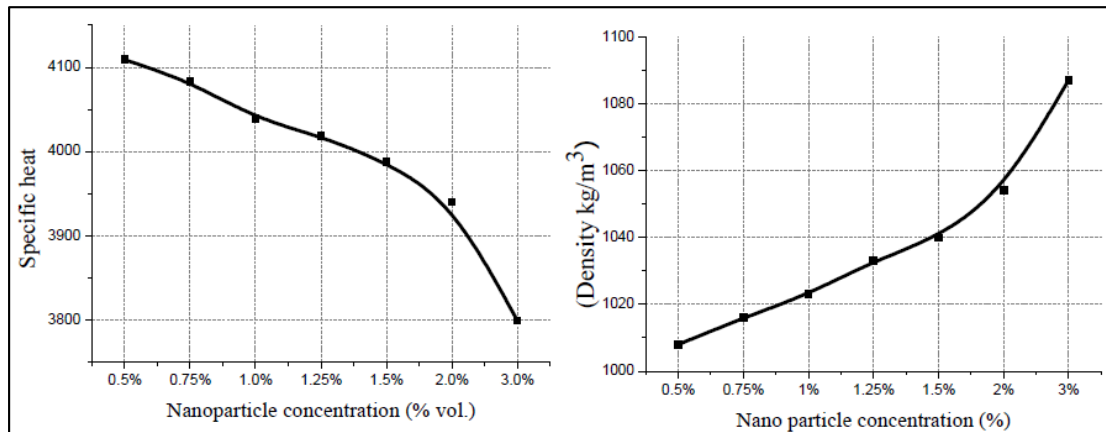


Figura 5. Variación del calor específico y la densidad en función de la concentración de nano partículas de TiO_2 en aceite vegetal. Fuente: [19].

La aplicación de fluido de corte con nano partículas de TiO_2 reduce significativamente las fuerzas de corte, en comparación con el fluido de corte convencional, húmedo y bajo MQL, esto se debe a un coeficiente de fricción reducido entre la herramienta y la pieza de trabajo debido a la acción rodante de las nanopartículas y al efecto lubricante del aceite vegetal. En el estudio realizado por [19]. el nano fluido de corte registró un 62,67%, 34,88% y 35,38% menos de fuerza en comparación con el mecanizado en seco, el mecanizado con taladrina y solo MQL [19].

Utilizando nano partículas de TiO_2 también se logra disminuir considerablemente el desgaste del flanco de la herramienta en el tiempo de mecanizado en diferentes condiciones y combinación de parámetros, en relación con otros métodos de lubricación y refrigeración convencionales. El fluido de corte enriquecido con nano partículas de dióxido de titanio en suspensión contribuye a disminuir el desgaste de la herramienta en diferentes operaciones de mecanizado [19].

Esta reducción en el desgaste de la herramienta puede deberse a una mejor difusión y penetración del nano fluido de corte en la zona de mecanizado lo que reduce significativamente la fuerza de fricción debido al efecto de rodamiento de bolas de las nanopartículas presentes en el aceite [19].

El desgaste de la herramienta se reduce en un 58,13% y un 35,85% en comparación con el mecanizado MQL solo con aceite, y convencional. Se puede concluir que el

desgaste de la herramienta con nano fluido de corte enriquecido con nano partículas de TiO_2 es comparable al del mecanizado con aceites emulsificables [19].

Por otro lado, la rugosidad superficial promedio de la superficie mecanizada al final de la operación de torneado con la aplicación de nano fluido de corte durante mejora en relación con todos los métodos convencionales. La presencia de nanopartículas en el fluido de corte mejora la disipación de calor y mejora en gran medida las propiedades humectantes y lubricantes de la cara de desprendimiento de la herramienta [22].

Esto provoca condiciones de mecanizado más suaves debido a las condiciones tribológicas que proporciona este método de refrigeración y lubricación las cuales contribuyen a la conservación de la dureza y la forma del filo de la herramienta. Con el uso de MQL + Nano TiO_2 durante el torneado, se observa que la rugosidad superficial promedio baja en un 34,7%, 11,64% y 7,22% en comparación con el mecanizado en seco, el mecanizado MQL y el mecanizado con taladrina, respectivamente [19].

Esta tecnología puede ser aplicada en varios procesos de mecanizado como el rectificado los resultados experimentales mostraron que el MQL cargado con nano partículas de dióxido de titanio podría, reducir significativamente las fuerzas en los procesos de rectificado y mejorar la calidad superficial. El MQL enriquecido con nano partículas de TiO_2 muestra un mejor rendimiento en comparación con otros sistemas MQL debido a la disminución de la fricción y al aumento de la capacidad de carga del elemento a mecanizar [23].

El nano fluido permite obtener mejores propiedades tribológicas y termo físicas y reducir las fuerzas de corte además de mejorar la rugosidad de la superficie, la temperatura de la zona de corte y el desgaste de la herramienta ya que un aumento de la concentración de volumen de nanopartículas aumenta la conductividad térmica, la viscosidad y la densidad del fluido, lo que, a su vez, aumentaba la capacidad de extracción de calor del fluido de corte y reducía la temperatura en la zona de contacto [24].

A Nandakumar en su trabajo de investigación “Evaluación experimental del rendimiento de lubricación MQL en procesos de rectificado de materiales compuestos de matriz de aluminio reforzados con nano SiC” concluye que la mejora en el proceso de rectificado por el uso de nano fluido se debe a diferentes mecanismos como la acción rodante de partículas esféricas de tamaño nanométrico, película protectora de superficie, efecto de costura y concentraciones de tensión de compresión de nanopartículas para reducir el desgaste y la fricción al ser mezcladas en un fluido de corte como un aceite vegetal biodegradable [5].

1.1.3 Influencia de los fluidos criogénicos en el desgaste de flanco de la herramienta de corte y calidad superficial de los elementos mecanizados.

El uso de fluidos criogénicos como fluido de corte es usado en la industria principalmente en el mecanizado de materiales con elevadas propiedades mecánicas como las súper aleaciones, el fluido más utilizado en este medio es el nitrógeno líquido LN2 con el que se han obtenido varios resultados positivos principalmente que tienen que ver con la vida útil prolongada de la herramienta de corte, debido a que las temperaturas más bajas alcanzadas durante el mecanizado tienden a inhibir el mecanismo de desgaste por adhesión de residuos de material en el filo de la herramienta de corte [25].

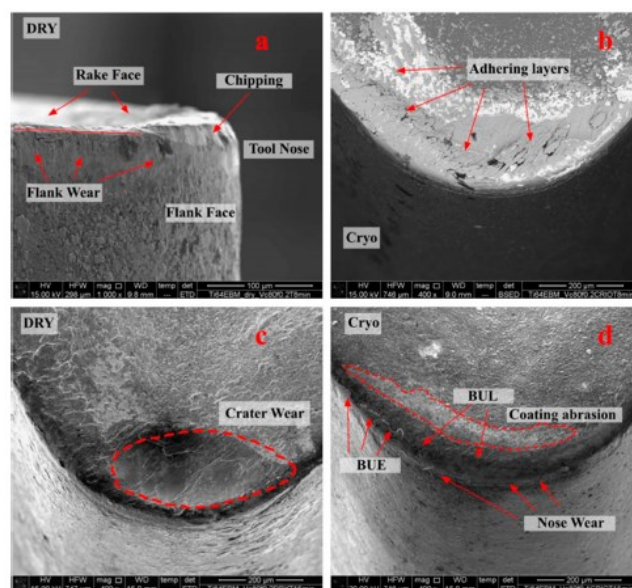


Figura 6. Variación del calor específico y la densidad en función de la concentración de nano partículas de TiO_2 en aceite vegetal. Fuente: [25].

En la figura 6 se puede apreciar varias diferencias entre un inserto evaluado en condiciones de corte en seco y uno en el que se usó un fluido criogénico, mediante microscopía electrónica de barrido se puede notar que el desgaste tanto de flanco como de cráter es mucho menor en el inserto que fue analizado haciendo uso de un fluido criogénico, el mecanismo de desgaste dominante de las herramientas de carburo de tungsteno durante el torneado los procesos de torneado es el de adhesión, debido a un fenómeno denominado disolución – difusión, que es producto de las altas temperaturas que se generan en la herramienta de corte debido a la fricción y a la composición química de algunos metales que producen el entorno ideal para la difusión y adhesión para que los elementos del material de la pieza de trabajo se adhieran a las superficies de la herramienta, por ello las temperaturas más bajas alcanzadas durante el torneado enfriado con fluidos criogénicos tienden a inhibir el mecanismo de desgaste adhesivo [26].

El mecanismo de desgaste adhesivo afecta gravemente al flanco de la herramienta por ello es necesario evitar la exposición directa del material de la herramienta a la pieza giratoria, limitando el efecto de rozamiento y tratando de disminuir lo más posible la temperatura, por ello los fluidos criogénicos son ideales principalmente cuando el material tiene una elevada dureza [27].

1.2 Justificación.

En la presente investigación se optimizó el proceso de torneado del acero AISI 304 mediante lubricación y enfriamiento con nano fluido criogénico, con la finalidad de aumentar la vida útil del inserto, y disminuir los costos en el proceso, principalmente los relacionados con la vida útil de las herramientas de corte, además de mejorar el acabado superficial de las piezas fabricadas con este material, proponiendo un nuevo sistema sustentable que contribuya con la disminución del uso de taladrina, dado que los aceites emulsificables que contiene constituyen un residuo difícil de eliminar, que produce efectos adversos en el medio ambiente y en la salud de los operarios de las máquinas herramientas.

El principal interés del presente proyecto es optimizar un sistema MQL, amigables con el medio ambiente como son los aceites vegetales y el CO₂ envasado en los distintos

procesos de manufactura, la investigación aportó un enfoque teórico práctico a nivel nacional del desarrollo de procesos mejorados en operaciones de torneado de aceros inoxidables, y de materiales de baja maquinabilidad además de ser un campo de investigación innovador y sustentable en la actualidad.

1.3 Problema:

Actualmente en el sector manufacturero se realizan procesos de maquinado y fabricación de elementos mecánicos, por arranque de viruta, con métodos de refrigeración/lubricación tradicionales de inundación con taladrina, los cuales no disipan el calor generado por fricción de manera efectiva, además estos pueden causar enfermedades al operador, dañar la herramienta de corte, afectar el acabado superficial del elemento mecánico, afectar considerablemente al medio ambiente e incrementar los costos de producción en las empresas por gastos de tratamiento de residuos.

1.4 Objetivos (Descripción del cumplimiento de objetivos):

1.4.1 Objetivo general

Optimizar el proceso de torneado del acero AISI 304 mediante el sistema de lubricación / enfriamiento con nano fluido criogénico.

- Para cumplir el objetivo general se han planteado 4 objetivos específicos que involucran el análisis de varios parámetros de funcionamiento del sistema de lubricación/refrigeración híbrida propuesto para el torneado del acero AISI 304.

1.4.2 Objetivos específicos

1. Determinar la incidencia de los parámetros del sistema de lubricación / enfriamiento con nano fluido MQL $TiO_2 + CO_2$ criogénico en la rugosidad superficial del torneado del acero AISI 304

- Se realizarán análisis de rugosidad superficial con mediciones realizadas con un rugosímetro Mitutoyo SJ 210 bajo la norma ISO 4287, en probetas evaluadas con los distintos parámetros planteados en la investigación, realizando una comparativa de cada una.

2. *Determinar la incidencia de los parámetros del sistema de lubricación / enfriamiento con nano fluido MQL TiO₂ + CO₂ criogénico en el desgaste de las herramientas de corte del torneado del acero AISI 304 mediante microscopía de barrido.*

- El desgaste de flanco de las herramientas de corte será evaluado mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) en la cual se realizarán mediciones del desgaste de flanco a diferentes tiempos de mecanizado en cada experimento propuesto, bajo la norma ISO 3685 lo que ayudara a realizar una comparativa entre cada variación de parámetros que se realice.

3. *Optimizar mediante CFD el proceso de torneado del acero AISI 304 utilizando lubricación / enfriamiento con nano fluido MQL TiO₂ + CO₂ criogénico.*

- Para cumplir este objetivo se evaluarán todos los parámetros propuestos mediante fluido dinámica computacional CFD y se seleccionará la configuración más adecuada de número de racores y ángulo de salida que brinde los mejores resultados en el proceso de torneado del acero AISI 304.

4. *Realizar ensayos experimentales de los casos optimizados para validar el modelo en el dominio computacional propuesto.*

- Se validarán los resultados obtenidos en el análisis computacional mediante el banco de pruebas Cryo MQL construido, realizando mediciones de los diferentes resultados de la simulación.

1.5 Hipótesis

El cambio de orientación y número de racores en el sistema de lubricación/enfriamiento híbrido MQL+ Nano TiO₂ y CO₂ criogénico, optimizará el proceso de torneado del acero AISI 304

Variable dependiente.

El proceso de Torneado de acero AISI 304

Variable Independiente.

Orientación y número de racores en el sistema de lubricación/enfriamiento híbrido MQL+ Nano TiO₂ y CO₂ criogénico.

1.6. Operacionalización de variables.

1.6.1. Variable dependiente

Tabla 1. Operacionalización de variables variable dependiente.

Variable dependiente	Categoría	Indicador	Ítems	Técnicas e instrumentos
Se evaluarán varios indicadores que muestran el desempeño del proceso de torneado del acero AISI 304 mediante el uso del sistema de refrigeración criogénica CO ₂ + Nano TiO ₂	Calidad superficial Rugosidad	Ra	Longitud de muestreo ln=0.8 mm	- Observación
		Rz		- Rugosímetro SJ-210
				- Hojas de registros de datos
	Vida útil de la herramienta de corte	Criterio de desgaste	VBB = 0,3 mm	- Observación
				- Norma ISO 3685
				- Microscopio electrónico de barrido
				- Hojas de registros de datos

1.6.2. Variable independiente

Tabla 2 Operacionalización de la variable independiente

Variable independiente	Categoría	Indicador	Ítems	Técnicas e instrumentos	
El sistema de lubricación/enfriamiento híbrido MQL + Nano TiO ₂ y CO ₂ criogénico se compone de accesorios como tubería, válvulas, accesorios de unión y distribución mangueras y un adaptador de boquilla que direcciona el fluido criogénico hacia la herramienta de corte.	Fluido criogénico	CO ₂ líquido y gaseoso	Líquido Gaseoso	- Hojas de registros de datos	
	Sistema de mezcla del fluido criogénico	Válvulas, cañerías, racores, mangueras, cilindros de CO ₂	Accesorios para gas, presión de operación de 60 bares		- Materiales de construcción
	Sistema MQL	Presión	Presión	2 bares	- Accesorios de medición y regulación de presión y caudal
			Caudal	480 ml/h	
	Aceite lubricante	Biodegradable	Coolube 2210 EP		
	Nano partículas	No tóxicas	TiO ₂		
	Nano fluido	Concentración	0,5% de concentración de las nano partículas en función del peso del aceite	- Balanza analítica de 5 dígitos - Impresión 3D de prototipos	
	Boquilla de aplicación	Número de racores	2 y 3	- Construcción mediante mecanizado.	
	Ángulo de direccionamiento	45° y 30°			

CAPÍTULO II

METODOLOGÍA

2.1. Materiales.

En esta sección se detallan todos los insumos, equipos y recursos que fueron utilizados para llevar a cabo la investigación en sus diferentes etapas.

2.1.1. Torno Convencional

Es una máquina herramienta que permite obtener elementos mecánicos de revolución, haciendo girar el elemento sujeto al cabezal o mandril fijado en un punto de centro, mientras una cuchilla o plaquita fijada en un carro que se desliza sobre guías o rieles paralelos al eje de revolución del elemento avanza con un movimiento manual, automático o semi automático contra la superficie de la pieza, de acuerdo a condiciones calculadas como velocidad de giro del husillo y el avance por unidad de longitud.

Existen varios tipos de torno que van desde los más sencillos como los tornos paralelos a los más sofisticados de control numérico, la máquina herramienta utilizada para esta investigación es un torno paralelo de control semi automático que permitirá fijar los parámetros de corte calculados para cada experimento

El sistema de lubricación híbrida propuesto puede también ser implementado en tornos de control numérico computarizado CNC.



Figura 7. Torno Semiautomático. Fuente: Autor.

2.1.2. Plaquitas de metal duro.

Son insertos intercambiables de un material sinterizado que incluye partículas duras de carburo de tungsteno aglutinadas con un material aglomerante de cobalto, este material ofrece una buena resistencia a la rotura y al desgaste propio de las operaciones de mecanizado. Hoy en día este tipo de herramientas son ampliamente utilizadas por su versatilidad y amplio campo de aplicaciones.

Para el presente trabajo de investigación se seleccionó una plaquita rómbica de 80 grados, marca Sandvik con la designación CNMG 120408 MF 2025 que es adecuada para mecanizar acero inoxidable.

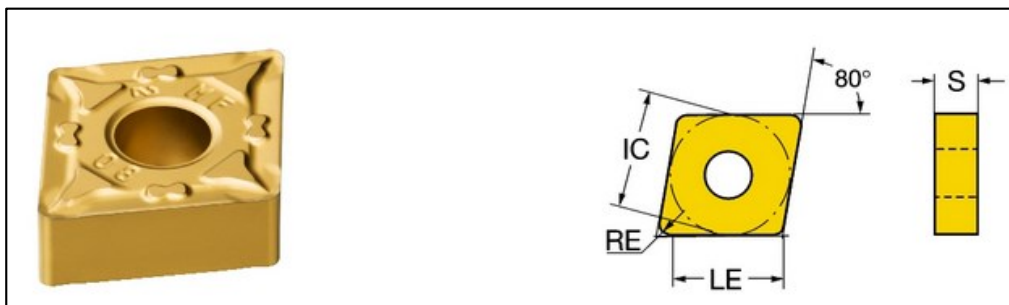


Figura 8. Geometría de la herramienta de corte seleccionada. Fuente: [28].

2.1.3 Selección de la plaquita seleccionada.

Antes de escoger la plaquita adecuada para las condiciones de corte establecidas y el material de las probetas es necesario tomar en cuenta varios parámetros como el material de la plaquita, su geometría, el tipo de operaciones y los parámetros de corte descritos por el fabricante.

2.1.4 Selección de la calidad de plaquita.

La calidad del inserto se escoge en función del material de la pieza a mecanizar, al tratarse de un acero inoxidable es adecuado seleccionar una plaquita tipo M. Dado que en este tipo de materiales la herramienta de corte se expone a gran cantidad de calor, desgaste en entalla o filo de aportación.



Figura 9. Geometría de la herramienta de corte seleccionada. Fuente: [28].

La maquinabilidad de los aceros inoxidables se modifica en función de los elementos de aleación, y los tratamientos térmicos que pueden darse por tal motivo la calidad de plaquita debe garantizar una buena calidad superficial y una vida útil prolongada en diversas condiciones de corte.

2.1.5 Recubrimiento del Inserto.

Sandvik proporciona tres tipos de recubrimiento en sus herramientas de corte que pueden ser aplicadas según las condiciones de corte, para este caso seleccionaremos el recubrimiento CVD GC4335 el cual garantiza el desbaste y acabado incluso en condiciones intermitentes.

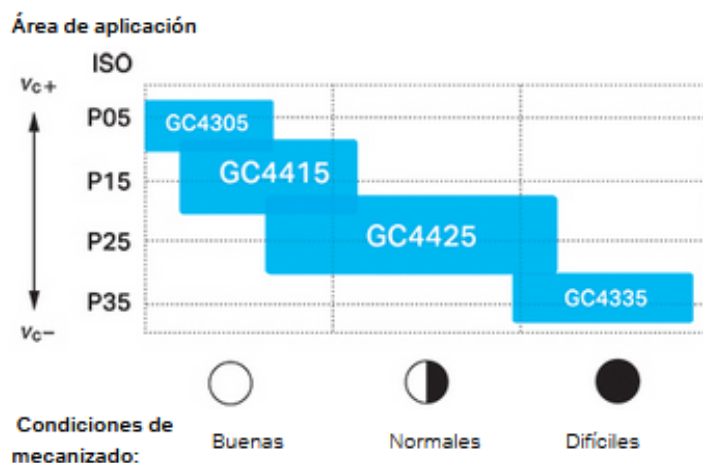


Figura 10. Geometría de la herramienta de corte seleccionada. Fuente: [28].

2.1.6 Geometría de la plaquita de torneado.

La herramienta se designa bajo la norma ISO 1832 en la cual se define al inserto con un código de letras y números que se describen a continuación, estos símbolos describen adecuadamente la geometría del inserto.

2.1.7 Forma del Inserto.

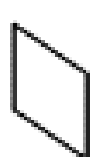
II Equilateral but non-equiangular inserts	C	Rhombic inserts	80°	
	D		55°	
	E		75°	
	M		86°	
	V		35°	

Figura 11. Geometría de la herramienta de corte seleccionada. Fuente: [28].

El inserto seleccionado tiene una forma rómbica de 80 grados, lo cual permite varias operaciones principalmente las de cilindrado exterior y refrentado dado que su forma se adapta a las superficies paralelas del elemento mecánico.

2.1.8. Símbolo de espacio libre normal.

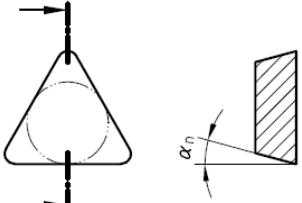
	A	—	3°
	B	—	5°
	C	—	7°
	D	—	15°
	E	—	20°
	F	—	25°
	G	—	30°
	N	—	0°
	P	—	11°
	O	—	Other normal clearances requiring a special specification

Figura 12. Ángulo de espacio libre normal. Fuente: [28].

Corresponde al ángulo del borde del inserto en relación con la parte superior del filo, para este caso se selecciona un ángulo nulo dado que el portaherramientas proporciona el ángulo más adecuado.

2.1.9 Símbolo de clase de tolerancia.

Corresponde a las tolerancias aplicables en todos los parámetros dimensionales del inserto como el círculo inscrito, su espesor, su radio de punta y sus ángulos de ataque e incidencia.

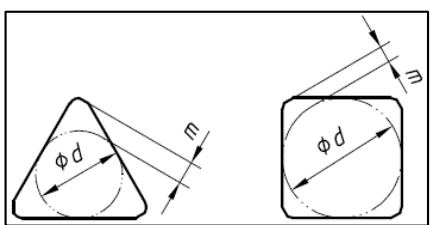
			
M	from $\pm 0,05$ } to $\pm 0,15$ } _b	from $\pm 0,08$ } to $\pm 0,2$ } _b	$\pm 0,13$

Figura 13. Características dimensionales del inserto en donde se aplican las tolerancias. Fuente: [28].

2.1.10. Símbolo de rompe virutas.

Corresponde a la designación, geometría y cantidad de rompe virutas presentes en el inserto la función de esta característica de la herramienta de corte es mejorar el control de la viruta y reducir la resistencia de corte además de proporcionar un mejor equilibrio en las condiciones de corte y optimizar el rendimiento del maquinado.

La letra **G** en la codificación del inserto seleccionado corresponde a una geometría con rompe virutas en cada filo a ambos lados del inserto.

Dimensiones de la herramienta de corte.

Según la norma ISO 1832 los números siguientes de la codificación del inserto corresponden al ancho de filo, espesor del inserto y radio de punta, de la siguiente manera.

12: Ancho de filo 12 mm

04: Espesor del inserto 4 mm.

08: Radio de punta 0.8 mm.

Tipo de operación del inserto.

La designación **MF** especifica que los materiales que constituyen el inserto están optimizados para operaciones de acabado.

Condiciones de mecanizado.

La numeración de cuatro dígitos al final del código corresponde a la calidad de la plaquita según su tipo de operación, en este caso se trata de la numeración 2025 lo que quiere decir que el inserto seleccionado está compuesto por materiales optimizados para condiciones difíciles, ya que el recubrimiento CVD y el material del alma del inserto permiten operaciones en corte continuo e intermitente lo que lo hace adecuado para materiales con baja maquinabilidad.

De la tabla 3 se seleccionaron los parámetros de corte recomendados por el fabricante para las operaciones de torneado exterior.

Tabla 3. Selección del inserto usado en los experimentos del trabajo de investigación del catálogo del fabricante. Fuente: [28].

		Condiciones buenas ○					Condiciones normales ●					Condiciones difíciles ●				
	CÓDIGO ISO	Geometría	Calidad	vc m/ min	f _n mm/r	a _p mm	Geometría	Calidad	vc m/ min	f _n mm/r	a _p mm	Geometría	Calidad	vc m/ min	f _n mm/r	a _p mm
P	CNMG 12 04 04	-PF	4315	530	0.15	0.40	-PF	4325	440	0.20	0.40	-PM	4335	250	0.20	3.00
	CNMG 12 04 08	-PF	4315	490	0.20	0.40	-PF	4325	405	0.20	0.40	-PM	4335	215	0.30	3.00
	CNMG 12 04 12	-PF	4315	460	0.25	0.80	-PF	4325	380	0.25	0.80	-PM	4335	200	0.35	3.00
M	CNMG 12 04 04	-MF	2015	275	0.15	0.40	-MF	2220	255	0.15	0.40	-ME	2025	215	0.15	0.40
	CNMG 12 04 08	-MF	2015	250	0.20	0.60	-MF	2220	230	0.20	0.60	-MF	2025	195	0.20	0.60
K	CNMG 12 04 04	-KF	3210	345	0.15	0.50	-KF	3225	235	0.15	0.50	-KF	3225	235	0.15	0.50
	CNMG 12 04 08	-KF	3210	330	0.20	0.75	-KF	3225	225	0.20	0.75	-KM	3225	190	0.35	3.00
	CNMG 12 04 12	-KF	3210	310	0.25	1.00	-KF	3225	210	0.25	1.00	-KM	3225	185	0.40	3.00
S	CNMG 12 04 04	-SF	1105	80	0.12	0.40	-SF	1115	65	0.12	0.40	-SF	1125	35	0.12	0.40
	CNMG 12 04 08	-SF	1105	80	0.15	0.50	-SF	1115	65	0.15	0.50	-SF	1125	34	0.15	0.50
	CNMG 12 04 12	-SF	1105	75	0.17	0.80	-SF	1115	60	0.17	0.80	-SM	1125	26	0.28	2.00

Sin embargo, en el catálogo también se pueden encontrar las velocidades mínimas y máximas que también son de utilidad en el cálculo de las condiciones de corte de los experimentos propuestos las cuales se muestran a continuación.

M	ap 0.6 mm(0.15-1.5) fn 0.2 mm/r(0.1-0.4) vc 195 m/min(235-14)
---	---

Figura 14. Parámetros de mecanizado, máximos recomendados y mínimos para el inserto CNMG 120408 MF 2025. Fuente: [28].

Velocidad de corte recomendada (Vc): 195 m/min

Avance de torreta recomendada (Vf): 0.2 mm/rev

Profundidad de corte recomendada: 0.6 mm

Velocidad de corte máxima (Vc): 235 m/min

Avance de torreta máxima (Vf): 0.4 mm/rev

Profundidad de corte máxima: 1.5 mm

Velocidad de corte mínima (Vc): 145 m/min

Avance de torreta mínima (Vf): 0.1 mm/rev

Profundidad de corte mínima: 0.15 mm

2.1.11. Selección del porta herramientas.

Consiste en un dispositivo de sujeción del inserto de torneado a una barra metálica que se posiciona en la torreta del torno. La selección se debe realizar tomando en cuenta la geometría de la plaquita además del sentido de corte y las condiciones de la superficie a maquinar.

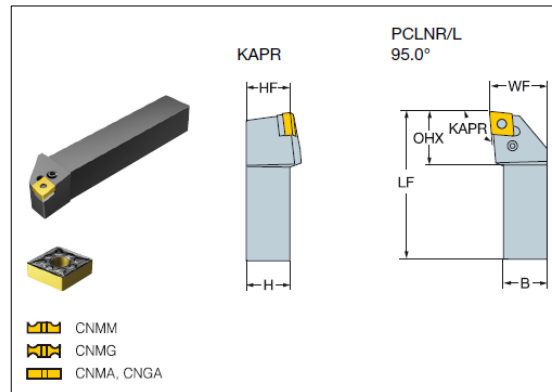


Figura 15. Parámetros del porta insertos seleccionado para la plaquita CNMG 120408 MF 2025. Fuente:[28].

El porta insertos seleccionado corresponde a la designación PCLNR/L 95° las dimensiones se presentan en la tabla 2.

	CZC _{MS}	OHX	Código de pedido	Dimensiones, mm						MIID		
				B	H	LF	WF	HF	NM		KG	
	12	20 x 20	27.2	PCLNR/L 2020K 12	20.0	20.0	125.0	25.0	20.0	5.0	0.43	CNMG 12 04 08
		25 x 25	27.2	PCLNR/L 2525M 12	25.0	25.0	150.0	32.0	25.0	5.0	0.76	CNMG 12 04 08

Figura 16. Selección del porta insertos para la plaquita seleccionada. Fuente: [28].

2.2. Sistema MQL.



Figura 17. Sistema de mínima cantidad de lubricante para herramientas de mecanizado.

Fuente:[Autor].

Este tipo de sistemas funciona con aire comprimido y forma un aerosol que es dirigido a la zona de contacto de la herramienta con la superficie mecanizada optimizando el consumo de fluido de corte dado que se utilizan comúnmente aceites minerales y vegetales para disminuir la fricción en el par tribológico, aumentando la vida útil de la herramienta, aunque se tiene una buena lubricación mediante el uso del aceite este método carece de un sistema que baje la temperatura en la herramienta generada por la fricción, por ello es necesario implementar un sistema de lubricación híbrida que involucre el uso de un gas criogénico y aceite cargado de nano partículas de dióxido de titanio para evacuar el calor resultante de la fricción en la herramienta de corte.

2.3. Aceite vegetal para el sistema MQL.

Es un lubricante que está formulado como aceite para corte y lubricante para metales, madera, caucho y la mayoría de los plásticos. Es de origen natural, no tóxico, no genera manchas y no se oxida. El fluido de corte no contiene ningún ingrediente actualmente reconocido como peligroso por las organizaciones que regulan la salud ocupacional. El aceite de mecanizado nunca causará enfermedades en el operario y está formulado a partir de materias primas naturales, lo que lo hace completamente amigable con el medio ambiente [29].



Figura 18. Aceite vegetal para mecanizado. Fuente: [29].

2.4. Nano partículas de dióxido de Titanio.

Este compuesto químico es ampliamente utilizado en el mercado principalmente en la industria farmacéutica principalmente en la fabricación de bloqueadores solares dado que es un buen filtro UV tienen un tamaño de 1 a 100 nanómetros constituyen un buen medio para disipar el calor y por su forma son adecuadas para contribuir a disminuir la fricción en el par tribológico herramienta-pieza de trabajo. Al ser un compuesto químico que constituye un semiconductor tipo n sensible a la luz que es capaz de absorber radiación electromagnética presenta buenas propiedades para transportar calor por lo que es adecuado para ser usado en el sistema de mínima cantidad de lubricante para mejorar el enfriamiento de la herramienta y mejorar las propiedades lubricantes del fluido de corte propuesto.

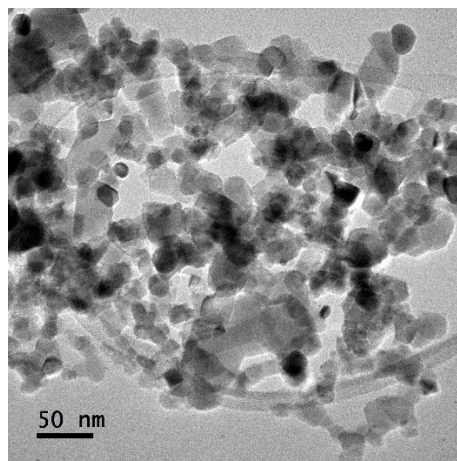


Figura 19. Microscopía de nanopartículas de dióxido de titanio donde se aprecia su tamaño en una escala de 50 nm. Fuente: [30].

2.5. CO₂ Criogénico.

Es un gas licuado ligeramente ácido que no presenta inflamabilidad, tiene las propiedades de ser inodoro e incoloro, es más pesado que el aire y es soluble en agua.

Para ser considerado como un compuesto amigable con el medio ambiente, proviene de fuentes de CO₂ obtenido mediante procesos residuales de la industria del petróleo como también de la combustión de gas natural, luego es envasado en recipientes de presión donde se almacenan de 3 a 7 m³ de volumen de gas.

El fluido criogénico utilizado en este trabajo de investigación es suministrado de forma líquida directamente del depósito con ayuda de otro recipiente de presión cuya función es presurizar los conductos y arrastrar el CO₂ líquido a la salida del racor.

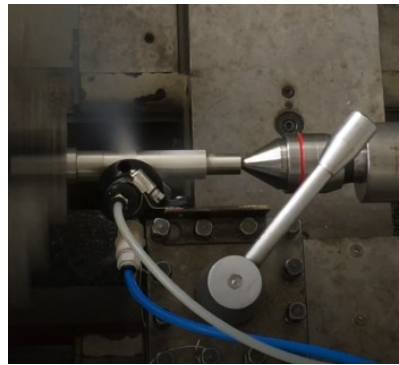


Figura 20. Salida de CO₂ líquido hacia la zona de contacto pieza-herramienta. Fuente: Autor.

2.6. Acero Inoxidable AISI 304

Las probetas para evaluar el desgaste de la herramienta de corte y el acabado superficial están constituidas de acero Inoxidable AISI 304 que es un acero cromo-níquel con bajo contenido de carbono y resistente a la corrosión intercrystalina hasta 300 °C es ampliamente usado principalmente en la industria alimenticia ya que resiste el efecto corrosivo del agua y algunos agentes químicos. Sus propiedades mecánicas se presentan en las tablas 4 y 5.

Tabla 4. Propiedades mecánicas del Acero inoxidable AISI 304. Fuente: [3].

Propiedades mecánicas	Valor.
Resistencia mecánica	520 N/mm ²
Punto de fluencia.	220 N/mm ²
Elongación min.	20%
Dureza Rockwell B	249-278

Tabla 5. Propiedades químicas del acero AISI 304. Fuente: [3]

Componente	Porcentaje
Carbono	0-0.08%
Silicio	0-1%
Manganeso	0-2%
Fosforo	0-0,045%
Azufre	0-0.03%
Níquel	8-10.5%
Cromo	18-20%

2.7. Microscopio electrónico de barrido SEM.

Es un equipo que consiste en varios instrumentos que permiten la caracterización y observación de muestras sólidas, mediante el uso de electrones secundarios retro dispersados, el equipo se compone de una cámara de vacío donde se encuentra el porta objetos, en donde se montan las muestras metálicas mediante cinta de carbono, un material conductor que facilita el paso de energía, para que el espectrómetro de energía dispersiva de RX obtenga la imagen de micrografía mediante un análisis químico semicuantitativo en la muestra.

Este equipo permite obtener aumentos de hasta 100000X lo que lo hace un instrumento idóneo para obtener dimensiones de defectología en herramientas de corte desgastadas y poder medirlas en micras.



Figura 21. Microscopio Electrónico de Barrido SEM. Fuente: Autor

2.8. Rugosímetro Mitutoyo SJ-210.

Es un equipo que permite analizar la calidad superficial de los elementos mecánicos, el modelo SJ-210 tiene una amplia gama de aplicaciones y permite la lectura de los resultados de calidad superficial en los rangos de Ra, Rz y Rq, tiene un palpador de punta de diamante con un radio de 2 μm y utiliza un método inductivo para efectuar la medición a 0,25 y 0,5 mm/s, siempre es necesario calibrar el equipo mediante el uso de galgas de calibración para garantizar la exactitud en la medición, además es necesario ubicar el palpador adecuadamente en la superficie del eje con la finalidad de evitar cualquier desviación que comprometa la exactitud de la medida de la rugosidad.

Las galgas más comunes empleadas en la calibración del equipo tienen una rugosidad Ra de 2.94 μm , siempre es necesario corroborar este valor con el patrón estándar antes de efectuar cualquier medición.



Figura 22. Rugosímetro Mitutoyo SJ-210 y su calibración con un patrón estándar.

2.9. Sistema criogénico de CO₂ Líquido + MQL.

Comprende una serie de instrumentos, equipos y materiales que son los encargados de suministrar el fluido de CO₂ criogénico juntamente con el MQL hacia la zona de contacto de la herramienta y la pieza de trabajo. El sistema está compuesto de:

1. Recipientes de CO₂ líquido y Gaseoso.
2. Tubing de Acero Inoxidable 316-L.
3. Electroválvula de presión baja.
4. Electroválvula de alta presión.

5. Accesorios de unión, codos, uniones tipo T y neplos.
6. Accesorios de conexión Rápida Unilok.
7. Válvulas de alivio de presión.
8. Válvula de Control de Flujo.
9. Mangueras de Poliuretano.
10. Boquilla distribuidora.
11. Racores.
12. Sistema electrónico de control.
13. Sistema eléctrico.

En la figura 23 se aprecia el sistema criogénico y todos sus componentes que se usa para dosificar el fluido de corte en toda la operación de mecanizado.



Figura 23. Sistema criogénico de distribución y dosificación de CO₂. Fuente: Autor

2.10. Metodología.

2.10.1. Diseño experimental.

Para establecer las combinaciones de cada parámetro de funcionamiento del sistema criogénico se tomaron en cuenta 2 velocidades de corte la recomendada por el fabricante y la máxima que corresponden a 195 y 235 m/min respectivamente, el avance por revolución se mantiene constante a 0,2 mm/rev, se variará el ángulo de orientación de los racores respecto al eje de la pieza de trabajo a 30° y 45° además del número de salidas ya que se usarán 2 y 3 en la boquilla distribuidora.

El arreglo ortogonal corresponde a L8 dado que se tiene se tienen 3 factores de control con dos niveles cada uno y en la matriz mostrada en la tabla 6 se muestran todas las posibles combinaciones utilizando todos los parámetros.

$$\#Experimentos = N^f$$

$$\#Experimentos = 2^3$$

$$\#Experimentos = 8 \text{ Experimentos.}$$

Tabla 6. Diseño experimental para la investigación propuesta, utilizando todos los parámetros con los cuales se realizarán las comparaciones. Fuente: Autor.

Experimento	Velocidad de corte	Avance	Cant. De Racores	Ángulo de salida	Fluido de Trabajo
1	195	0,2	2	45	CryoMQL+Nano TiO2 5%
2				30	
3			3	45	
4				30	
5	235		2	45	
6				30	
7			3	45	
8				30	

Mediante el diseño planteado se realizó una comparación de cada uno y se pudo escoger el que proporciona los resultados más favorables en cuanto a calidad superficial y desgaste de flanco de la herramienta de corte, las mediciones de desgaste de flanco mediante microscopía electrónica de barrido se realizarán cada 5 minutos según la norma ISO 3685 mientras que la calidad superficial fue medida a las 5 primeras pasadas para garantizar un buen acabado superficial dado que el inserto no se desgasta significativamente en los primeros minutos de mecanizado.

2.10.2. Cálculo de parámetros de mecanizado.

En esta sección se obtuvieron los valores para la velocidad de husillo, el avance de la torreta porta herramientas y la profundidad de corte, para el cálculo se utilizaron los valores para velocidad de corte y avance establecidos en la tabla 4 del diseño experimental donde se tomaron en cuenta los valores establecidos por el fabricante de la herramienta de corte.

Cálculo de la velocidad de husillo y avance de torreta.

Para obtener este parámetro partimos de las ecuaciones 1 y 2 que comprende los siguientes parámetros y valores.

Velocidad de husillo.

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

Donde.

S: Velocidad de husillo (rpm)

V_c: Velocidad de corte teórica o recomendada por el fabricante. (m/min)

D: Diámetro del eje en bruto. (mm)

Velocidad de avance.

$$V_f = S * f$$

Donde:

V_f: Velocidad de avance de la torreta (mm/min)

S: Velocidad de husillo. (rpm)

f: Avance por revolución (mm/rev)

Experimentos 1 a 4.

$$S = \frac{1000(195 \text{ m/min})}{\pi(38.1 \text{ mm})}$$

$$S = 1629.145 \text{ rpm}$$

$$V_f = 1629.145 \text{ rpm} \left(0.2 \frac{\text{mm}}{\text{rev}}\right)$$

$$V_f = 325.83 \text{ mm/min}$$

Experimentos 5 a 8

$$S = \frac{1000(235 \text{ m/min})}{\pi(38.1 \text{ mm})}$$

$$S = 1963.33 \text{ rpm}$$

$$Vf = 1963.33 \text{ rpm} \left(0.2 \frac{\text{mm}}{\text{rev}}\right)$$

$$Vf = 392.66 \text{ mm/min}$$

Estos parámetros corresponden a los valores que se deben configurar en la máquina herramienta para efectuar los ensayos, en el torno convencional se pueden ingresar estos valores por medio de una combinación de engranajes, mientras que un torno CNC mediante programación ISO.

2.10.3. Análisis y optimización de la boquilla distribuidora por medio de Dinámica de fluidos computacional (CFD).

En esta etapa del estudio se validarán los resultados obtenidos en la práctica variando los parámetros del sistema de distribución como:

- Cantidad de racores.
- Ángulo de orientación del racor respecto al eje de la pieza de trabajo.

Mediante fluido dinámica computacional que consiste en un método de volúmenes finitos que permitirá estimar cómo se comportan los dos fluidos que componen el medio de refrigeración-lubricación propuesto y conocer cómo se realiza la combinación a la salida así como también cual es la configuración de parámetros más favorables que garanticen que el fluido del sistema de mínima cantidad de lubricante y fluido criogénico lleguen de manera adecuada a la zona de contacto de la herramienta con la pieza de trabajo.

Para este análisis se han planteado 4 modelos de boquilla distribuidora variando el ángulo de orientación de los racores y la cantidad de estos, el diámetro de salida de cada racor de CO₂ se mantiene constante, así como la posición de la salida del sistema MQL.

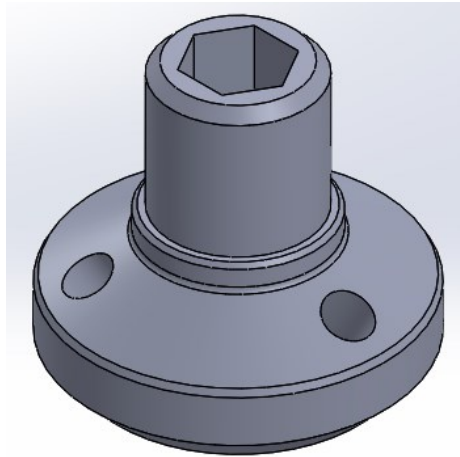


Figura 24. Boquilla soporte para la distribución de CO₂ criogénico y aceite enriquecido con nano partículas de dióxido de titanio. Fuente: Autor

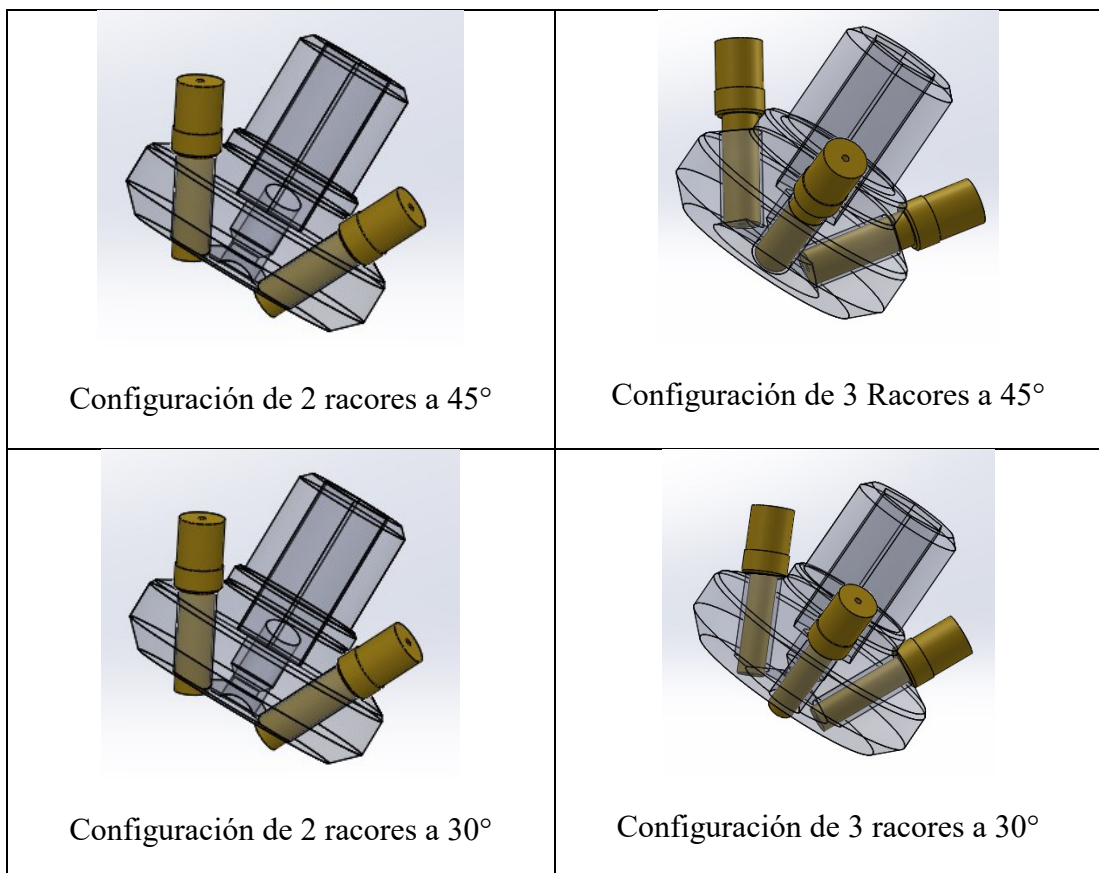


Figura 25. Modelos 3D de las diferentes configuraciones en la boquilla distribuidora. Fuente: Autor

2.10.4. Modelo CFD.

El estudio mediante fluido dinámica computacional se centra principalmente en analizar la velocidad de salida del fluido criogénico y el caudal para conocer si es posible optimizar el consumo de CO₂ en los depósitos líquido y gaseoso, los

adaptadores de boquilla diseñados consisten en soportes que orientan los racores de salida a ángulos de 30° y 45° además de fijar su cantidad en 2 y 3 unidades, el tipo de salida es recta a 1.5 mm lo cual permite que la velocidad de salida del CO₂ se incremente debido al cambio de sección presente en las cañerías y accesorios de unión [31].

El modelo CFD planteado para la simulación es VOF (Volume of Fluid) esto permite realizar una simulación computacional de dos o más fluidos que no se mezclan, lo cual es ideal para el caso de estudio dado que son dos fluidos inter penetrantes diferentes, el modelo de simulación está optimizado para resolver ecuaciones de conservación de masa momento y energía [31].

En este caso la ecuación de conservación de masa es reemplazada por una expresión de fracción de volumen tanto en el CO₂ como en el aceite enriquecido con nanopartículas de dióxido de Titanio, por lo que la suma de cada fracción de fluido es igual a 1. Por otro lado, las variables de masa promedio considerada en cada nodo es la energía y la temperatura.

La expresión de turbulencia elegida para el análisis supone un modelo K-ε dado que es un modelo estándar que se basa en dos ecuaciones de transporte de energía en fluidos con régimen turbulento, la primera variable involucra la energía cinética, mientras que la segunda expresa la disipación turbulenta como se muestran en las ecuaciones 1 y 2.

Energía cinética turbulenta.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(u + \frac{u t}{\sigma k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + Gk + Gb - Pe - YM + Sk$$

Disipación Turbulenta.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(u + \frac{u t}{\sigma \epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C1_{\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (Gk + C3_{\epsilon} Gb) - C2_{\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S\epsilon \end{aligned}$$

Donde:

Gk : Generación de energía cinética turbulenta debido a los gradientes de velocidad promedio.

Gb : Generación de energía cinética debido a la flotabilidad.

YM : Contribución de la dilatación fluctuante en turbulencia compresible.

$C1e C2e C3e \sigma_t$: Constantes determinadas experimentalmente.

μ_t : Viscosidad turbulenta.

σ_k : Número de Prandtl en función de k .

σ_ϵ : Número de Prandtl en función de ϵ

En la tabla 5 se presentan los parámetros de simulación CFD planteados para cada configuración de boquilla distribuidora.

Tabla 7. Condiciones de Análisis CFD de los modelos de boquilla distribuidora planteados en el sistema de lubricación híbrida. Fuente: Autor.

Condiciones de Análisis	Adaptador de Boquilla 30°	Adaptador de Boquilla 45°
Modelo Multifase	Volumen de fluido con ecuación de energía	Volumen de fluido con ecuación de energía
Fluido	Compresible	Compresible
Modelo de turbulencia	K- ϵ	K- ϵ
Condiciones de pared	Estándar ($V = 0 \frac{m}{s}$)	Estándar ($V = 0 \frac{m}{s}$)
Intensidad de turbulencia	5%	5%

2.10.5. Geometría planteada.

El modelo geométrico incluye el levantamiento dimensional en 3 dimensiones de los prototipos ensayados de boquilla distribuidora con sus dimensiones reales, enfocados principalmente a la orientación de la salida de los racores y su diámetro de salida, en un ambiente controlado, donde se podrá observar cómo se da la combinación del aceite en aerosol y el fluido criogénico.

Dicho modelo 3D incluye las condiciones de frontera como las entradas de cada fluido, las paredes, y la salida.

Modelo 2D (2 Racores)

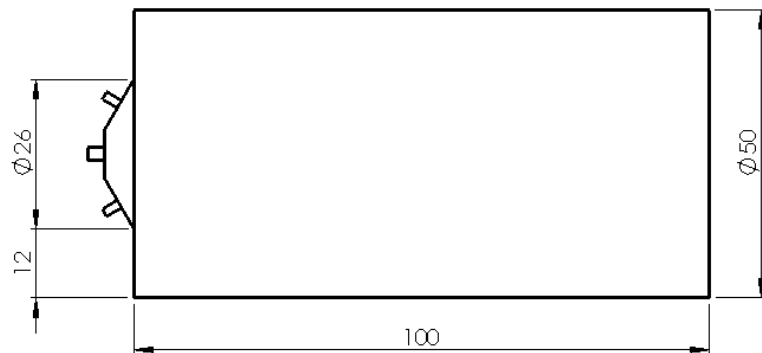


Figura 26. Modelo CFD para 2 racores, dimensionamiento. Fuente: Autor

Modelo 3D (3 Racores)

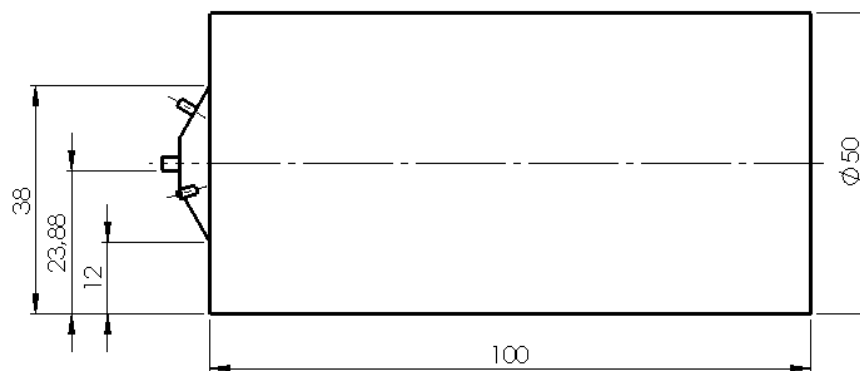


Figura 27. Modelo CFD para 3 racores, dimensionamiento. Fuente: Autor

2.10.6. Pre-procesado.

En esta etapa se definen todos los parámetros de entrada y salida en las condiciones de frontera como velocidades, presiones, temperaturas y demás condiciones físicas que se deben ingresar en el software de acuerdo con las condiciones usadas en el modelo real, para el fluido criogénico y el sistema MQL.

2.10.7. Mallado.

El proceso de mallado se llevó a cabo en modelos bidimensionales para las propuestas de 2 racores, mientras que para las propuestas de 3 racores se utilizó un modelo sólido, el tipo de elemento para los modelos bidimensionales corresponde a la denominación

Shell, con un refinamiento de malla en las zonas más pequeñas, mientras que para el modelo tridimensional el software CAE asigna un elemento del tipo tetraédrico con una malla más fina en los lugares más pequeños.

El dominio para ambos modelos se consideró como fluido en condiciones normales para representar la atmósfera en la que se desarrollará el fluido a lo largo de un tiempo establecido, ya que se trata de un análisis estacionario.

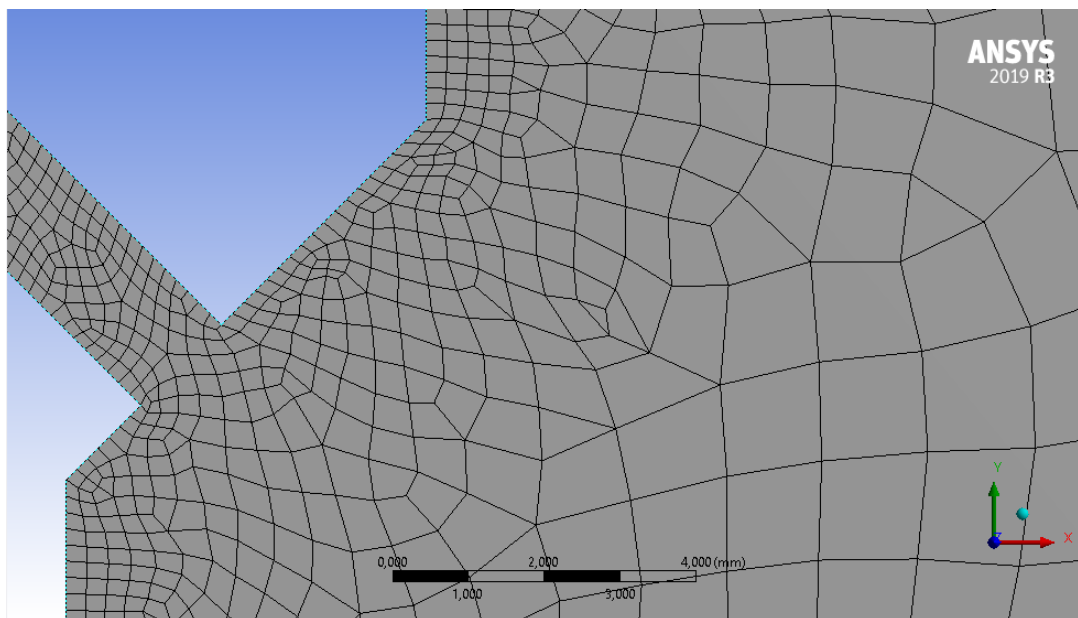
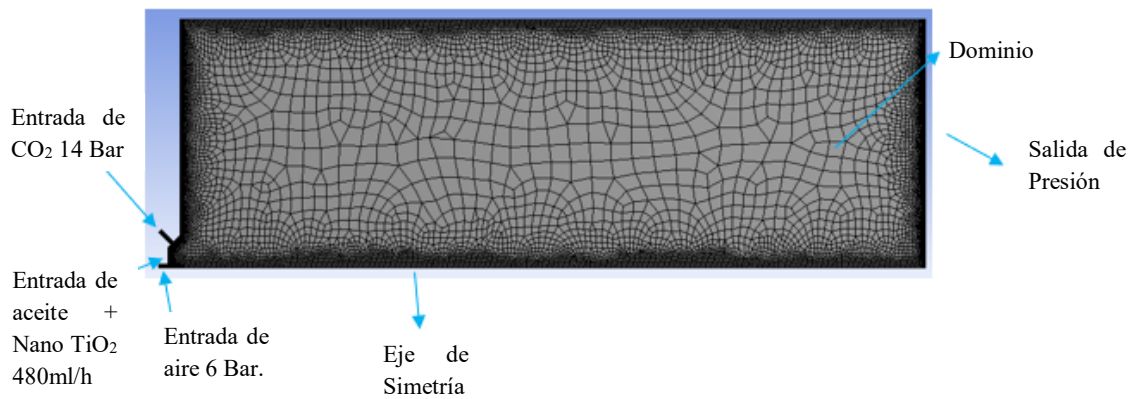


Figura 28. Modelo CFD planteado para la simulación del adaptador de boquilla. Fuente: Autor

2.10.8. Propiedades de los fluidos utilizados en el análisis.

Model

Off
 Volume of Fluid
 Mixture
 Eulerian
 Wet Steam

Number of Eulerian Phases: 3

Coupled Level Set + VOF

Level Set

VOF Sub-Models

Open Channel Flow
 Open Channel Wave BC

Volume Fraction Parameters

Formulation

Explicit
 Implicit

Volume Fraction Cutoff: 1e-06
 Courant Number: 0.25

Options

Interface Modeling

Type

Sharp
 Sharp/Dispersed
 Dispersed

Interfacial Anti-Diffusion

Body Force Formulation

Implicit Body Force

Figura 29. Modelo VOF (Volume of fluid) que involucra los 3 tipos de fluido para el análisis. Fuente: Autor.

Model

Laminar
 Spalart-Allmaras (1 eqn)
 k-epsilon (2 eqn)
 k-omega (2 eqn)
 Transition k-k1-omega (3 eqn)
 Transition SST (4 eqn)
 Reynolds Stress (5 eqn)
 Scale-Adaptive Simulation (SAS)
 Detached Eddy Simulation (DES)

k-epsilon Model

Standard
 RNG
 Realizable

Near-Wall Treatment

Standard Wall Functions
 Scalable Wall Functions
 Non-Equilibrium Wall Functions
 Enhanced Wall Treatment
 Menter-Lechner
 User-Defined Wall Functions

Options

Viscous Heating
 Curvature Correction
 Production Kato-Launder
 Production Limiter

Model Constants

Cmu: 0.09
 C1-Epsilon: 1.44
 C2-Epsilon: 1.92
 TKE Prandtl Number: 1
 TDR Prandtl Number: 1.3
 Energy Prandtl Number: 0.85
 Wall Prandtl Number: 0.85

User-Defined Functions

Turbulent Viscosity: none

Figura 30. Configuración de turbulencia K-E considerado en la simulación. Fuente: Autor.

Name	Material Type	Order Materials by
coolube-2210	fluid	<input checked="" type="radio"/> Name
Chemical Formula	Fluent Fluid Materials	<input type="radio"/> Chemical Formula
	engine-oil	Fluent Database...
	Mixture	User-Defined Database...
	none	

Properties	
Density (kg/m3)	constant
	889
Cp (Specific Heat) (j/kg-k)	constant
	1845
Thermal Conductivity (w/m-k)	constant
	0.145
Viscosity (kg/m-s)	constant
	1.06
Molecular Weight (kg/kmol)	constant
	28
Standard State Enthalpy (j/kgmol)	constant
	0
Reference Temperature (k)	constant
	298.15

Figura 31. Propiedades del aceite Coolube 2210 consideradas en el análisis. Fuente: Autor.

Name	Material Type	Order Materials by
carbon-dioxide	fluid	<input checked="" type="radio"/> Name
Chemical Formula	Fluent Fluid Materials	<input type="radio"/> Chemical Formula
co2	carbon-dioxide (co2)	Fluent Database...
	Mixture	User-Defined Database...
	none	

Properties	
Density (kg/m3)	ideal-gas
Cp (Specific Heat) (j/kg-k)	piecewise-polynomial
Thermal Conductivity (w/m-k)	constant
	0.0145
Viscosity (kg/m-s)	constant
	1.37e-05
Molecular Weight (kg/kmol)	constant
	44.00995
Standard State Enthalpy (j/kgmol)	constant
	-3.935e+08
Reference Temperature (k)	constant
	298.15

Figura 32. Propiedades del aceite CO₂ consideradas en el análisis. Fuente: Autor.

Name	Material Type	Order Materials by
air	fluid	<input checked="" type="radio"/> Name
Chemical Formula	Fluent Fluid Materials	<input type="radio"/> Chemical Formula
	air	Fluent Database...
	Mixture	User-Defined Database...
	none	

Properties

Density (kg/m ³)	ideal-gas	Edit...
Cp (Specific Heat) (j/kg-k)	constant	Edit...
	1006.43	
Thermal Conductivity (w/m-k)	constant	Edit...
	0.0242	
Viscosity (kg/m-s)	constant	Edit...
	1.7894e-05	
Molecular Weight (kg/kmol)	constant	Edit...
	28.966	
Standard State Enthalpy (j/kgmol)	constant	Edit...
	0	
Reference Temperature (k)	constant	Edit...
	298.15	

Figura 33. *Propiedades del aceite aire consideradas en el análisis. Fuente: Autor.*

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

3.1. Resultados del Análisis CFD.

Luego del preprocesado y la solución del modelo VOF planteado se obtuvieron los resultados del estudio CFD para velocidades y temperaturas, del fluido refrigerante que combina CO₂ criogénico Aceite vegetal en aerosol MQL combinado con nano partículas de dióxido de titanio, mediante este análisis se determinará cual combinación de parámetros es la más efectiva en cuanto a condiciones de velocidad y temperatura en el torneado del acero AISI 304 con plaquitas de carburo sinterizado con la designación CNMG 120408 MF 2025.

3.1.2. Adaptador de Boquilla 30° 2 Racores.

Tabla 8. Condiciones de Frontera para el adaptador de 2 racores orientados a 30°. Fuente: Autor

Parámetro	Tipo	Asignación	Valor	Unidades
Entrada.	Presión	CO ₂	1.4e+6	Pa
Entrada	Caudal	Aceite Vegetal + Nano Partículas de TiO ₂	0.133333	ml/s
Entrada	Presión	Aire	600000	Pa
Salida	Presión	Mezcla	Atmosférica	Pa

Tabla 9. Resultados del Análisis CFD de velocidad de fluido para el adaptador con 2 racores orientados a 30° del eje. Fuente: Autor



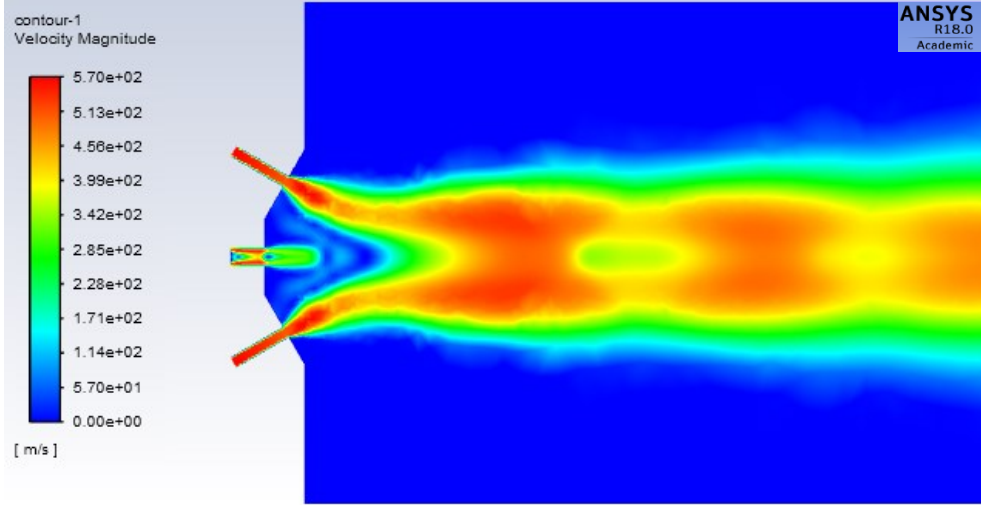
	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO		
	FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA		
	MAESTRÍA EN MECÁNICA MENCION MANUFACTURA		
N° de simulación:	001	Equipo:	Adaptador de Boquilla CO ₂ +MQLNanoTi O ₂
Criterio:	Adaptador de 2 racores a 30°		
Características de la simulación:	Carga:	Geometría:	Tiempo de procesamiento:
	Multifase	Shell	240 minutos
N° de nodos:	15489	Tipo de análisis:	CFD-VOF-PISO
N° de elementos:	14667	Tipo de elemento:	Tetraédrico
Realizado por:	Ing. Diego Chadán.	Revisado por:	Ing. Diego Núñez.
Resultados de simulación:			
			
<p>Conclusiones: El valor máximo de la velocidad a la que el modelo propuesto enfría la herramienta de corte da como resultado entre 399 y 570 m/s mientras que el valor más bajo puede expresarse en las zonas de color verde que corresponde a 2,28 m/s</p>			

Tabla 10. Resultados del Análisis CFD de la temperatura de fluido para el adaptador con 2 racores orientados a 30° del eje. Fuente: Autor



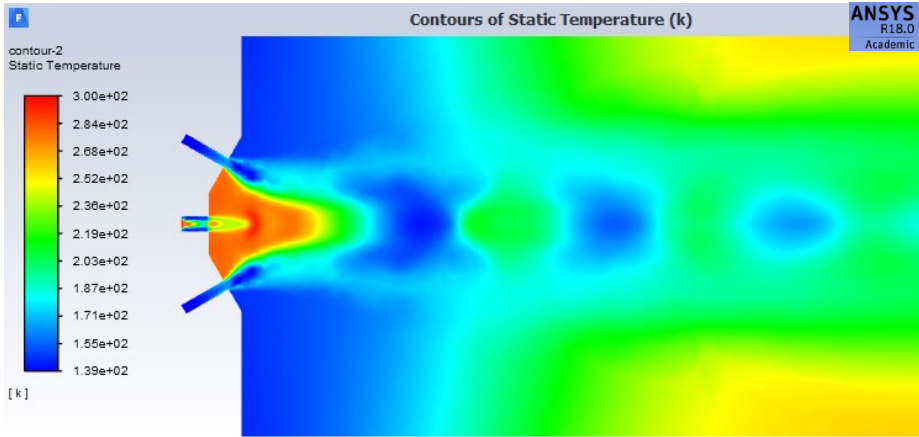


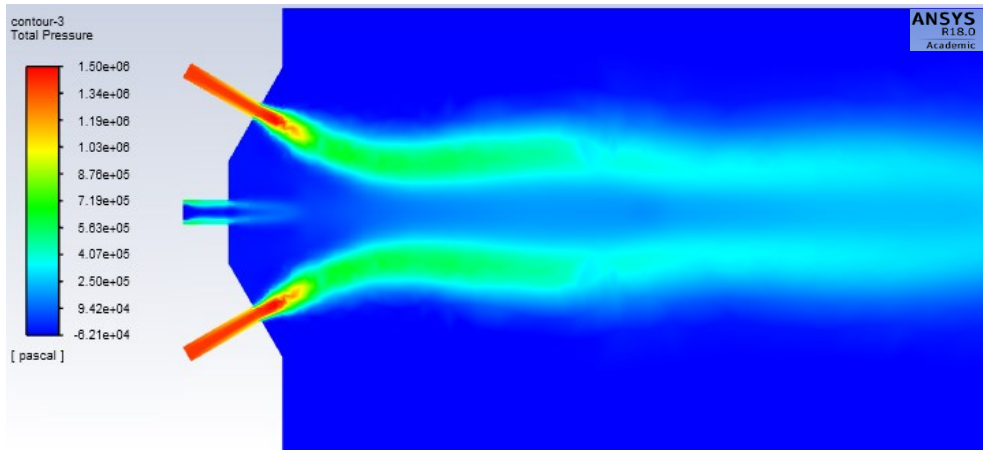
	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO		
	FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA		
	MAESTRÍA EN MECÁNICA MENCIÓN MANUFACTURA		
N° de simulación:	001	Equipo:	Adaptador de Boquilla CO ₂ +MQLNanoTi O ₂
Criterio:	Adaptador de 2 racores a 30°		
Características de la simulación:	Carga:	Geometría:	Tiempo de procesamiento:
	Multifase	Shell	240 minutos
N° de nodos:	15489	Tipo de análisis:	CFD-VOF-PISO
N° de elementos:	14667	Tipo de elemento:	Tetraédrico
Realizado por:	Ing. Diego Chadán.	Revisado por:	Ing. Diego Núñez.
Resultados de simulación:			
			
<p>Conclusiones: El valor mínimo de la Temperatura a la que el modelo propuesto enfría la herramienta de corte da como resultado entre 187 y 252 K (-53.65°C) mientras que el valor más alto viene a ser la temperatura ambiental de 300 K o 26.85 °C</p>			

Tabla 11. Resultados del Análisis CFD de la presión de fluido para el adaptador con 2 racores orientados a 30° del eje. Fuente: Autor

	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO		
	FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA		
	MAESTRÍA EN MECÁNICA MENCION MANUFACTURA		
N° de simulación:	001	Equipo:	Adaptador de Boquilla CO ₂ +MQLNanoTi O ₂
Criterio:	Adaptador de 2 racores a 30°		
Características de la simulación:	Carga:	Geometría:	Tiempo de procesamiento:
	Multifase	Shell	240 minutos
N° de nodos:	15489	Tipo de análisis:	CFD-VOF-PISO
N° de elementos:	14667	Tipo de elemento:	Tetraédrico
Realizado por:	Ing. Diego Chadán.	Revisado por:	Ing. Diego Núñez.
Resultados de simulación:			
			
Conclusiones: La presión a la salida tiene un valor aproximado de 470 kPa en la zona donde se combinan los fluidos, el máximo valor correspondiente a 1,5e+6 Pa se encuentra en el interior de los racores rectos de diámetro 1,5 mm			

3.1.3. Adaptador de Boquilla 45° 2 Racores.

Tabla 12. Condiciones de Frontera para el adaptador de 2 racores orientados a 30°. Fuente: Autor

Parámetro	Tipo	Asignación	Valor	Unidades
Entrada.	Presión	CO ₂	1.4e+6	Pa
Entrada	Caudal	Aceite Vegetal + Nano Partículas de TiO ₂	0.133333	ml/s
Entrada	Presión	Aire	600000	Pa
Salida	Presión	Mezcla	Atmosférica	Pa

Tabla 13. Resultados del Análisis CFD de velocidad de fluido para el adaptador con 2 racores orientados a 45° del eje. Fuente: Autor



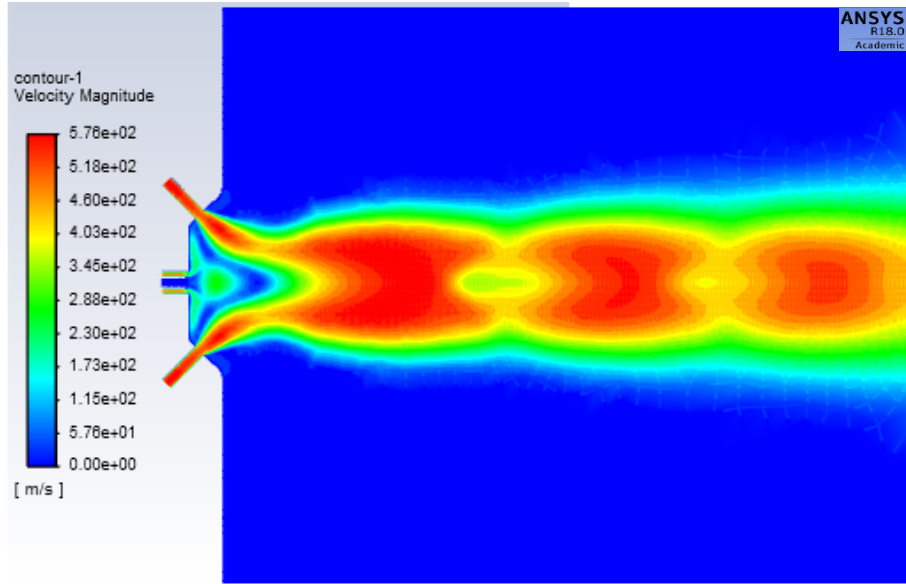
	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO		
	FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA		
	MAESTRÍA EN MECÁNICA MENCION MANUFACTURA		
N° de simulación:	002	Equipo:	Adaptador de Boquilla CO ₂ +MQLNanoTi O ₂
Criterio:	Adaptador de 2 racores a 45°		
Características de la simulación:	Carga:	Geometría:	Tiempo de procesamiento:
	Multifase	Shell	240 minutos
N° de nodos:	16385	Tipo de análisis:	CFD-VOF-PISO
N° de elementos:	15542	Tipo de elemento:	Tetraédrico
Realizado por:	Ing. Diego Chadán.	Revisado por:	Ing. Diego Núñez.
Resultados de simulación:			
			
<p>Conclusiones: El valor máximo de la velocidad a la que el modelo propuesto enfría la herramienta de corte da como resultado entre 345 y 578 m/s mientras que el valor más bajo puede expresarse en las zonas de color verde que corresponde a 230 m/s</p>			

Tabla 14. Resultados del Análisis CFD de la temperatura de fluido para el adaptador con 2 racores orientados a 45° del eje. Fuente: Autor



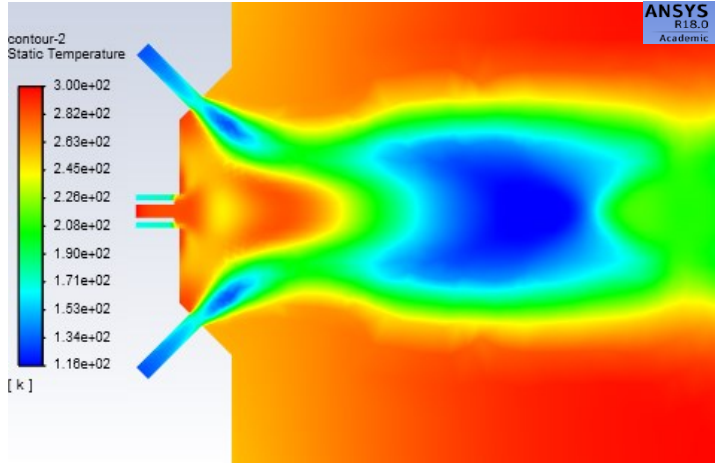


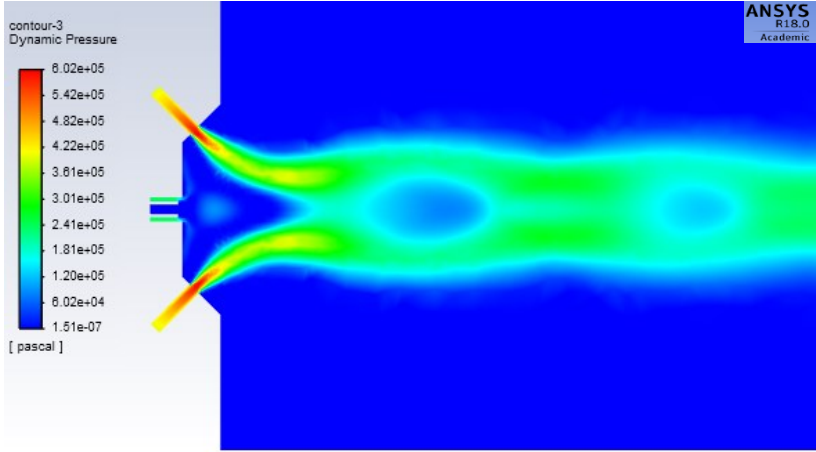
	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO		
	FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA		
	MAESTRÍA EN MECÁNICA MENCION MANUFACTURA		
N° de simulación:	002	Equipo:	Adaptador de Boquilla CO ₂ +MQLNanoTi O ₂
Criterio:	Adaptador de 2 racores a 30°		
Características de la simulación:	Carga:	Geometría:	Tiempo de procesamiento:
	Multifase	Shell	240 minutos
N° de nodos:	15489	Tipo de análisis:	CFD-VOF-PISO
N° de elementos:	14667	Tipo de elemento:	Tetraédrico
Realizado por:	Ing. Diego Chadán.	Revisado por:	Ing. Diego Núñez.
Resultados de simulación:			
			
<p>Conclusiones: El valor mínimo de la Temperatura a la que el modelo propuesto enfría la herramienta de corte da como resultado entre 171 y 226 K (-74.65°C) mientras que el valor más alto viene a ser la temperatura ambiental de 300 K o 26.85 °C</p>			

Tabla 15. Resultados del Análisis CFD de la presión de fluido para el adaptador con 2 racores orientados a 30° del eje. Fuente: Autor

	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO		
	FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA		
	MAESTRÍA EN MECÁNICA MENCION MANUFACTURA		
N° de simulación:	002	Equipo:	Adaptador de Boquilla CO ₂ +MQLNanoTi O ₂
Criterio:	Adaptador de 2 racores a 30°		
Características de la simulación:	Carga:	Geometría:	Tiempo de procesamiento:
	Multifase	Shell	240 minutos
N° de nodos:	15489	Tipo de análisis:	CFD-VOF-PISO
N° de elementos:	14667	Tipo de elemento:	Tetraédrico
Realizado por:	Ing. Diego Chadán.	Revisado por:	Ing. Diego Núñez.
Resultados de simulación:			
			
<p>Conclusiones: La presión a la salida tiene un valor aproximado de 381 kPa en la zona donde se combinan los fluidos, el máximo valor correspondiente a 6.02e+5Pa se encuentra en el interior de los racores rectos de diámetro 1,5 mm</p>			

3.1.4. Adaptador de Boquilla 30° 3 Racores.

Tabla 16. Condiciones de Frontera para el adaptador de 2 racores orientados a 30°. Fuente: Autor

Parámetro	Tipo	Asignación	Valor	Unidades
Entrada.	Presión	CO ₂	1.4e+6	Pa
Entrada	Caudal	Aceite Vegetal + Nano Partículas de TiO ₂	0.133333	ml/s
Entrada	Presión	Aire	600000	Pa
Salida	Presión	Mezcla	Atmosférica	Pa

Tabla 17. Resultados del Análisis CFD de la velocidad de fluido para el adaptador con 3 racores orientados a 30° del eje. Fuente: Autor



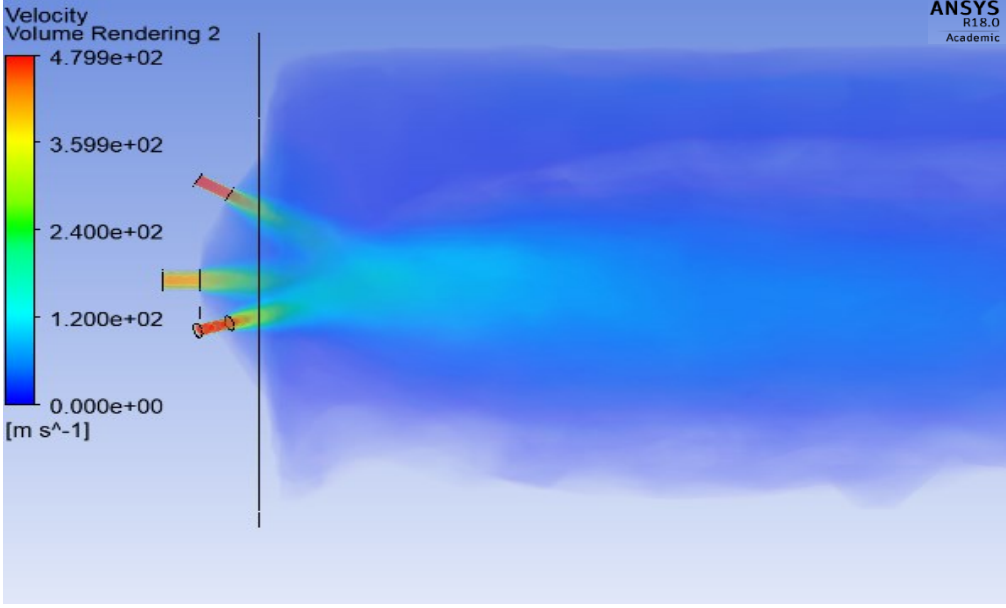
	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO		
	FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA		
	MAESTRÍA EN MECÁNICA MENCION MANUFACTURA		
N° de simulación:	003	Equipo:	Adaptador de Boquilla CO ₂ +MQLNanoTi O ₂
Criterio:	Adaptador de 3 racores a 30°		
Características de la simulación:	Carga:	Geometría:	Tiempo de procesamiento:
	Multifase	Shell	240 minutos
N° de nodos:	15489	Tipo de análisis:	CFD-VOF-PISO
N° de elementos:	14667	Tipo de elemento:	Tetraédrico
Realizado por:	Ing. Diego Chadán.	Revisado por:	Ing. Diego Núñez.
Resultados de simulación:			
			
<p>Conclusiones: La velocidad máxima a la salida tiene un valor aproximado entre 359 y 479 m/s se encuentra a la salida de los racores rectos de 1,5 mm de diámetro, conforme el fluido criogénico mezclado con el aire del MQL salen hacia la atmósfera, la velocidad tiende a bajar a aproximadamente 240 m/s</p>			

Tabla 18. Resultados del Análisis CFD de la presión de fluido para el adaptador con 3 racores orientados a 30° del eje. Fuente: Autor



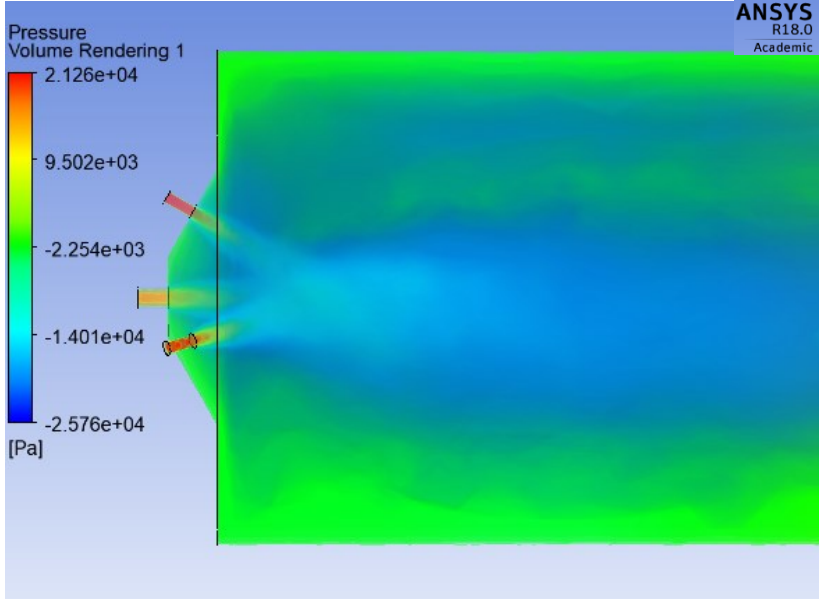


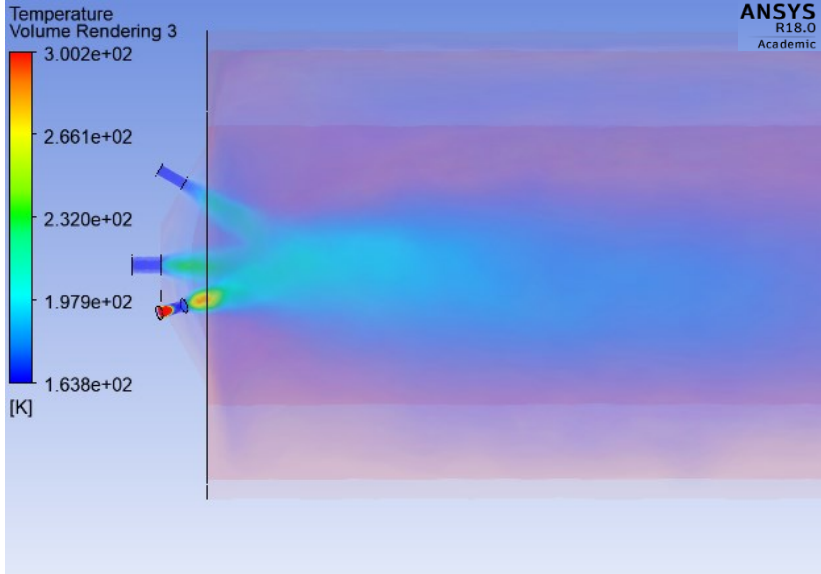
	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO		
	FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA		
	MAESTRÍA EN MECÁNICA MENCION MANUFACTURA		
N° de simulación:	003	Equipo:	Adaptador de Boquilla CO ₂ +MQLNanoTi O ₂
Criterio:	Adaptador de 3 racores a 30°		
Características de la simulación:	Carga:	Geometría:	Tiempo de procesamiento:
	Multifase	Shell	240 minutos
N° de nodos:	15489	Tipo de análisis:	CFD-VOF-PISO
N° de elementos:	14667	Tipo de elemento:	Tetraédrico
Realizado por:	Ing. Diego Chadán.	Revisado por:	Ing. Diego Núñez.
Resultados de simulación:			
			
<p>Conclusiones: La presión máxima registrada corresponde a un valor de 2.126e+4Pa y se registra en la parte interna de los racores de 1,5 mm de diámetro justo antes de la salida, conforme los fluidos sales y se mezclan la presión alcanza el nivel de la atmosférica.</p>			

Tabla 19. Resultados del Análisis CFD de la Temperatura de fluido para el adaptador con 3 racores orientados a 30° del eje. Fuente: Autor

	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO		
	FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA		
	MAESTRÍA EN MECÁNICA MENCION MANUFACTURA		
N° de simulación:	003	Equipo:	Adaptador de Boquilla CO ₂ +MQLNanoTi O ₂
Criterio:	Adaptador de 3 racores a 30°		
Características de la simulación:	Carga:	Geometría:	Tiempo de procesamiento:
	Multifase	Shell	240 minutos
N° de nodos:	15489	Tipo de análisis:	CFD-VOF-PISO
N° de elementos:	14667	Tipo de elemento:	Tetraédrico
Realizado por:	Ing. Diego Chadán.	Revisado por:	Ing. Diego Núñez.
Resultados de simulación:			
			
<p>Conclusiones: La temperatura se encuentra entre 197 y 232 K se observa que a la salida de los racores la temperatura es mucho menor que cuando el fluido sale al ambiente, mediante el análisis CFD se evidencia que en la zona de corte el fluido criogénico enfriaría a 214.5 K (-58,5 °C)</p>			

3.1.5. Adaptador de Boquilla 45° 3 Racores.

Tabla 20. Condiciones de Frontera para el adaptador de 2 racores orientados a 30°. Fuente: Autor

Parámetro	Tipo	Asignación	Valor	Unidades
Entrada.	Presión	CO ₂	1.4e+6	Pa
Entrada	Caudal	Aceite Vegetal + Nano Partículas de TiO ₂	0.133333	ml/s
Entrada	Presión	Aire	600000	Pa
Salida	Presión	Mezcla	Atmosférica	Pa

Tabla 21. Resultados del Análisis CFD de la Velocidad de fluido para el adaptador con 3 racores orientados a 45° del eje. Fuente: Autor



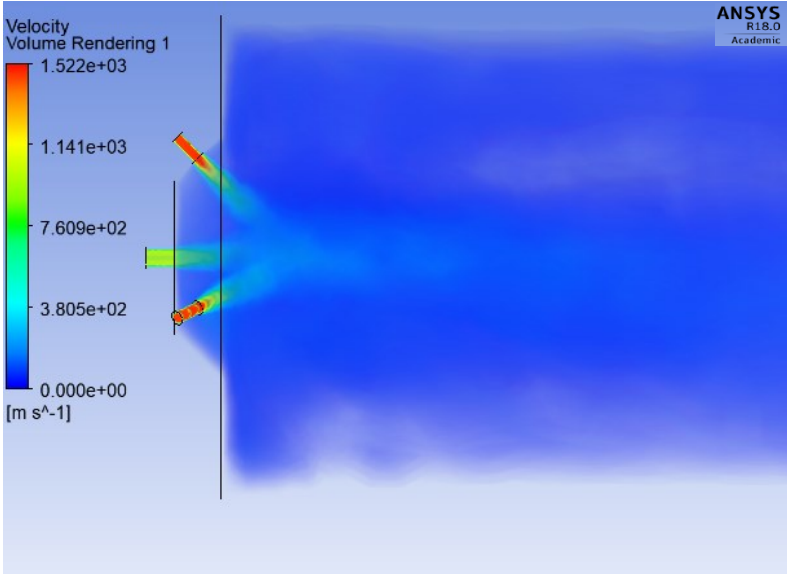
	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO		
	FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA		
	MAESTRÍA EN MECÁNICA MENCION MANUFACTURA		
N° de simulación:	004	Equipo:	Adaptador de Boquilla CO ₂ +MQLNanoTi O ₂
Criterio:	Adaptador de 3 racores a 45°		
Características de la simulación:	Carga:	Geometría:	Tiempo de procesamiento:
	Multifase	Shell	240 minutos
N° de nodos:	15489	Tipo de análisis:	CFD-VOF-PISO
N° de elementos:	14667	Tipo de elemento:	Tetraédrico
Realizado por:	Ing. Diego Chadán.	Revisado por:	Ing. Diego Núñez.
Resultados de simulación:			
			
<p>Conclusiones: La velocidad máxima a la salida tiene un valor aproximado entre 760 y 1141 m/s se encuentra a la salida de los racores rectos de 1,5 mm de diámetro, conforme el fluido criogénico mezclado con el aire del MQL salen hacia la atmósfera, la velocidad tiende a bajar a aproximadamente 380,5 m/s</p>			

Tabla 22. Resultados del Análisis CFD de la presión de fluido para el adaptador con 3 racores orientados a 45° del eje. Fuente: Autor



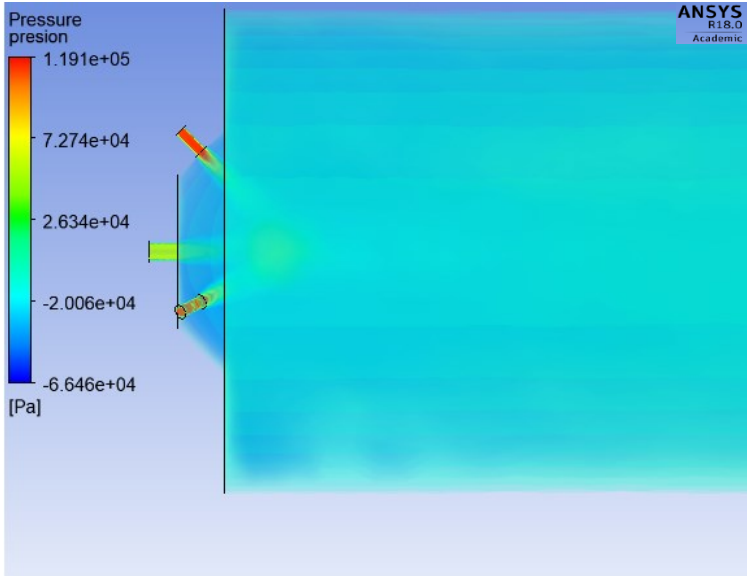


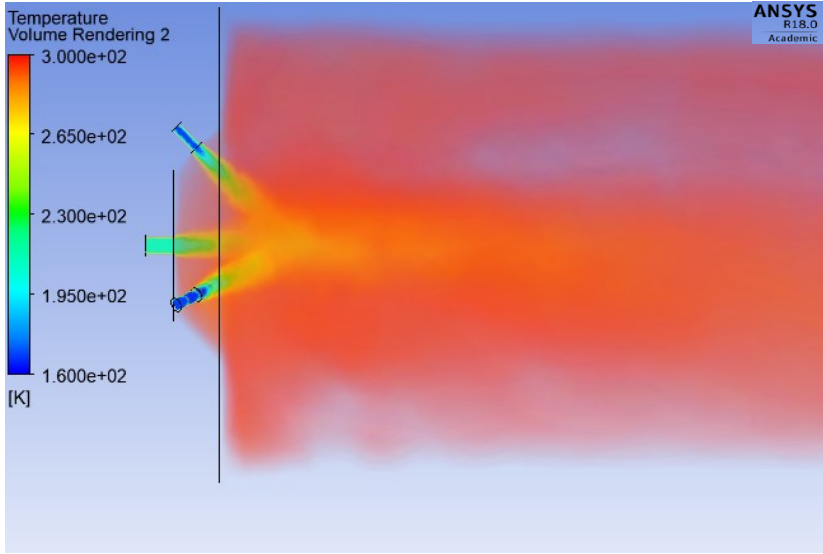
	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO		
	FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA		
	MAESTRÍA EN MECÁNICA MENCION MANUFACTURA		
N° de simulación:	004	Equipo:	Adaptador de Boquilla CO ₂ +MQLNanoTi O ₂
Criterio:	Adaptador de 3 racores a 45°		
Características de la simulación:	Carga:	Geometría:	Tiempo de procesamiento:
	Multifase	Shell	240 minutos
N° de nodos:	15489	Tipo de análisis:	CFD-VOF-PISO
N° de elementos:	14667	Tipo de elemento:	Tetraédrico
Realizado por:	Ing. Diego Chadán.	Revisado por:	Ing. Diego Núñez.
Resultados de simulación:			
			
<p>Conclusiones: La presión máxima registrada corresponde a un valor de $1,191 \times 10^4$ Pa y se registra en la parte interna de los racores de 1,5 mm de diámetro justo antes de la salida, conforme los fluidos sales y se mezclan la presión alcanza el nivel de la atmosférica.</p>			

Tabla 23. Resultados del Análisis CFD de la temperatura de fluido para el adaptador con 3 racores orientados a 45° del eje. Fuente: Autor

	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO		
	FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA		
	MAESTRÍA EN MECÁNICA MENCION MANUFACTURA		
N° de simulación:	004	Equipo:	Adaptador de Boquilla CO ₂ +MQLNanoTi O ₂
Criterio:	Adaptador de 3 racores a 45°		
Características de la simulación:	Carga:	Geometría:	Tiempo de procesamiento:
	Multifase	Shell	240 minutos
N° de nodos:	15489	Tipo de análisis:	CFD-VOF-PISO
N° de elementos:	14667	Tipo de elemento:	Tetraédrico
Realizado por:	Ing. Diego Chadán.	Revisado por:	Ing. Diego Núñez.
Resultados de simulación:			
			
<p>Conclusiones: La temperatura se encuentra entre 235 y 265 K se observa que a la salida de los racores la temperatura es mucho menor que cuando el fluido sale al ambiente, mediante el análisis CFD se evidencia que en la zona de corte el fluido criogénico enfriaría a 247.5 K (-26,65 °C)</p>			

3.2. Validación del modelo CFD comparada con los valores registrados en el equipo criogénico construido.

Temperatura.


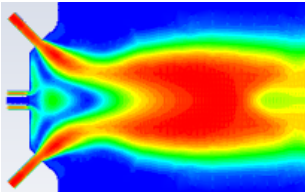

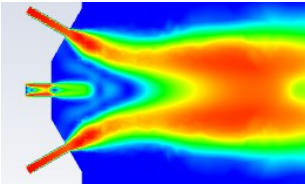

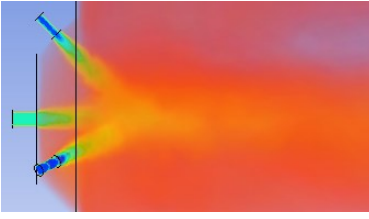

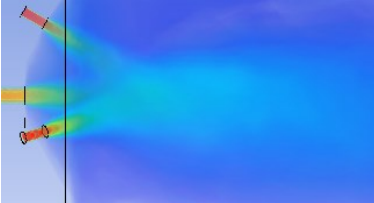
En el equipo criogénico propuesto registra temperaturas similares a las simuladas mediante los 4 modelos CFD, la medición se realizó mediante termocuplas en el punto de convergencia de las 3 salidas de los racores y la salida de aire, que corresponde al punto donde el fluido criogénico se pone en contacto con la zona de corte como se aprecia en la figura 27.



Figura 34. Enfriamiento de la herramienta de corte mediante fluido criogénico (CO₂) y aceite vegetal + Nano TiO₂. Fuente: Autor.





3.2.1. Comparativa y análisis de resultados.

Tabla 24. Comparativa visual entre la simulación CFD y el equipo construido en sus diferentes configuraciones. Fuente: Autor

Configuración	Fotografía Real	Simulación CFD
2 racores 45°		
2 racores 30°		
3 racores 45°		
3 racores 30°		

3.2.2. Rango de Temperaturas Registradas para cada caso.

Tabla 25. Comparativa entre temperaturas obtenidas mediante el análisis CFD y medidas en campo.
Fuente: Autor

Configuración	Temperatura Obtenida.	Temperatura Medida	Error
2 racores 45°	-53,65 °C		21,7 %
2 racores 30°	-74,65 °C		16,9 %
3 racores 45°	-58,5 °C		15,9 %
3 racores 30°	-26,75 °C		8,08%

Mediante el análisis CFD validado con la evidencia fotográfica y las mediciones de temperatura realizadas para cada configuración de adaptador de boquilla, llegamos a la conclusión de que el caso en donde se evidencia la menor temperatura registrada resulta ser el de 2 racores orientados a 30° al mismo tiempo se observa tanto en la simulación como en el registro fotográfico que la nube de gas criogénico y aire + Nano TiO₂ es más larga que en los otros casos por ende sería la configuración más adecuada dado que el fluido de corte propuesto recorre mayor distancia lo cual facilita que enfríe en la zona de corte a la menor temperatura posible lo cual favorece a la vida útil de la herramienta de corte. Sin embargo, es necesario analizar los valores de calidad superficial y desgaste de flanco de la herramienta de corte para tomar una decisión que resulte en una propuesta que permita obtener las condiciones más favorables en el mecanizado del acero AISI 304.

CAPÍTULO IV

DESARROLLO DE LA PROPUESTA

4.1. Tema.

Experimentación, medición y validación de los resultados obtenidos mediante el análisis CFD en el proceso de mecanizado del acero inoxidable AISI 304.

4.2. Objetivos.

4.2.1 General.

Verificar la influencia de las configuraciones de parámetros más favorables para el adaptador de boquilla dosificador de nano fluido y fluido criogénico en el proceso de torneado del acero AISI 304

4.2.2 Específicos.

Verificar los datos obtenidos de calidad superficial Ra y Rz y cómo influyen en la optimización del sistema de refrigeración criogénico.

Evaluar los parámetros del adaptador de boquilla en cuanto a cantidad de salidas y ángulo y su incidencia en el desgaste de flanco de la herramienta de corte.

4.3. Desarrollo de la propuesta.

Los resultados analizados en el capítulo 3 fueron concluyentes para seleccionar la configuración más adecuada para el adaptador de boquilla, se observó que conforme se aumenta el ángulo respecto al eje de salida el haz de fluido criogénico se hace más corto por lo que el fluido de corte no llega adecuadamente a la zona de contacto entre la herramienta y la pieza mecanizada.

La cantidad de racores en el adaptador también incide la dosificación de nano fluido criogénico, agregar un racor más al sistema conlleva al uso de más accesorios, como cañerías, neoplos, adaptadores de manguera y otros componentes, lo que incrementa significativamente las pérdidas en el sistema, y hace que el fluido criogénico llegue con menos fuerza a la herramienta, por lo que pierde sus características de enfriamiento

y lubricación, a causa de ello se incrementa la temperatura y por ende los esfuerzos generados por el contacto y la fricción, lo cual disminuye la vida útil de la herramienta y afecta en la calidad superficial de la pieza mecanizada.

4.4. Procedimiento experimental.

4.4.1. Evaluación de Calidad superficial.

Para analizar la calidad superficial de las probetas ensayadas se hizo uso de la norma ISO 4287, la medición se realiza a los 5, 20, 40 y 60 minutos de mecanizado, haciendo uso de un rugosímetro estándar Mitutoyo SJ-210, se registra el valor de Ra que corresponde al valor promedio de todos los picos de rugosidad, y también el Valor Rz que corresponde al valor máximo ambos valores se miden en μm , previo al proceso de medición de rugosidad es necesario configurar algunos parámetros del equipo.

Para ello es necesario conocer el valor de la rugosidad teórica en función del radio de punta del inserto para lo cual se utiliza la ecuación 3.

$$Ra = \frac{f^2}{32R}$$

$$Ra = \frac{0.2^2}{32(0.8)}$$

$$Ra = 1.5625 \mu\text{m}$$

Con este valor seleccionamos de la tabla 26 la longitud normalizada de muestreo de la rugosidad superficial, que corresponde a la longitud en la que la aguja lee la rugosidad que es un parámetro que debe ser configurado en el equipo estándar de medición para cumplir las directrices dadas por la norma ISO 4287.

Tabla 26. Longitud de muestreo de rugosidad en función de Ra teórica calculada en función del avance por revolución y el radio de punta de la herramienta de corte. Fuente: Autor

Ra (μm)	Longitud de muestreo de rugosidad
$0,006 < Ra \leq 0,02$	0,08
$0,02 < Ra \leq 0,1$	0,25
$0,1 < Ra \leq 2$	0,8
$2 < Ra \leq 10$	2,5
$10 < Ra \leq 80$	8




Para una mayor confiabilidad en el análisis de los resultados es necesario realizar varias mediciones para obtener un promedio tanto en Ra como Rz que expresaría el valor final de la calidad superficial alcanzada el cual será utilizado para trazar varias curvas comparativas en las que se expondrán las diferencias de cada experimento con cada combinación de parámetros. Para este caso se realizarán 5 mediciones de rugosidad en cada probeta.

4.4.2. Condiciones de la probeta y el ambiente de análisis.

1. La superficie debe estar libre de cualquier contaminante como polvo, aceite o agua que pueda afectar a la medición de la calidad superficial.
2. La superficie donde se posiciona la probeta debe estar perfectamente nivelada y debe garantizar que no existan desviaciones que comprometan el contacto con la aguja palpadora.
3. La temperatura de medición será la temperatura ambiental que oscila entre los 20 y 25° C.
4. La aguja palpadora debe situarse, en el extremo más alejado, del centro del eje de la probeta para que el contacto de la aguja palpadora sea el adecuado.

4.5. Resultados Obtenidos de calidad superficial.

Experimento 1, 195 m/min 0,2 mm/rev 2 racores 45°

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA MAESTRÍA EN INGENIERÍA MECÁNICA MENCIÓN MANUFACTURA COHORTE 2019				
RUGOSIDAD SUPERFICIAL						
Datos Generales						
Tipo de estudio	Experimental	Número				
Fecha de ejecución	01/12/2020					
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato Laboratorio FICM					
Elaborado por	Diego Chadan	Revisado por	Ing. Diego Núñez			
Parámetros del proceso de torneado						
Material:	Acero AISI 316					
Sistema de lubricación:	Lubricación enfriamiento con nanofluido criogénico					
Fluido lubricante:	Unist Coolube 2210 EP - Nano partículas TiO ₂ - CO ₂					
Herramienta de corte:	CNMG120408 MF 2025					
Tipo de operación:	Acabado					
n (rpm) - Vc (m/min)	Vf (mm/min) - fn (mm/rev)	Ap (mm)	Radio de punta del inserto (mm)			
700 - 195	140 - 0,2	0,4	0,8			
Caudal lubricante (mL/h)	Presión aire comprimido (bar)	Presión CO ₂ (bar)	Ángulo de incidencia de CO ₂	Diámetro de la salida de CO ₂ (mm)	Nº Racores	
480	2	10	45°	1.5	2	
Parámetros de medición superficial						
Rugosímetro	Norma	Longitud de muestreo	Longitud de cutt of	Mediciones		
Mitutoyo SJ 210	ISO 4287	0,8 mm	2,5 µm	5		
Ra						
Tiempo de medición (min)	Med. 1 (µm)	Med. 2 (µm)	Med. 3 (µm)	Med. 4 (µm)	Med. 5 (µm)	Promedio (µm)
5	1,14	1,179	1,179	1,142	1,12	1,152
20	1,189	1,262	1,206	1,128	1,142	1,1854
40	1,634	1,726	1,749	1,635	1,592	1,6672
60	1,644	1,704	1,817	1,72	1,699	1,7168
Rz						
Tiempo de medición (min)	Med. 1 (µm)	Med. 2 (µm)	Med. 3 (µm)	Med. 4 (µm)	Med. 5 (µm)	Promedio (µm)
5	5,623	5,523	5,471	5,553	5,274	5,4888
20	6,389	6,702	6,543	5,852	5,9	6,2772
40	6,53	7,305	7,311	6,698	6,53	6,8748
60	6,685	6,786	7,41	7,2	6,681	6,9524
Resultados						
			<p>Estado Superficial Textura rugosa al tacto, marcas poco perceptibles a simple vista.</p> <p>Clase de rugosidad N6</p> <p>Proceso Torneado.</p>			

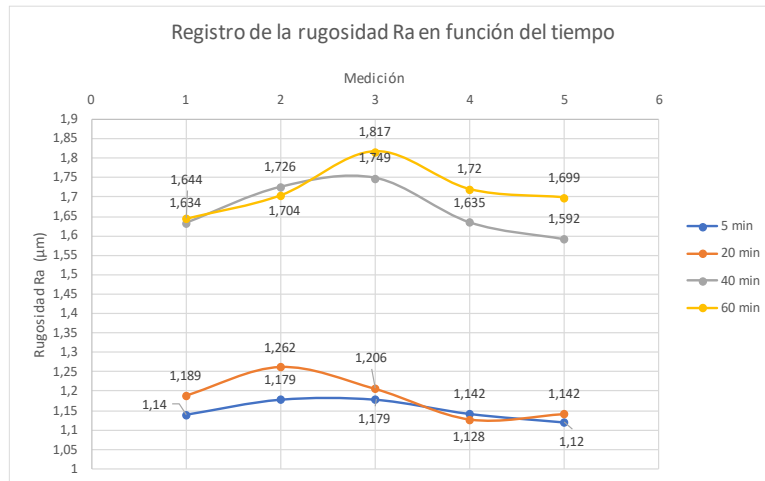


Figura 35. Comportamiento de la calidad superficial Ra en función del tiempo de mecanizado para la combinación de parámetros 195 m/min 2 racores 45°. Fuente: Autor

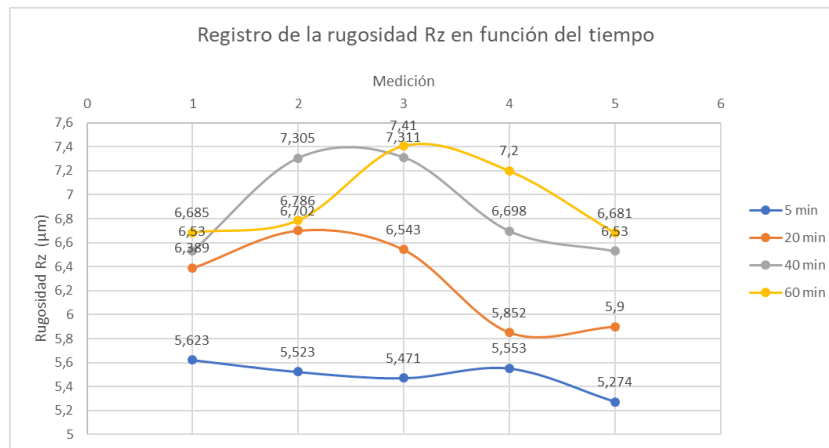





Figura 36. Comportamiento de la calidad superficial Rz en función del tiempo de mecanizado para la combinación de parámetros 195 m/min 2 racores 45°. Fuente: Autor

En las figuras 35 y 36 se observó cómo evoluciona la calidad superficial en función del tiempo, cuando inicia el proceso de mecanizado a los 5 minutos se aprecia un valor de rugosidad Ra y Rz inferior en relación con los 20, 40 y 60 minutos. La calidad superficial promedio a los 5 minutos para esta combinación de experimentos tiene un valor de 1,152 μm Ra y 5,488 μm Rz mientras que a los 60 minutos observamos una rugosidad promedio de 1,7168 μm Ra y 6,9524 μm Rz.

Experimento 2, 235 m/min 0,2 mm/rev 2 racores 45°

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA MAESTRÍA EN INGENIERÍA MECÁNICA MENCIÓN MANUFACTURA COHORTE 2019					
RUGOSIDAD SUPERFICIAL							
Datos Generales							
Tipo de estudio	Experimental	Número					
Fecha de ejecución	01/12/2020						
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato Laboratorio FICM						
Elaborado por	Diego Chadan	Revisado por		Ing. Diego Núñez			
Parámetros del proceso de torneado							
Material:	Acero AISI 316						
Sistema de lubricación:	Lubricación enfriamiento con nanofluido criogénico						
Fluido lubricante:	Unist Coolube 2210 EP - Nano partículas TiO ₂ - CO ₂						
Herramienta de corte:	CNMG120408 MF 2025						
Tipo de operación:	Acabado						
n (rpm) - Vc (m/min)	Vf (mm/min) - fn (mm/rev)	Ap (mm)	Radio de punta del inserto (mm)				
840 - 235	170 - 0,2	0,4	0,8				
Caudal lubricante (mL/h)	Presión aire comprimido (bar)	Presión CO ₂ (bar)	Ángulo de incidencia de CO ₂	Diámetro de la salida de CO ₂ (mm)	N° Racores		
480	2	10	45°	1.5	2		
Parámetros de medición superficial							
Rugosímetro	Norma	Longitud de muestreo	Longitud de cutt of	Mediciones			
Mitutoyo SJ 210	ISO 4287	0,8 mm	2,5 μm	5			
Ra							
Tiempo de medición (min)	Med. 1 (μm)	Med. 2 (μm)	Med. 3 (μm)	Med. 4 (μm)	Med. 5 (μm)	Promedio (μm)	
5	1,304	1,36	1,336	1,193	1,37	1,3126	
20	1,583	1,51	1,336	1,658	1,406	1,4986	
40	1,308	1,337	1,005	1,04	1,362	1,2104	
60	1,29	1,139	1,097	1,156	1,169	1,1702	
Rz							
Tiempo de medición (min)	Med. 1 (μm)	Med. 2 (μm)	Med. 3 (μm)	Med. 4 (μm)	Med. 5 (μm)	Promedio (μm)	
5	6,356	6,216	6,036	5,508	6,291	6,0814	
20	8,306	7,347	6,603	6,483	6,294	7,0066	
40	6,199	6,38	5,491	5,903	4,551	5,7048	
60	6,467	5,731	5,499	6,151	6,145	5,9986	
Resultados							
			<p>Estado Superficial Textura rugosa al tacto, marcas poco perceptibles a simple vista.</p> <p>Clase de rugosidad N6</p> <p>Proceso Torneado.</p>				

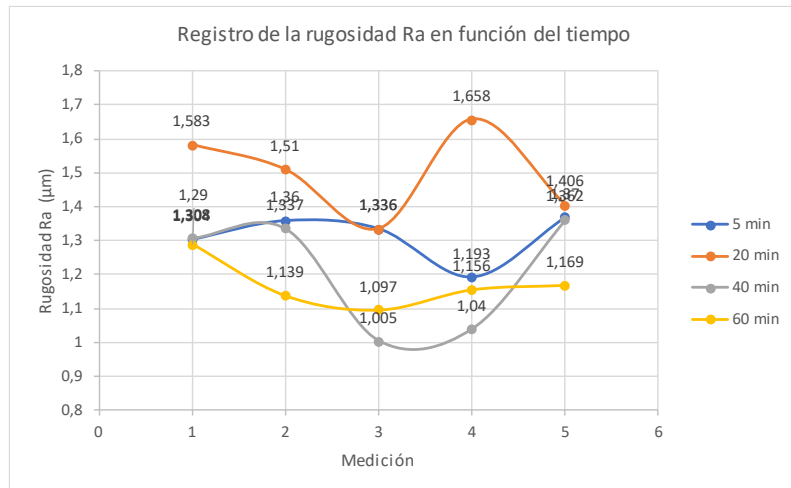


Figura 37. Comportamiento de la calidad superficial Ra en función del tiempo de mecanizado para la combinación de parámetros 235 m/min 2 racores 45°. Fuente: Autor

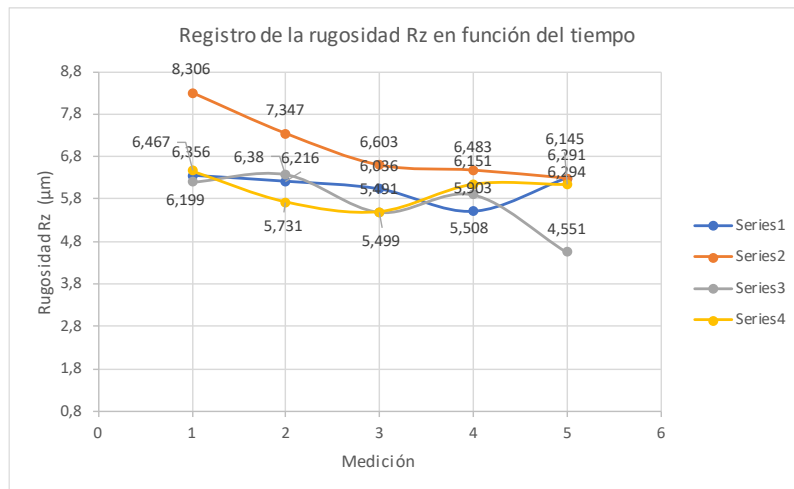





Figura 38. Comportamiento de la calidad superficial Rz en función del tiempo de mecanizado para la combinación de parámetros 235 m/min 2 racores 45°. Fuente: Autor

En las figuras 37 y 38 observamos cómo evoluciona la calidad superficial en función del tiempo, cuando inicia el proceso de mecanizado a los 5 minutos se aprecia un valor de rugosidad Ra y Rz inferior en relación con los 20, 40 y 60 minutos. La calidad superficial promedio a los 5 minutos para esta combinación de experimentos tiene un valor de 1,1702 μm Ra y 5,7048 μm Rz mientras que a los 60 minutos observamos una rugosidad promedio de 1,4986 μm Ra y 7,0066 μm Rz.

Experimento 3, 195 m/min 0,2 mm/rev 2 racores 30°

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA MAESTRÍA EN INGENIERÍA MECÁNICA MENCIÓN MANUFACTURA COHORTE 2019				
RUGOSIDAD SUPERFICIAL						
Datos Generales						
Tipo de estudio	Experimental	Número				
Fecha de ejecución	01/12/2020					
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato Laboratorio FICM					
Elaborado por	Diego Chadan	Revisado por	Ing. Diego Núñez			
Parámetros del proceso de torneado						
Material:	Acero AISI 316					
Sistema de lubricación:	Lubricación enfeamiento con nanofluido criogénico					
Fluido lubricante:	Unist Coolube 2210 EP - Nano partículas TiO ₂ - CO ₂					
Herramienta de corte:	CNMG120408 MF 2025					
Tipo de operación:	Acabado					
n (rpm) - Vc (m/min)	Vf (mm/min) - fn (mm/rev)	Ap (mm)	Radio de punta del inserto (mm)			
700 - 195	140 - 0,2	0,4	0,8			
Caudal lubricante (mL/h)	Presión aire comprimido (bar)	Presión CO ₂ (bar)	Ángulo de incidencia de CO ₂	Diámetro de la salida de CO ₂ (mm)	N° Racores	
480	2	10	30°	1.5	2	
Parámetros de medición superficial						
Rugosímetro	Norma	Longitud de muestreo	Longitud de cutt of	Mediciones		
Mitutoyo SJ 210	ISO 4287	0,8 mm	2,5 μm	5		
Ra						
Tiempo de medición (min)	Med. 1 (μm)	Med. 2 (μm)	Med. 3 (μm)	Med. 4 (μm)	Med. 5 (μm)	Promedio (μm)
5	1,27	1,487	1,604	1,352	1,363	1,4152
20	2,213	2,203	2,231	2,327	2,552	2,3052
40	1,828	1,739	1,861	1,947	1,874	1,8498
60	2,106	1,985	1,866	1,947	1,982	1,9772
Promedio Total			1,4152			
Rz						
Tiempo de medición (min)	Med. 1 (μm)	Med. 2 (μm)	Med. 3 (μm)	Med. 4 (μm)	Med. 5 (μm)	Promedio (μm)
5	5,887	7,011	7,587	6,745	6,392	6,7244
20	9,985	9,7	9,68	10,03	9,973	9,8736
40	8,897	8,78	8,936	9,874	8,769	9,0512
60	9,253	9,089	7,876	8,201	8,338	8,5514
Promedio Total			6,7244			
Resultados						
		<p>Estado Superficial Textura rugosa al tacto, marcas poco perceptibles a simple vista.</p> <p>Clase de rugosidad N6</p> <p>Proceso Torneado.</p>				

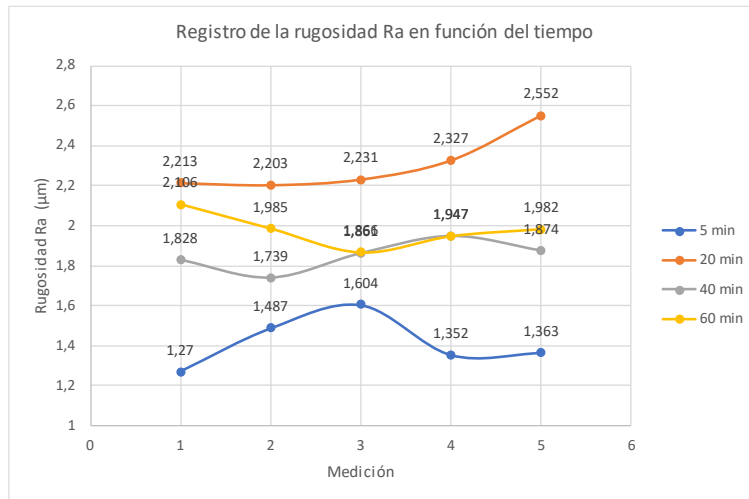


Figura 39. Comportamiento de la calidad superficial Ra en función del tiempo de mecanizado para la combinación de parámetros 195 m/min 2 racores 30°. Fuente: Autor

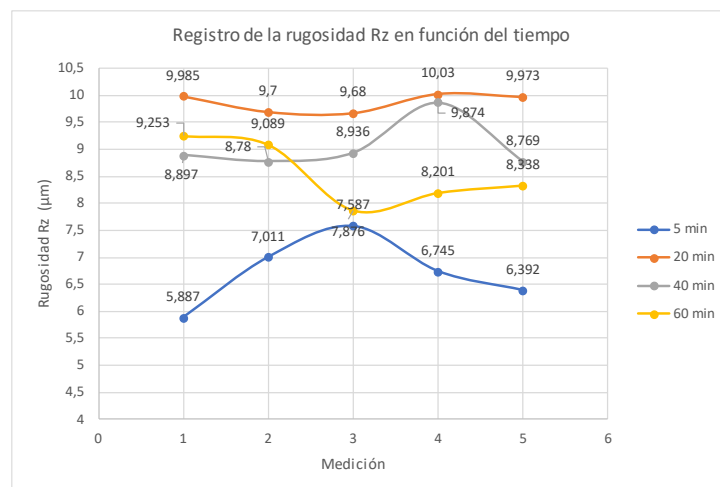





Figura 40. Comportamiento de la calidad superficial Rz en función del tiempo de mecanizado para la combinación de parámetros 195 m/min 2 racores 30°. Fuente: Autor

En las figuras 39 y 40 observamos cómo evoluciona la calidad superficial en función del tiempo, cuando inicia el proceso de mecanizado a los 5 minutos se aprecia un valor de rugosidad Ra y Rz inferior en relación con los 20, 40 y 60 minutos. La calidad superficial promedio a los 5 minutos para esta combinación de experimentos tiene un valor de 1,4152 μm Ra y 6,7244 μm Rz mientras que a los 60 minutos observamos una rugosidad promedio de 2,3052 μm Ra y 9,8736 μm Rz.

Experimento 4, 235 m/min 0,2 mm/rev 2 racores 30°

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA MAESTRÍA EN INGENIERÍA MECÁNICA MENCIÓN MANUFACTURA COHORTE 2019				
RUGOSIDAD SUPERFICIAL						
Datos Generales						
Tipo de estudio	Experimental	Número				
Fecha de ejecución	01/12/2020					
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato Laboratorio FICM					
Elaborado por	Diego Chadan	Revisado por	Ing. Diego Núñez			
Parámetros del proceso de torneado						
Material:	Acero AISI 316					
Sistema de lubricación:	Lubricación enfriamiento con nanofluido criogénico					
Fluido lubricante:	Unist Coolube 2210 EP - Nano partículas TiO ₂ - CO ₂					
Herramienta de corte:	CNMG120408 MF 2025					
Tipo de operación:	Acabado					
n (rpm) - Vc (m/min)	Vf (mm/min) - fn (mm/rev)	Ap (mm)	Radio de punta del inserto (mm)			
840 - 235	170 - 0,2	0,4	0,8			
Caudal lubricante (mL/h)	Presión aire comprimido (bar)	Presión CO ₂ (bar)	Ángulo de incidencia de CO ₂	Diámetro de la salida de CO ₂ (mm)	N° Racores	
480	2	10	30°	1.5	2	
Parámetros de medición superficial						
Rugosímetro	Norma	Longitud de muestreo	Longitud de cutt of	Mediciones		
Mitutoyo SJ 210	ISO 4287	0,8 mm	2,5 μm	5		
Ra						
Tiempo de medición (min)	Med. 1 (μm)	Med. 2 (μm)	Med. 3 (μm)	Med. 4 (μm)	Med. 5 (μm)	Promedio (μm)
5	1,552	1,557	1,603	1,587	1,593	1,5784
20	1,658	1,708	1,663	1,753	1,711	1,6986
40	1,417	1,46	1,453	1,456	1,35	1,4272
60	1,756	1,736	1,029	1,141	1,612	1,4548
Promedio Total			1,5784			
Rz						
Tiempo de medición (min)	Med. 1 (μm)	Med. 2 (μm)	Med. 3 (μm)	Med. 4 (μm)	Med. 5 (μm)	Promedio (μm)
5	6,767	6,753	7,012	7,134	6,958	6,9248
20	7,102	7,043	6,896	7,268	6,931	7,048
40	6,484	6,443	6,338	6,47	5,935	6,334
60	7,659	7,753	5,415	6,538	7,531	6,9792
Promedio Total			6,9248			
Resultados						
			Estado Superficial Textura rugosa al tacto, marcas poco perceptibles a simple vista. Clase de rugosidad N6 Proceso Torneado.			

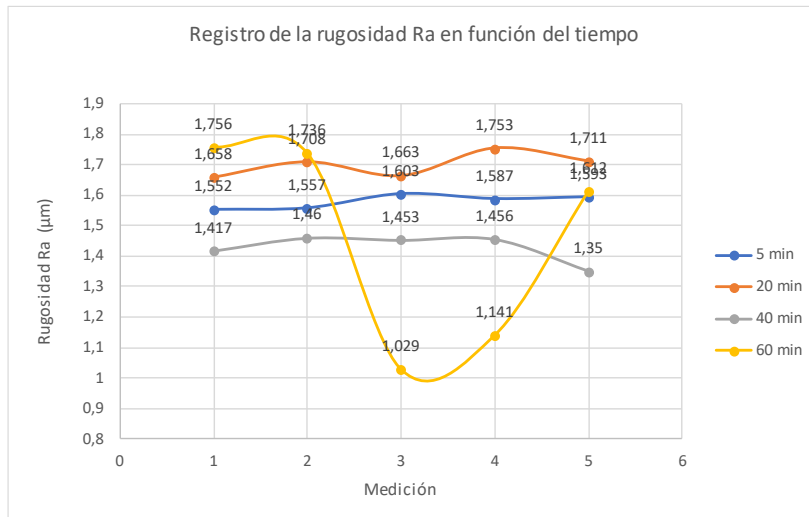


Figura 41. Comportamiento de la calidad superficial Ra en función del tiempo de mecanizado para la combinación de parámetros 235 m/min 2 racores 30°. Fuente: Autor

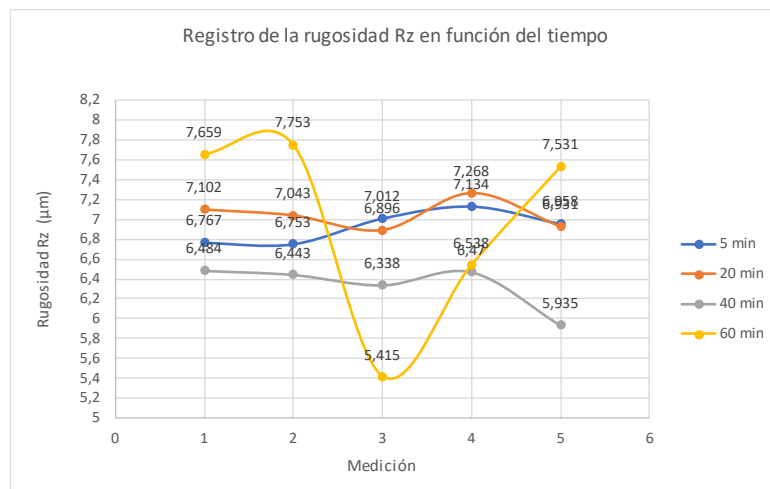





Figura 42. Comportamiento de la calidad superficial Rz en función del tiempo de mecanizado para la combinación de parámetros 235 m/min 2 racores 30°. Fuente: Autor

En las figuras 41 y 42 observamos cómo evoluciona la calidad superficial en función del tiempo, cuando inicia el proceso de mecanizado a los 5 minutos se aprecia un valor de rugosidad Ra y Rz inferior en relación con los 20, 40 y 60 minutos. La calidad superficial promedio a los 5 minutos para esta combinación de experimentos tiene un valor de 1,4272 μm Ra y 6,334 μm Rz mientras que a los 60 minutos observamos una rugosidad promedio de 1,6986 μm Ra y 7,048 μm Rz.

Experimento 5, 195 m/min 0,2 mm/rev 3 racores 45°

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA MAESTRÍA EN INGENIERÍA MECÁNICA MENCIÓN MANUFACTURA COHORTE 2019					
RUGOSIDAD SUPERFICIAL							
Datos Generales							
Tipo de estudio	Experimental	Número					
Fecha de ejecución	01/12/2020						
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato Laboratorio FICM						
Elaborado por	Diego Chadan	Revisado por		Ing. Diego Núñez			
Parámetros del proceso de torneado							
Material:	Acero AISI 316						
Sistema de lubricación:	Lubricación enfriamiento con nanofluido criogénico						
Fluido lubricante:	Unist Coolube 2210 EP - Nano partículas TiO ₂ - CO ₂						
Herramienta de corte:	CNMG120408 MF 2025						
Tipo de operación:	Acabado						
n (rpm) - Vc (m/min)	Vf (mm/min) - fn (mm/rev)	Ap (mm)	Radio de punta del inserto (mm)				
700 - 195	140 - 0,2	0,4	0,8				
Caudal lubricante (mL/h)	Presión aire comprimido (bar)	Presión CO ₂ (bar)	Ángulo de incidencia de CO ₂	Diámetro de la salida de CO ₂ (mm)	N° Racores		
480	2	10	45°	1.5	3		
Parámetros de medición superficial							
Rugosímetro	Norma	Longitud de muestreo	Longitud de cutt of	Mediciones			
Mitutoyo SJ 210	ISO 4287	0,8 mm	2,5 μm	5			
Ra							
Tiempo de medición (min)	Med. 1 (μm)	Med. 2 (μm)	Med. 3 (μm)	Med. 4 (μm)	Med. 5 (μm)	Promedio (μm)	
5	1,748	2,007	1,937	1,991	1,982	1,933	
20	1,142	1,27	1,537	1,097	1,076	1,2244	
40	1,428	1,672	1,286	1,254	1,231	1,3742	
60	0,748	1,576	0,984	1,152	1,428	1,1776	
Rz							
Tiempo de medición (min)	Med. 1 (μm)	Med. 2 (μm)	Med. 3 (μm)	Med. 4 (μm)	Med. 5 (μm)	Promedio (μm)	
5	6,097	6,417	6,053	6,24	6,399	6,2412	
20	5,163	5,605	6,598	5,134	4,911	5,4822	
40	6,649	7,443	5,992	5,847	6,022	6,3906	
60	4,312	6,959	5,349	5,455	5,761	5,5672	
Resultados							
			<p>Estado Superficial Textura rugosa al tacto, marcas poco perceptibles a simple vista.</p> <p>Clase de rugosidad N6</p> <p>Proceso Torneado.</p>				

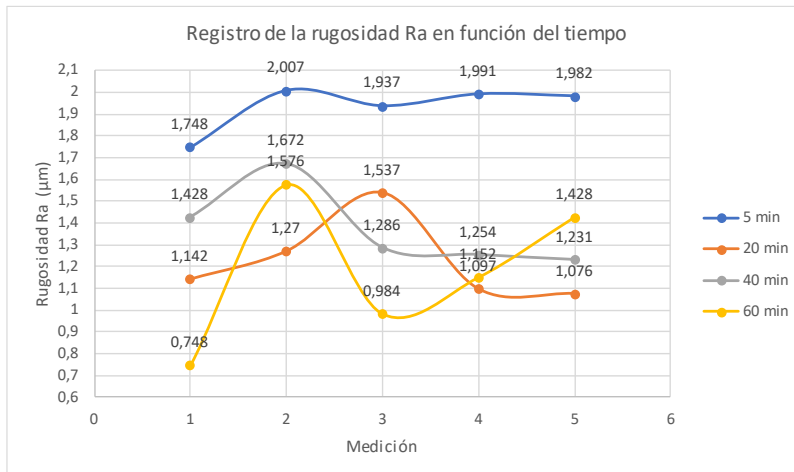


Figura 43. Comportamiento de la calidad superficial Ra en función del tiempo de mecanizado para la combinación de parámetros 195 m/min 3 racores 45°. Fuente: Autor

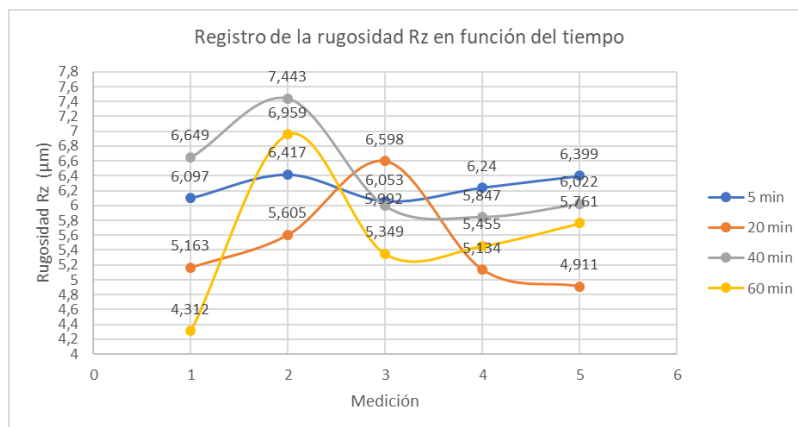





Figura 44. Comportamiento de la calidad superficial Rz en función del tiempo de mecanizado para la combinación de parámetros 195 m/min 3 racores 45°. Fuente: Autor

En las figuras 43 y 44 observamos cómo evoluciona la calidad superficial en función del tiempo, cuando inicia el proceso de mecanizado a los 5 minutos se aprecia un valor de rugosidad Ra y Rz inferior en relación con los 20, 40 y 60 minutos. La calidad superficial promedio a los 5 minutos para esta combinación de experimentos tiene un valor de 0,933 μm Ra y 5,4822 μm Rz mientras que a los 60 minutos observamos una rugosidad promedio de 1,3742 μm Ra y 6,3906 μm Rz.

Experimento 6, 235 m/min 0,2 mm/rev 3 racores 45°

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA MAESTRÍA EN INGENIERÍA MECÁNICA MENCIÓN MANUFACTURA COHORTE 2019				
RUGOSIDAD SUPERFICIAL						
Datos Generales						
Tipo de estudio	Experimental	Número				
Fecha de ejecución	01/12/2020					
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato Laboratorio FICM					
Elaborado por	Diego Chadan	Revisado por	Ing. Diego Núñez			
Parámetros del proceso de torneado						
Material:	Acero AISI 316					
Sistema de lubricación:	Lubricación enfriamiento con nanofluido criogénico					
Fluido lubricante:	Unist Coolube 2210 EP - Nano partículas TiO ₂ - CO ₂					
Herramienta de corte:	CNMG120408 MF 2025					
Tipo de operación:	Acabado					
n (rpm) - Vc (m/min)	Vf (mm/min) - fn (mm/rev)	Ap (mm)	Radio de punta del inserto (mm)			
840 - 235	170 - 0,2	0,4	0,8			
Caudal lubricante (mL/h)	Presión aire comprimido (bar)	Presión CO ₂ (bar)	Ángulo de incidencia de CO ₂	Diámetro de la salida de CO ₂ (mm)	Nº Racores	
480	2	10	45°	1.5	3	
Parámetros de medición superficial						
Rugosímetro	Norma	Longitud de muestreo	Longitud de cutt of	Mediciones		
Mitutoyo SJ 210	ISO 4287	0,8 mm	2,5 µm	5		
Ra						
Tiempo de medición (min)	Med. 1 (µm)	Med. 2 (µm)	Med. 3 (µm)	Med. 4 (µm)	Med. 5 (µm)	Promedio (µm)
5	1,224	1,501	1,408	1,24	1,047	1,284
20	1,532	1,555	1,539	1,547	1,569	1,5484
40	1,404	1,353	1,375	1,386	1,353	1,3742
60	1,052	1,086	1,047	1,077	1,03	1,0584
Promedio Total			1,284			
Rz						
Tiempo de medición (min)	Med. 1 (µm)	Med. 2 (µm)	Med. 3 (µm)	Med. 4 (µm)	Med. 5 (µm)	Promedio (µm)
5	6,717	6,601	6,911	7,193	6,209	6,7262
20	6,416	6,634	6,396	6,822	6,523	6,5582
40	5,99	5,759	5,994	5,845	5,62	5,8416
60	5,79	6,012	5,428	5,539	5,582	5,6702
Promedio Total			6,7262			
Resultados						
			Estado Superficial Textura rugosa al tacto, marcas poco perceptibles a simple vista. Clase de rugosidad N6 Proceso Torneado.			

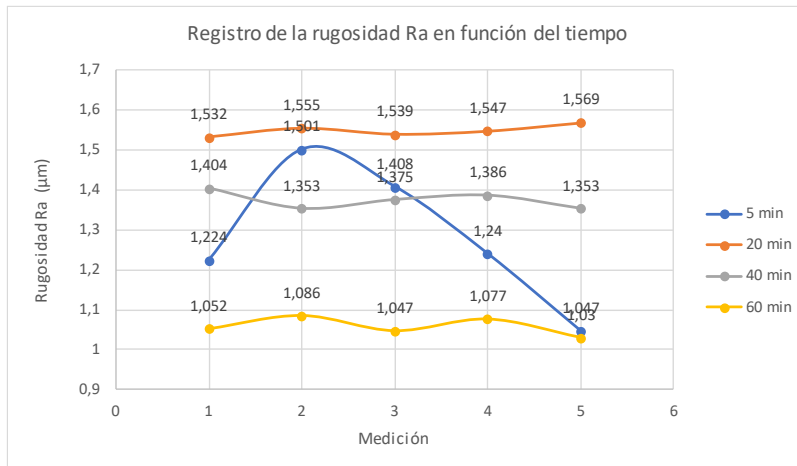


Figura 45. Comportamiento de la calidad superficial Ra en función del tiempo de mecanizado para la combinación de parámetros 235 m/min 3 racores 45°. Fuente: Autor

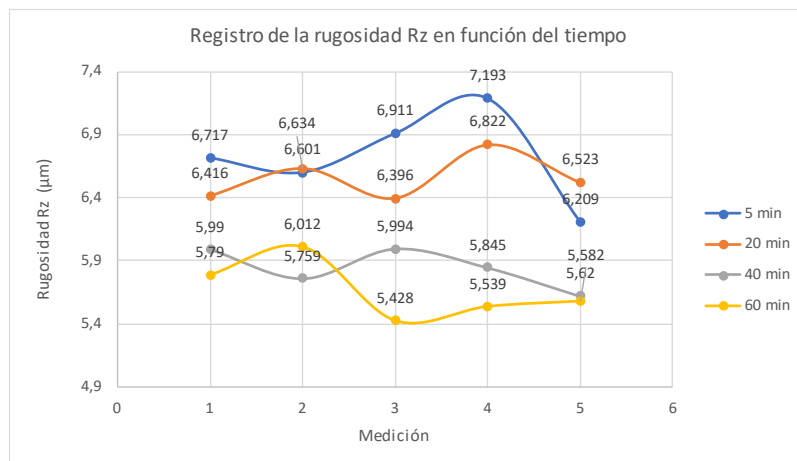





Figura 46. Comportamiento de la calidad superficial Rz en función del tiempo de mecanizado para la combinación de parámetros 235 m/min 3 racores 45°. Fuente: Autor

En las figuras 45 y 46 observamos cómo evoluciona la calidad superficial en función del tiempo, cuando inicia el proceso de mecanizado a los 5 minutos se aprecia un valor de rugosidad Ra y Rz inferior en relación con los 20, 40 y 60 minutos. La calidad superficial promedio a los 5 minutos para esta combinación de experimentos tiene un valor de 1,0584 µm Ra y 5,6702 µm Rz mientras que a los 60 minutos observamos una rugosidad promedio de 1,5484 µm Ra y 6,7262 µm Rz.

Experimento 7, 195 m/min 0,2 mm/rev 3 racores 30°

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA MAESTRÍA EN INGENIERÍA MECÁNICA MENCIÓN MANUFACTURA COHORTE 2019				
RUGOSIDAD SUPERFICIAL						
Datos Generales						
Tipo de estudio	Experimental	Número				
Fecha de ejecución	01/12/2020					
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato Laboratorio FICM					
Elaborado por	Diego Chadan	Revisado por	Ing. Diego Núñez			
Parámetros del proceso de torneado						
Material:	Acero AISI 316					
Sistema de lubricación:	Lubricación enfriamiento con nanofluido criogénico					
Fluido lubricante:	Unist Coolube 2210 EP - Nano partículas TiO ₂ - CO ₂					
Herramienta de corte:	CNMG120408 MF 2025					
Tipo de operación:	Acabado					
n (rpm) - Vc (m/min)	Vf (mm/min) - fn (mm/rev)	Ap (mm)	Radio de punta del inserto (mm)			
700 - 195	140 - 0,2	0,4	0,8			
Caudal lubricante (mL/h)	Presión aire comprimido (bar)	Presión CO ₂ (bar)	Ángulo de incidencia de CO ₂	Diámetro de la salida de CO ₂ (mm)	N° Racores	
480	2	10	30°	1.5	3	
Parámetros de medición superficial						
Rugosímetro	Norma	Longitud de muestreo	Longitud de cutt of	Mediciones		
Mitutoyo SJ 210	ISO 4287	0,8 mm	2,5 μm	5		
Ra						
Tiempo de medición (min)	Med. 1 (μm)	Med. 2 (μm)	Med. 3 (μm)	Med. 4 (μm)	Med. 5 (μm)	Promedio (μm)
5	1,807	1,811	1,812	1,79	1,802	1,8044
20	1,245	1,273	1,25	1,246	1,246	1,252
40	2,447	2,717	2,215	2,489	2,409	2,4554
60	1,587	1,771	0,891	1,813	1,304	1,4732
Rz						
Tiempo de medición (min)	Med. 1 (μm)	Med. 2 (μm)	Med. 3 (μm)	Med. 4 (μm)	Med. 5 (μm)	Promedio (μm)
5	4,21	4,321	4,269	4,122	4,087	4,2018
20	6,77	6,774	6,943	7,01	6,984	6,8962
40	11,427	12,823	10,624	11,528	11,129	11,5062
60	8,499	8,986	5,532	8,267	7,213	7,6994
Resultados						
			Estado Superficial Textura rugosa al tacto, marcas poco perceptibles a simple vista.			
			Clase de rugosidad N6			
			Proceso Torneado.			

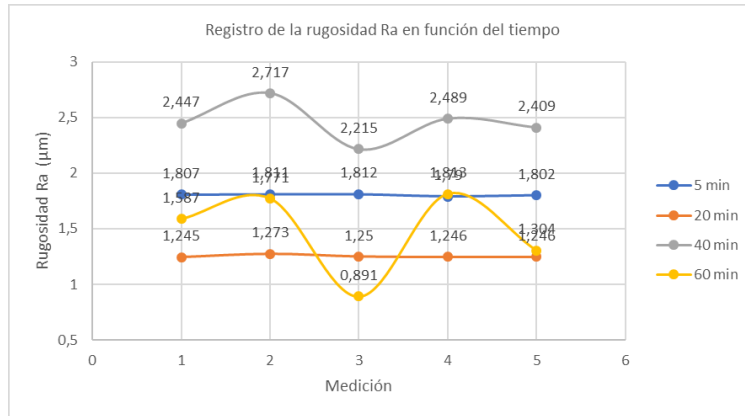


Figura 47. Comportamiento de la calidad superficial Ra en función del tiempo de mecanizado para la combinación de parámetros 195 m/min 3 racores 30°. Fuente: Autor

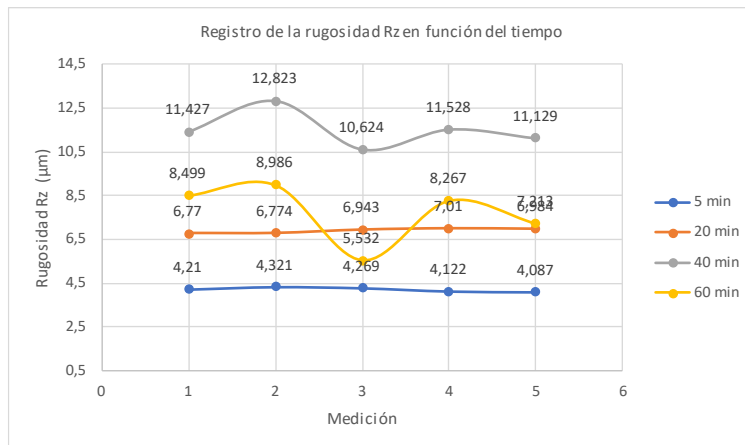





Figura 48. Comportamiento de la calidad superficial Rz en función del tiempo de mecanizado para la combinación de parámetros 195 m/min 3 racores 30°. Fuente: Autor.

En las figuras 47 y 48 observamos cómo evoluciona la calidad superficial en función del tiempo, cuando inicia el proceso de mecanizado a los 5 minutos se aprecia un valor de rugosidad Ra y Rz inferior en relación con los 20, 40 y 60 minutos. La calidad superficial promedio a los 5 minutos para esta combinación de experimentos tiene un valor de 0,8044 μm Ra y 4,2018 μm Rz mientras que a los 60 minutos observamos una rugosidad promedio de 2,4554 μm Ra y 11,5062 μm Rz.

Experimento 8, 235 m/min 0,2 mm/rev 3 racores 30°

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA MAESTRÍA EN INGENIERÍA MECÁNICA MENCIÓN MANUFACTURA COHORTE 2019					
RUGOSIDAD SUPERFICIAL							
Datos Generales							
Tipo de estudio	Experimental	Número					
Fecha de ejecución	01/12/2020						
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato Laboratorio FICM						
Elaborado por	Diego Chadan	Revisado por		Ing. Diego Núñez			
Parámetros del proceso de torneado							
Material:	Acero AISI 316						
Sistema de lubricación:	Lubricación enfriamiento con nanofluido criogénico						
Fluido lubricante:	Unist Coolube 2210 EP - Nano partículas TiO ₂ - CO ₂						
Herramienta de corte:	CNMG120408 MF 2025						
Tipo de operación:	Acabado						
n (rpm) - Vc (m/min)	Vf (mm/min) - fn (mm/rev)	Ap (mm)	Radio de punta del inserto (mm)				
840 - 235	170 - 0,2	0,4	0,8				
Caudal lubricante (mL/h)	Presión aire comprimido (bar)	Presión CO ₂ (bar)	Ángulo de incidencia de CO ₂	Diámetro de la salida de CO ₂ (mm)	N° Racores		
480	2	10	30°	1.5	3		
Parámetros de medición superficial							
Rugosímetro	Norma	Longitud de muestreo	Longitud de cutt of	Mediciones			
Mitutoyo SJ 210	ISO 4287	0,8 mm	2,5 μm	5			
Ra							
Tiempo de medición (min)	Med. 1 (μm)	Med. 2 (μm)	Med. 3 (μm)	Med. 4 (μm)	Med. 5 (μm)	Promedio (μm)	
5	1,9	1,925	1,981	1,917	1,825	1,9096	
20	1,486	1,509	1,444	1,345	1,447	1,4462	
40	1,684	1,621	1,616	1,615	1,61	1,6292	
60	0,888	0,775	0,8	0,817	0,782	0,8124	
Rz							
Tiempo de medición (min)	Med. 1 (μm)	Med. 2 (μm)	Med. 3 (μm)	Med. 4 (μm)	Med. 5 (μm)	Promedio (μm)	
5	7,583	7,825	7,461	7,367	7,77	7,6012	
20	6,912	7,201	6,771	6,484	7,018	6,8772	
40	6,987	7,016	6,46	6,855	6,938	6,8512	
60	5,534	3,643	4,332	4,912	4,246	4,5334	
Resultados							
			<p>Estado Superficial Textura rugosa al tacto, marcas poco perceptibles a simple vista.</p> <p>Clase de rugosidad N6</p> <p>Proceso Torneado.</p>				

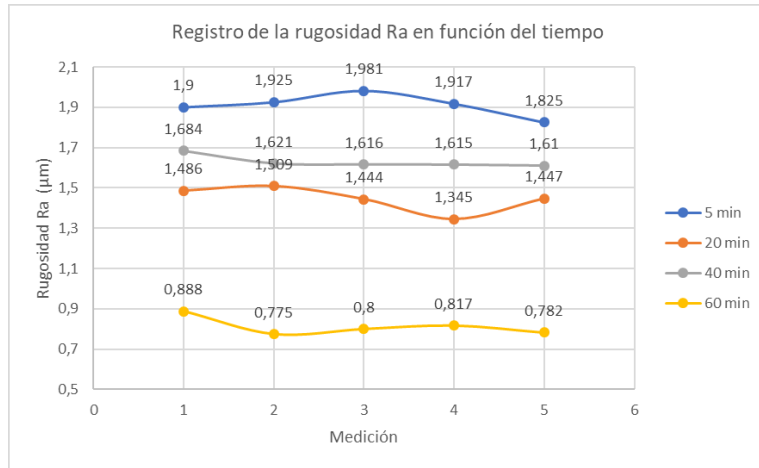


Figura 49. Comportamiento de la calidad superficial Ra en función del tiempo de mecanizado para la combinación de parámetros 235 m/min 3 racores 30°. Fuente: Autor

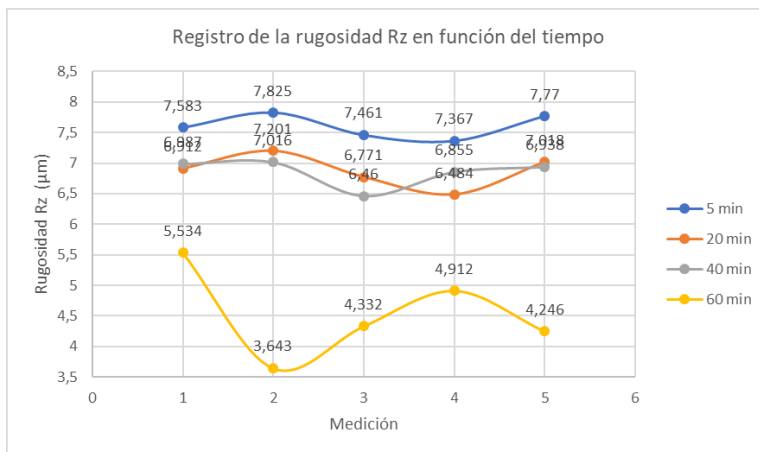


Figura 50. Comportamiento de la calidad superficial Rz en función del tiempo de mecanizado para la combinación de parámetros 235 m/min 3 racores 30°. Fuente: Autor

En las figuras 49 y 50 observamos cómo evoluciona la calidad superficial en función del tiempo, cuando inicia el proceso de mecanizado a los 5 minutos se aprecia un valor de rugosidad Ra y Rz inferior en relación con los 20, 40 y 60 minutos. La calidad superficial promedio a los 5 minutos para esta combinación de experimentos tiene un valor de 0,8124 μm Ra y 4,5334 μm Rz mientras que a los 60 minutos observamos una rugosidad promedio de 1,9096 μm Ra y 7,6012 μm Rz.

Comparación experimento 1 y 2.

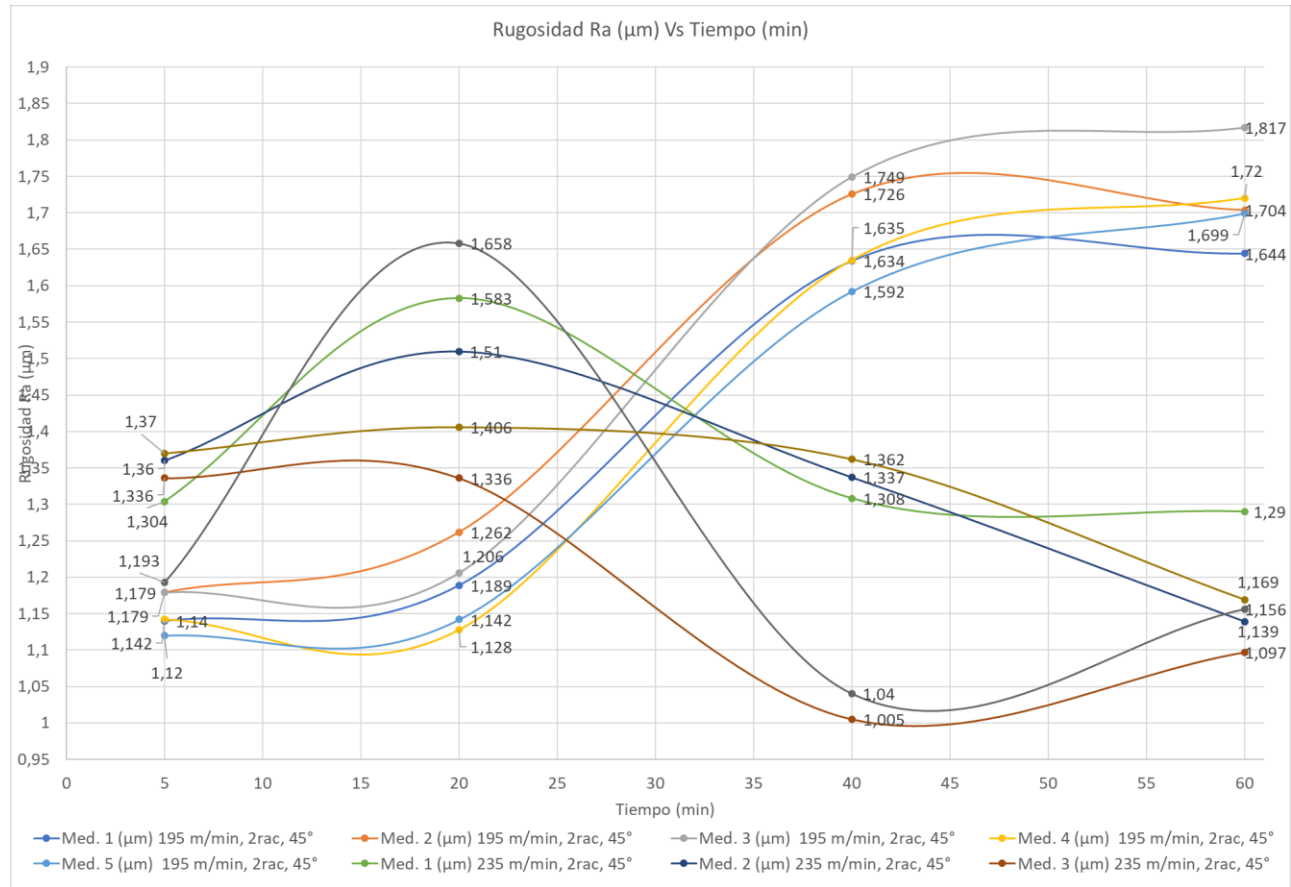


Figura 51. Comportamiento de la calidad superficial Ra en función del tiempo de mecanizado para la combinación de parámetros 195 y 235 m/min 2 racos 45°.

Fuente: Autor.

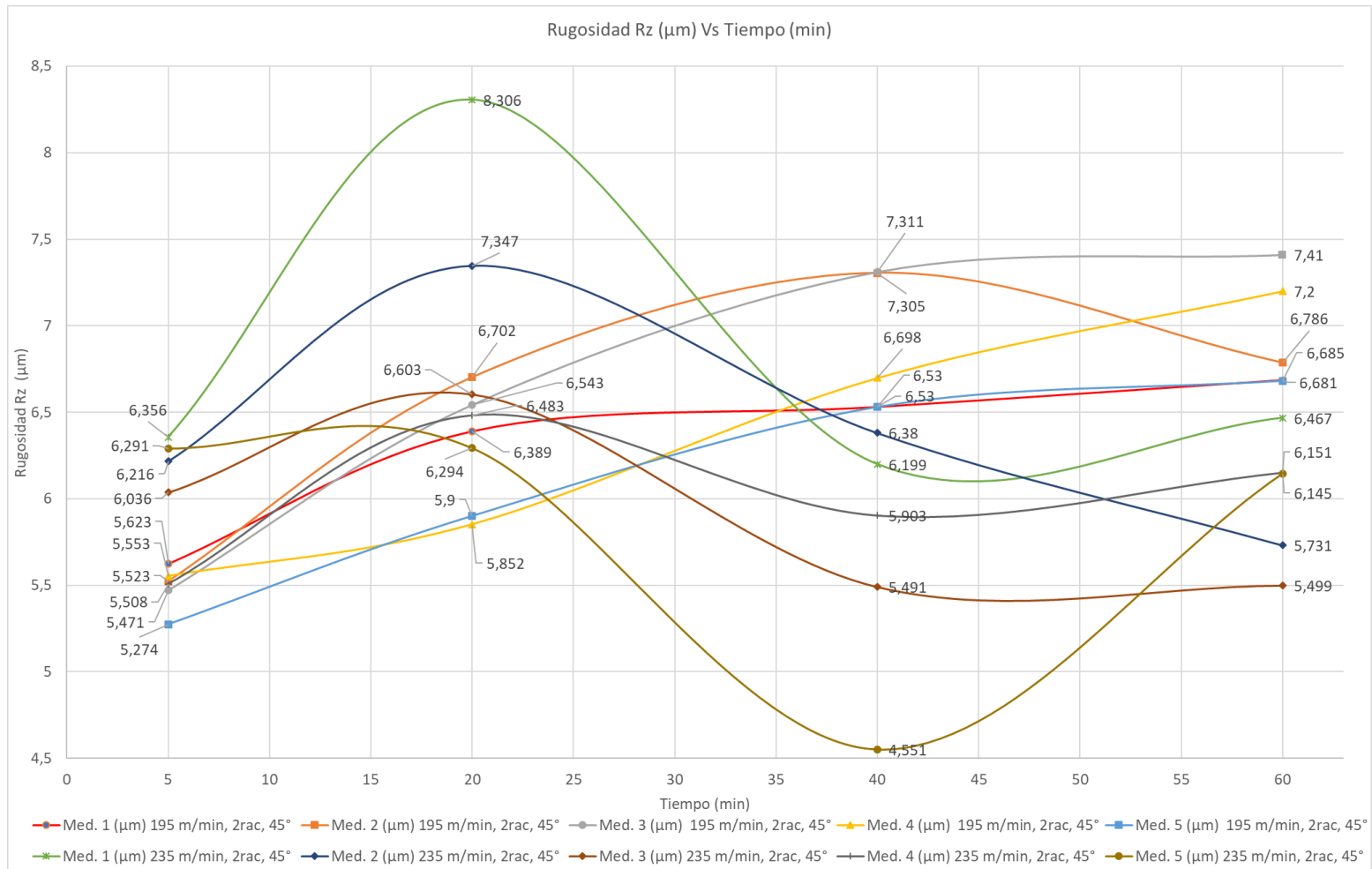


Figura 52. Comportamiento de la calidad superficial Rz en función del tiempo de mecanizado para la combinación de parámetros 195 y 235 m/min 2 racores 45°. Fuente: Autor.

Comparación experimento 3 y 4.

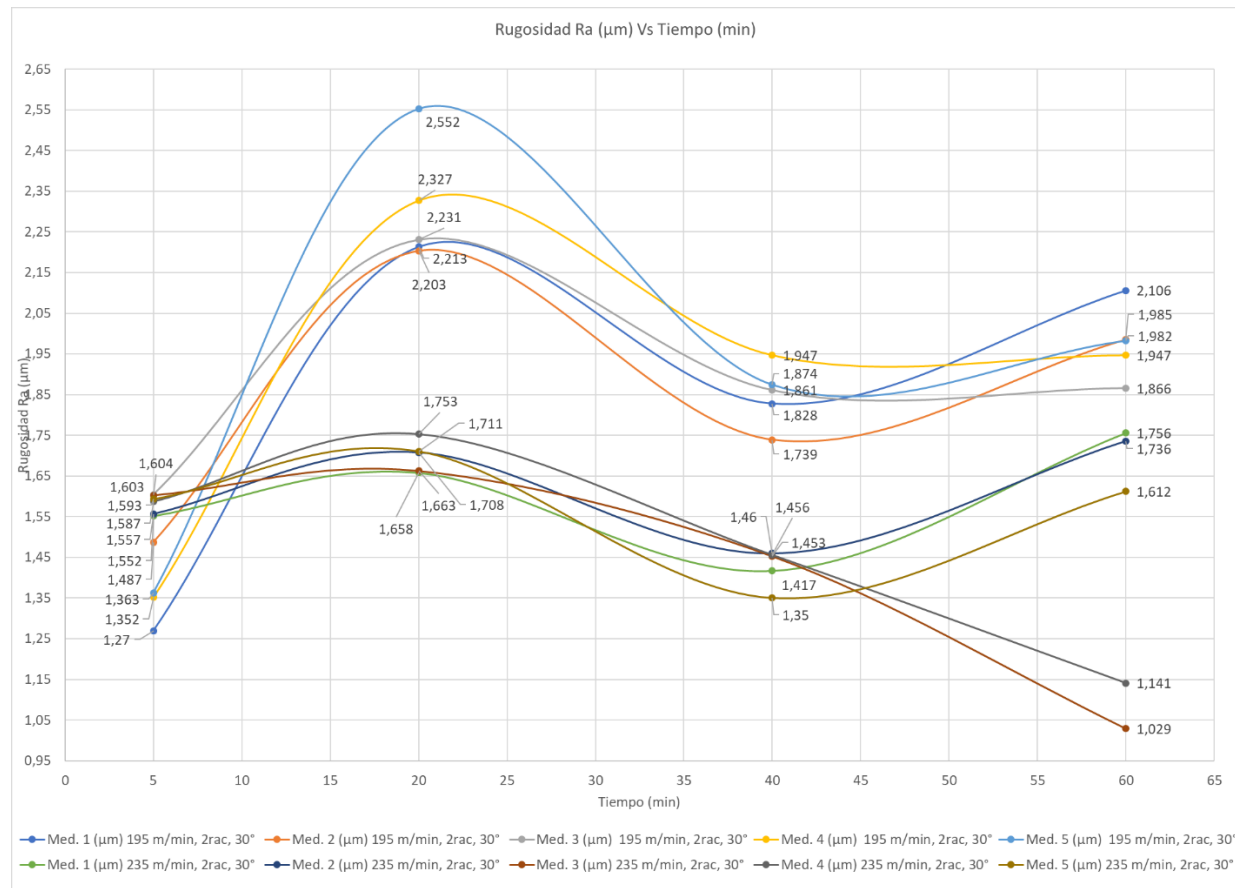


Figura 53. Comportamiento de la calidad superficial Ra en función del tiempo de mecanizado para la combinación de parámetros 195 y 235 m/min 2 racores 30°.

Fuente: Autor.

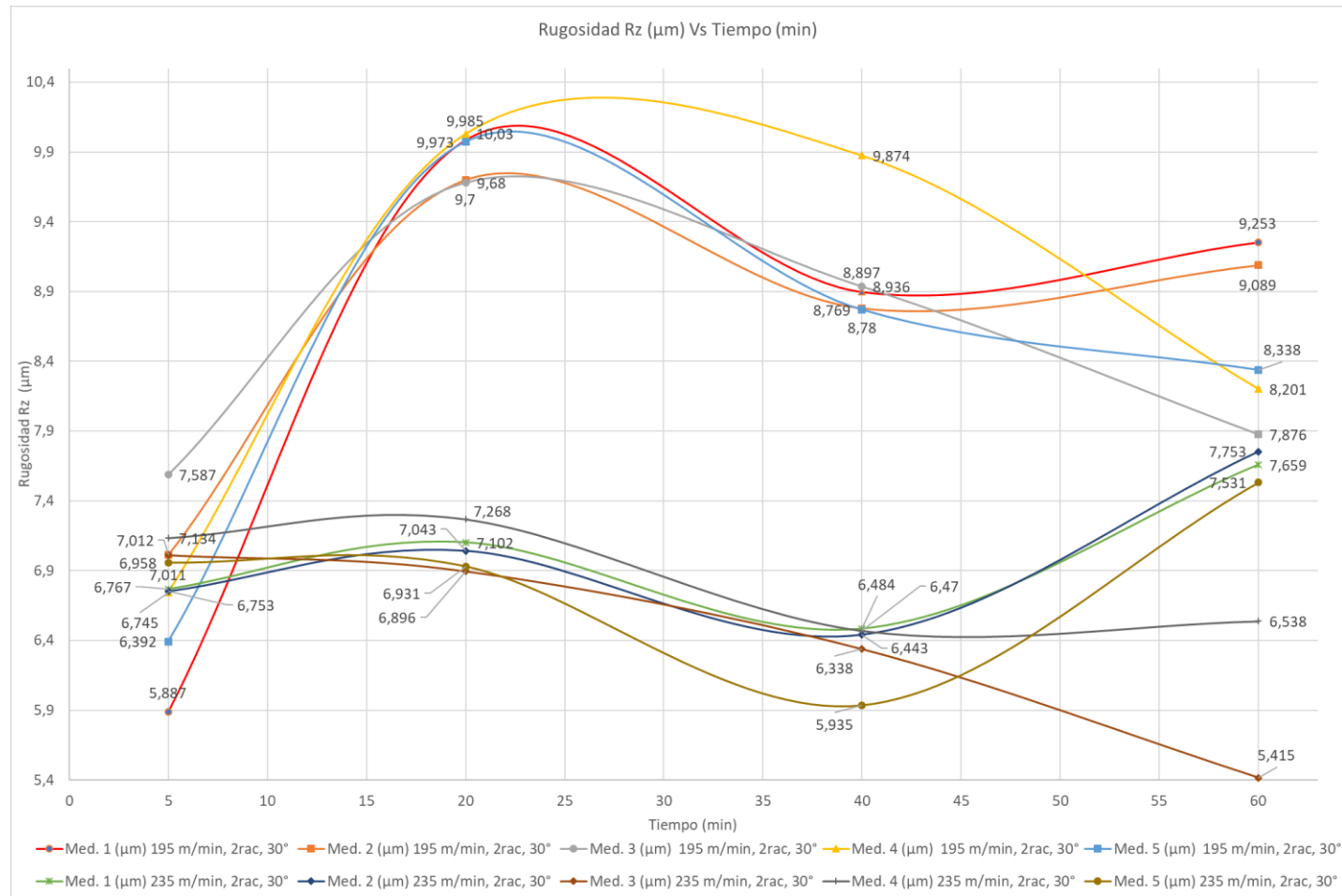


Figura 54. Comportamiento de la calidad superficial Rz en función del tiempo de mecanizado para la combinación de parámetros 195 y 235 m/min 2 racos 30°.

Fuente: Autor.

Comparación experimento 5 y 6.

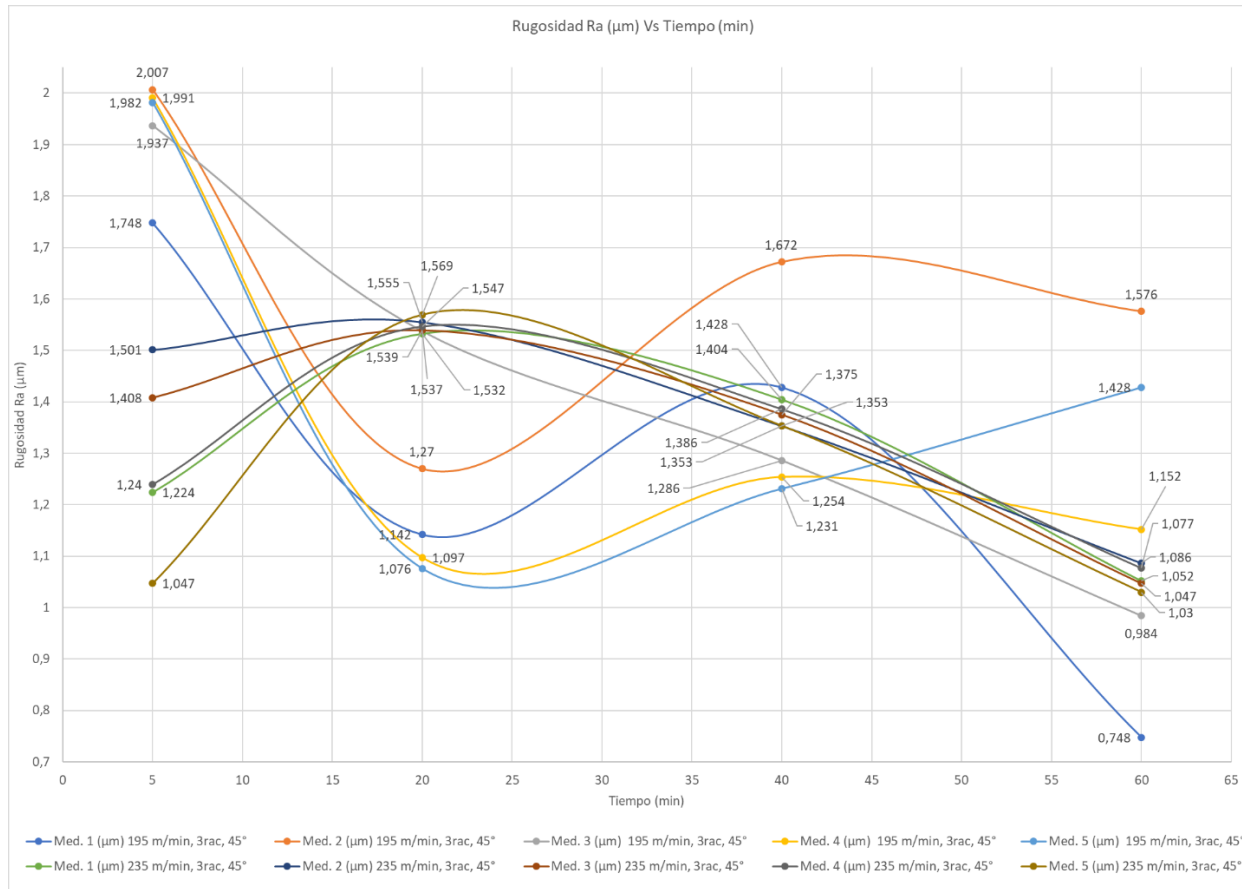


Figura 55. Comportamiento de la calidad superficial Ra en función del tiempo de mecanizado para la combinación de parámetros 195 y 235 m/min 3 racores 45°.

Fuente: Autor.

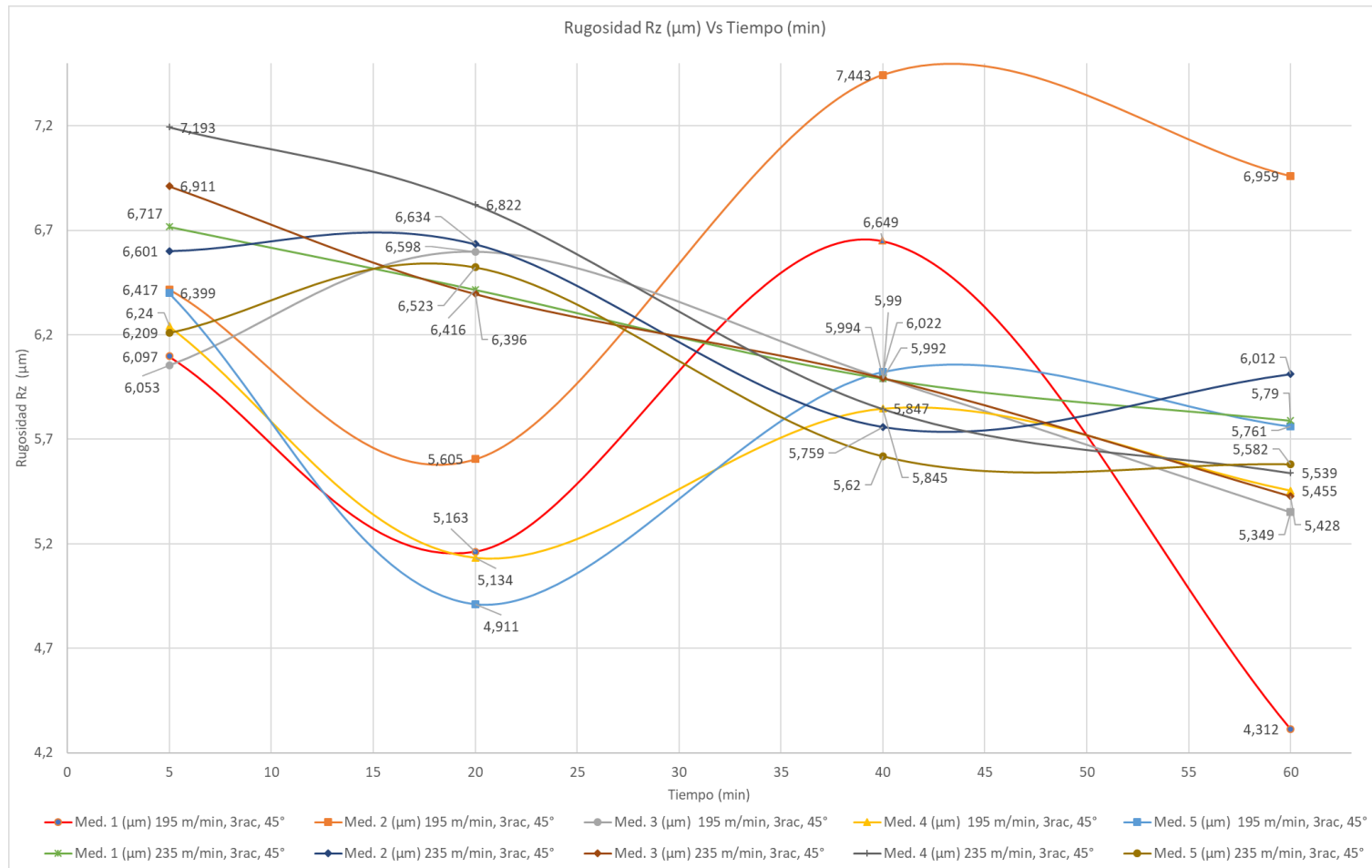


Figura 56. Comportamiento de la calidad superficial Rz en función del tiempo de mecanizado para la combinación de parámetros 195 y 235 m/min 3 racores 45°.

Fuente: Autor.

Comparación experimento 7 y 8.

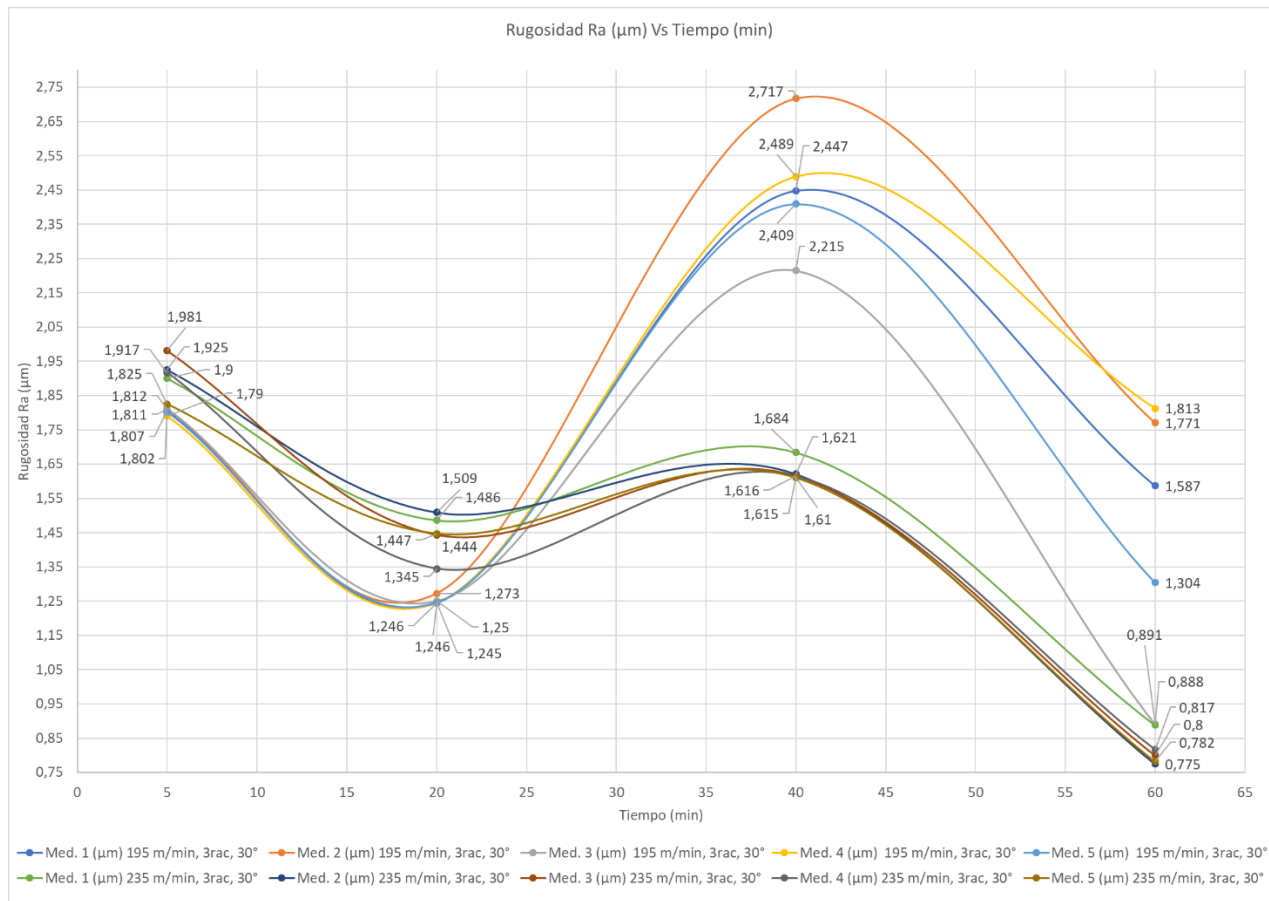


Figura 57. Comportamiento de la calidad superficial Ra en función del tiempo de mecanizado para la combinación de parámetros 195 y 235 m/min 3 racores 30°.

Fuente: Autor.

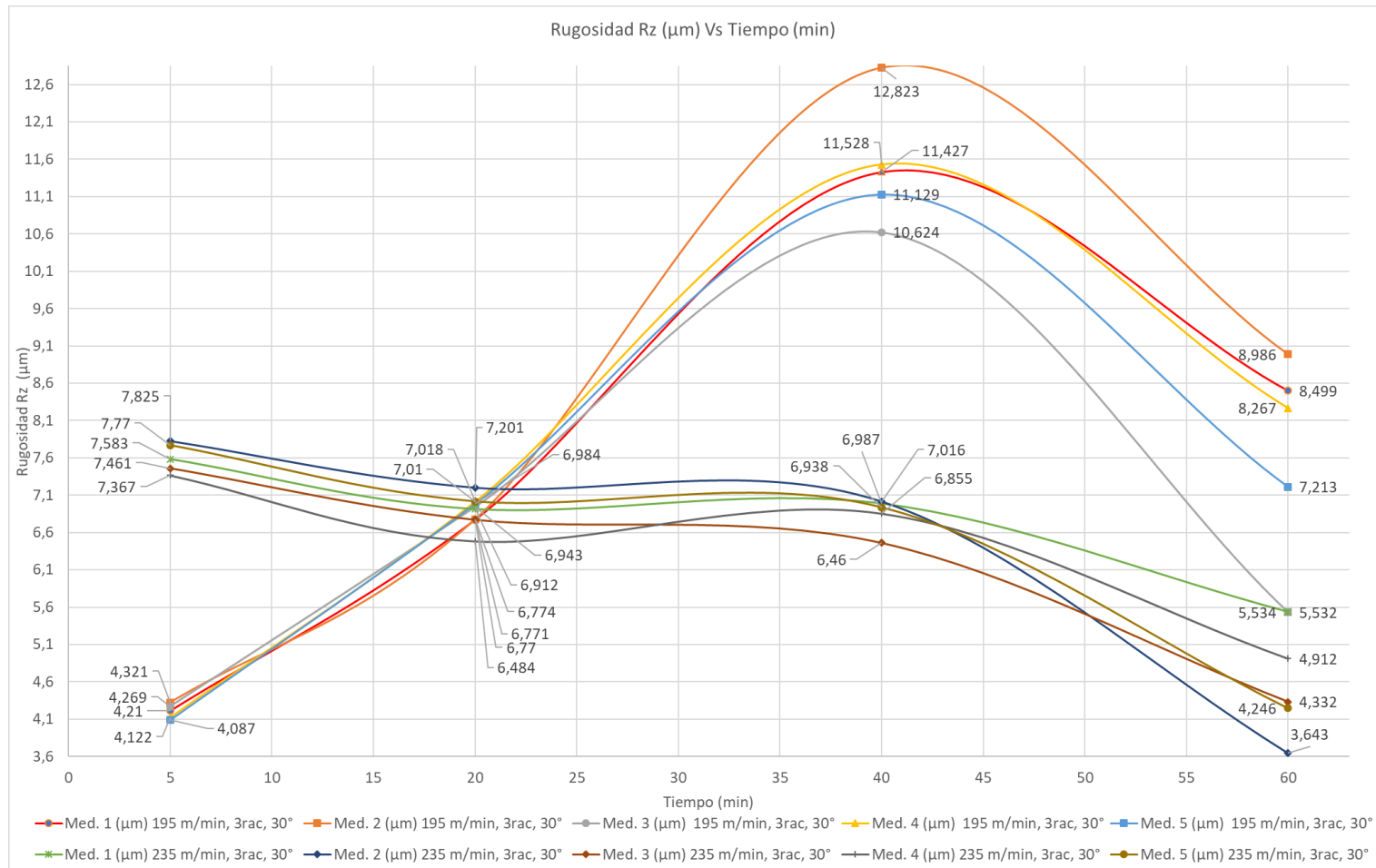


Figura 58. Comportamiento de la calidad superficial Rz en función del tiempo de mecanizado para la combinación de parámetros 195 y 235 m/min 3 racores 30°.

Fuente: Autor.

Comportamiento de Promedios de cada experimento desde el 1 al 8.

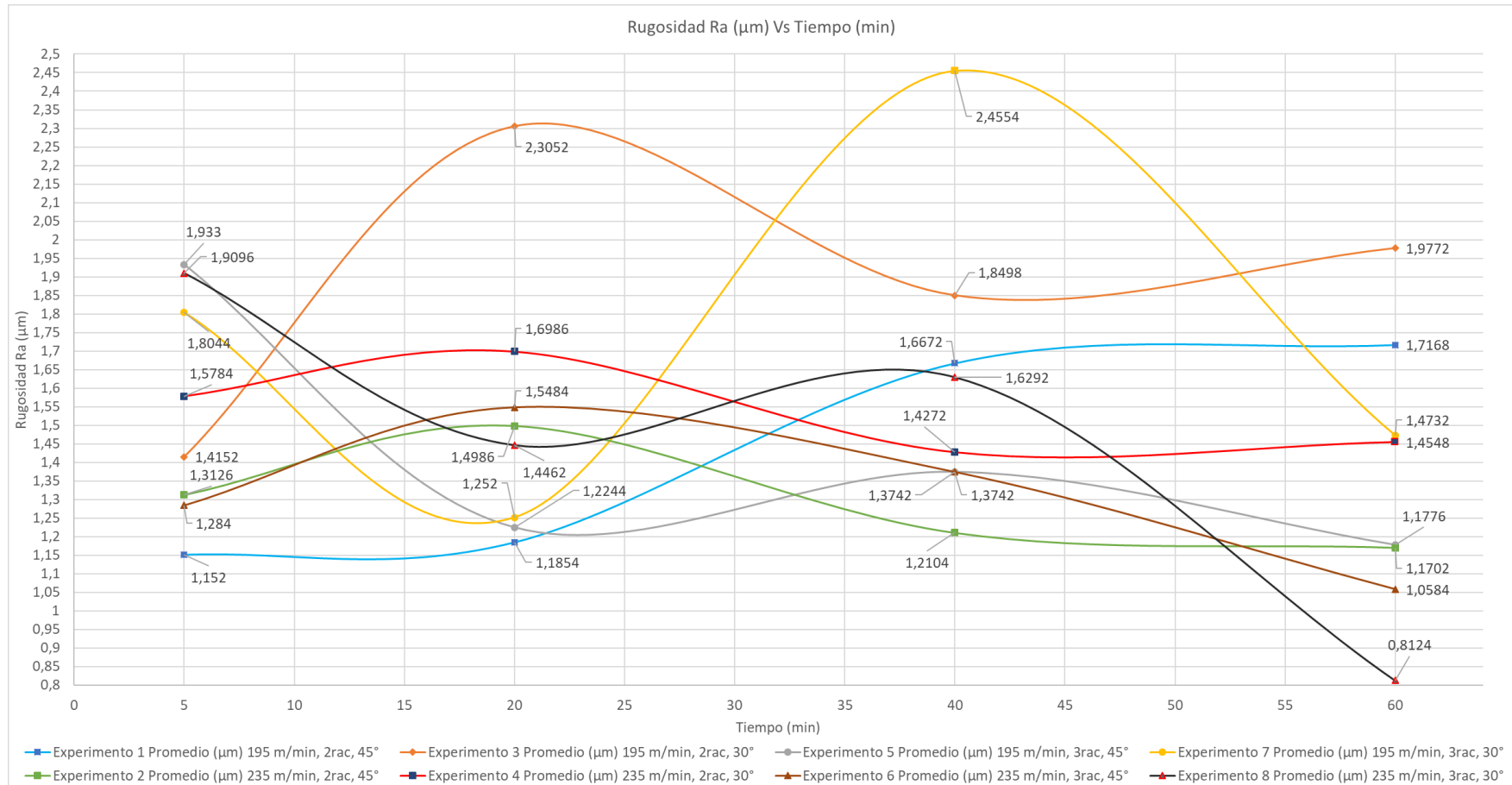


Figura 59. Comportamiento de la calidad superficial Ra en función del tiempo de mecanizado para los promedios de cada experimento

Fuente: Autor.

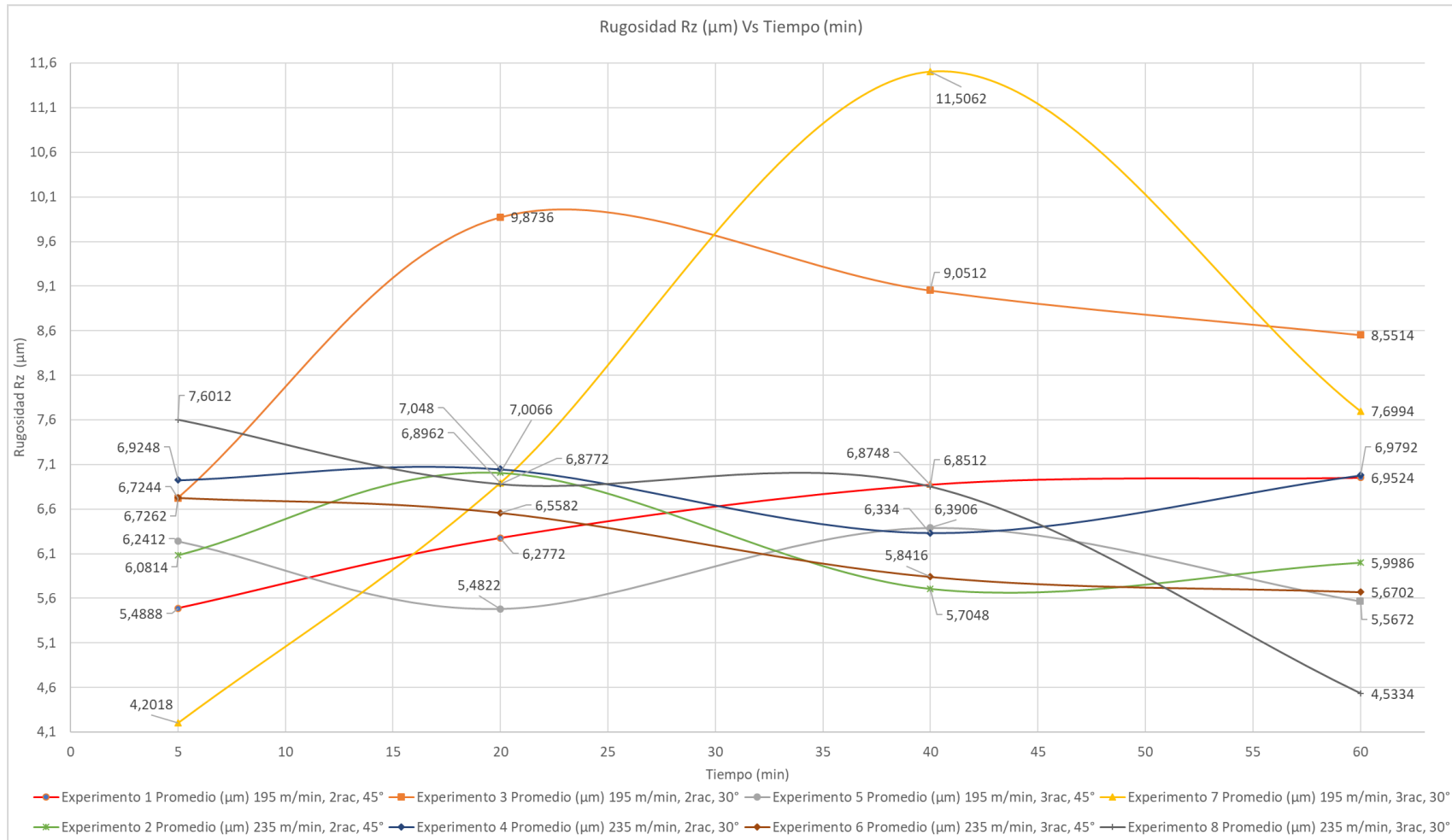


Figura 60. Comportamiento de la calidad superficial Rz en función del tiempo de mecanizado para los promedios de cada experimento

Fuente: Autor.

4.6. Evaluación del desgaste de flanco.

Para estimar la vida útil de la herramienta de corte se utilizó la norma ISO 3685 que establece las directrices para evaluar el desgaste de flanco en herramientas utilizadas en maquinado de alta velocidad de carburo sinterizado en procesos de torneado en materiales como acero y hierro fundido.

Las mediciones de desgaste de flanco se realizarán mediante microscopía electrónica de barrido SEM cada 5, 20, 40 y 60 minutos de mecanizado a una profundidad de corte de 0,4 mm, estas mediciones tienen la finalidad de observar cómo evoluciona el desgaste del filo de la herramienta en el tiempo.

El número de aumentos se selecciona en función de la geometría del inserto, en este caso para observar las tres zonas del flanco que establece la norma ISO 3685 se utilizaron 150 aumentos, el lugar más crítico del flanco donde se realizaron las mediciones de desgaste es la zona B que se puede apreciar claramente en el gráfico mostrado en la figura 61.

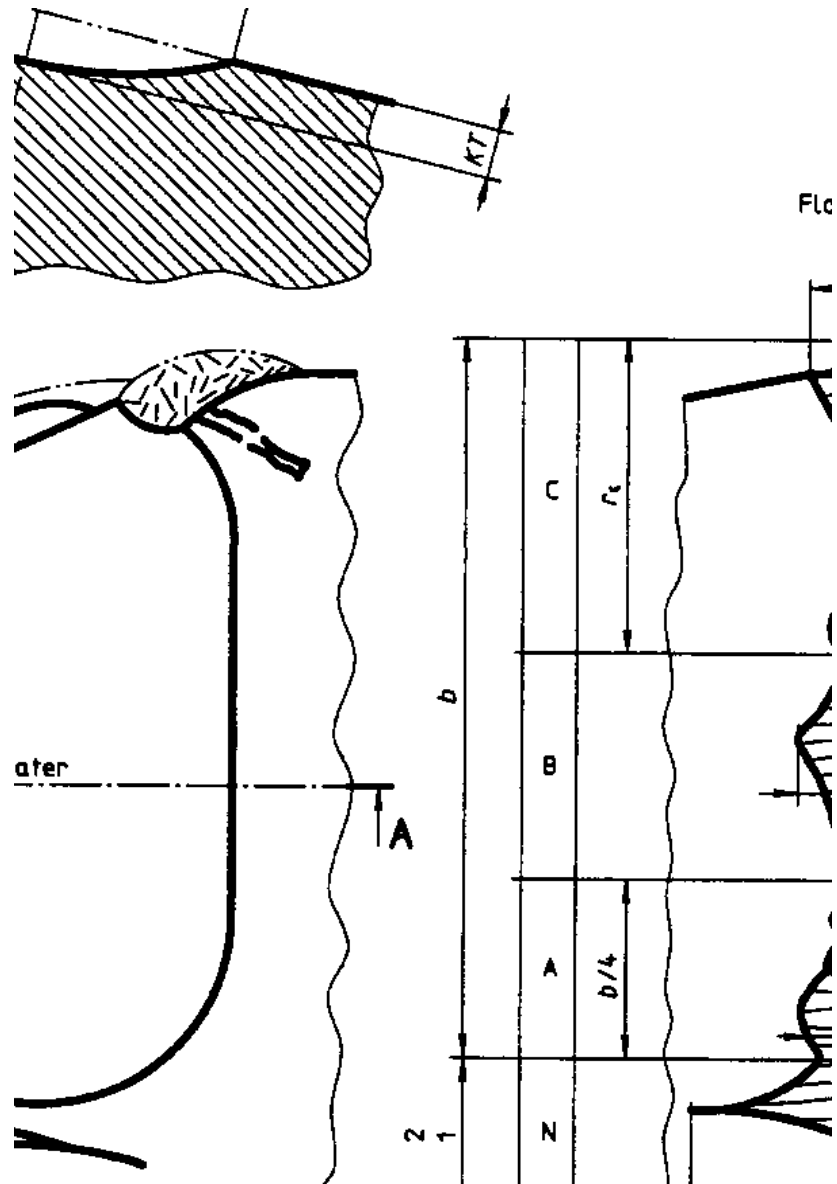


Figura 61. Zonas del flanco del inserto establecidas por la ISO 3685.

Para herramientas de carburo sinterizado la norma ISO 3685 establece que para un desgaste no es uniforme el ancho máximo de la superficie de desgaste de flanco $VB_{max} = 0.6 \text{ mm}$ por otro lado si se presenta un desgaste regular el valor máximo de la superficie desgastada corresponde a 0,3 mm. Las mediciones en los insertos seleccionados serán evaluadas hasta alcanzar estos valores establecidos en la norma ISO 3685 según el tipo de desgaste que corresponda.

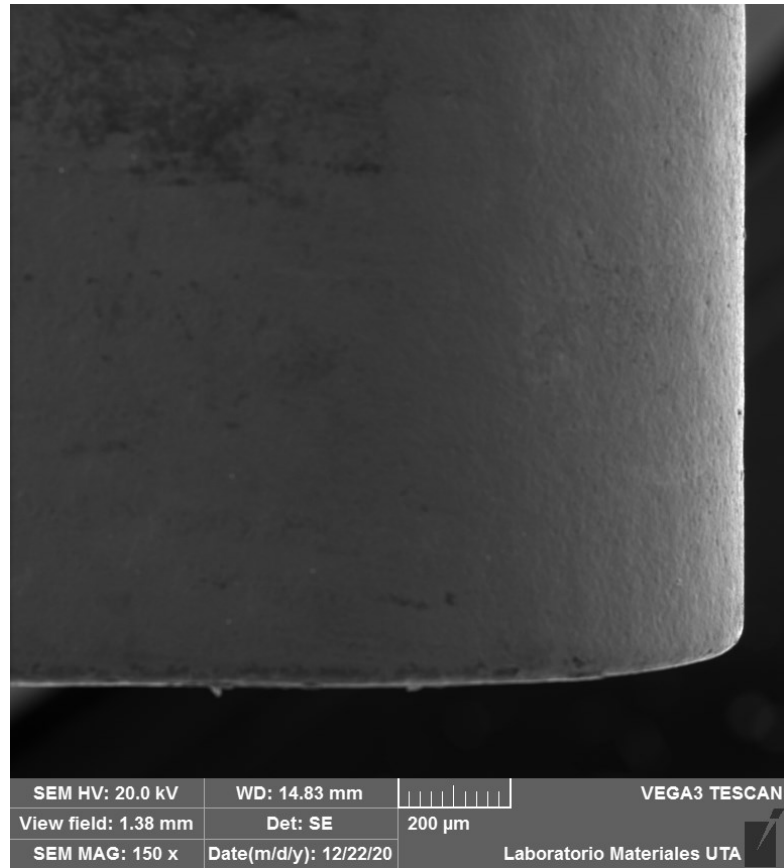
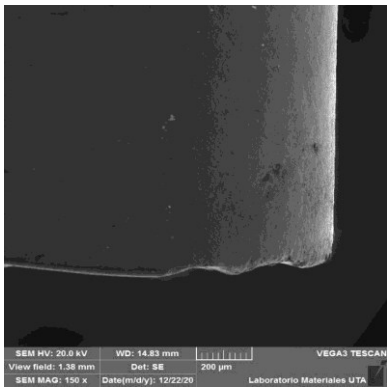
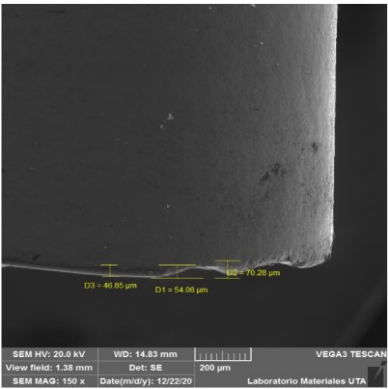


Figura 62. Micrografía SEM del inserto CNMG 120408 MF 2025 sin desgaste. Fuente: Autor.



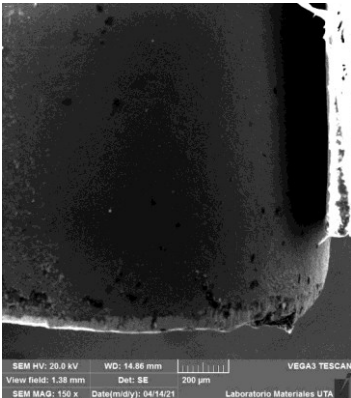
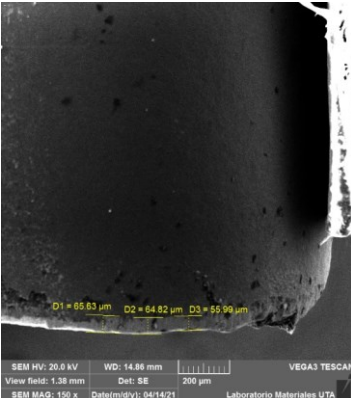
Antes de empezar con las mediciones de desgaste mediante microscopía electrónica de barrido se tomó como referencia una imagen del inserto sin desgaste, como se muestra en la figura 45 donde se puede observar cómo es el filo en condiciones de fábrica sin ser sometido a ningún proceso de mecanizado, la imagen fue tomada a 150 aumentos con una emisión a 20 kV.

4.6.1. Experimento 1, 195 m/min 2 racores 45°



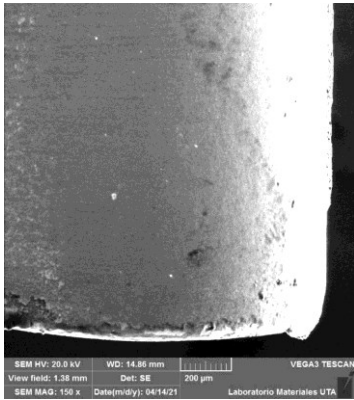
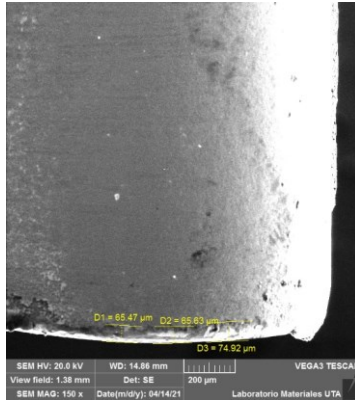
Reporte de desgaste del flanco, Tiempo 5 min

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO		FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA		CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA	
REPORTE DE DESGASTE DEL FLANCO DE LA HERRAMIENTA					
Datos Informativos					
Tipo de estudio	Experimental	Ítem		B	
Fecha de ejecución					
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato Laboratorio FICM				
Elaborado por	Ing. Diego Chadán	Revisado por		Ing. Diego Núñez	
Parámetros de torneado y lubricación					
n (rpm) - Vc (m/min)	Vf (mm/min) - fn (mm/rev)	Ap (mm)	Radio de punta del inserto (mm)	Ángulo de incidencia CO2	Tiempo de mecanizado (min)
1222 - 195	122 - 0.2	0,4	0,8	45°	5
Material:	Acero Inoxidable AISI 304		Racores	2	
Sistema de lubricación	Criogénico		Sistema de lubricación:	MQL+0,5%NanoTiO2+CO2 Criogénico	
Fluido lubricante:	MQL+0,5%NanoTiO2+CO2		Fluido lubricante:	Unist ® Coolube 2210.	
Herramienta de corte:	CNMG120408 MF 2025				
Tipo de operación:	Acabado				
Caudal lubricante (ml/h)	Presión aire comprimido (bar)	Presión CO2	Diámetro de la salida de CO2		
480	2	60	1.5		
REGISTRO DE MEDICIÓN GENERAL					
					
<i>Desgaste máximo en el ancho del flanco</i>		<i>Medición</i>		<i>Valor (µm)</i>	
VBb máx (µm)	70,26	1		46,85	
<i>Desgaste promedio en el ancho del flanco</i>		2		54,06	
VB (µm)	57,057	3		70,26	
Conclusión: El desgaste de flanco en el filo de la herramienta no supera el criterio establecido por la norma ISO 3685 para plaquitas de metal duro que corresponde a 300 um en la zona media del flanco, y 600 um como desgaste máximo.					
Observación: Se evidencia desprendimiento del material del inserto entre la zona A y la zona B					



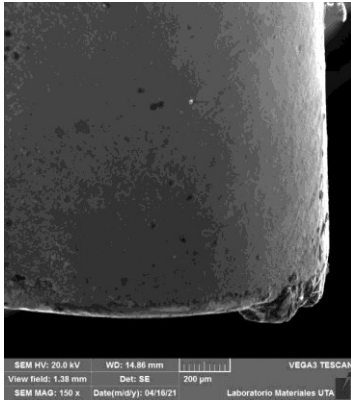
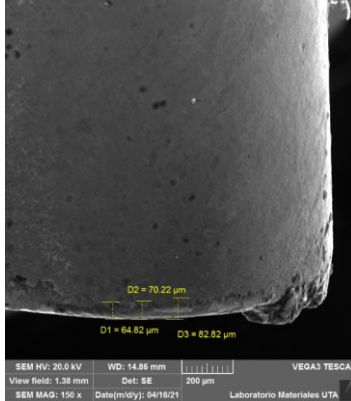
Reporte de desgaste del flanco, Tiempo 20 min

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA			
REPORTE DE DESGASTE DEL FLANCO DE LA HERRAMIENTA					
Datos Informativos					
Tipo de estudio	Experimental	Ítem		B	
Fecha de ejecución					
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato Laboratorio FICM				
Elaborado por	Ing. Diego Chadán	Revisado por		Ing. Diego Núñez	
Parámetros de torneado y lubricación					
n (rpm) - Vc (m/min)	Vf (mm/min) - fn (mm/rev)	Ap (mm)	Radio de punta del inserto (mm)	Ángulo de incidencia CO2	Tiempo de mecanizado (min)
1222 - 195	122 - 0.2	0,4	0,8	45°	20
Material:	Acero Inoxidable AISI 304		Racores	2	
Sistema de lubricación	Criogénico		Sistema de lubricación:	MQL+0,5%NanoTiO2+CO2 Criogénico	
Fluido lubricante:	MQL+0,5%NanoTiO2+CO2		Fluido lubricante:	Unist ® Coolube 2210.	
Herramienta de corte:	CNMG120408 MF 2025				
Tipo de operación: Acabado					
Caudal lubricante (ml/h)	Presión aire comprimido (bar)	Presión CO2	Diámetro de la salida de CO2		
480	2	60	1.5		
REGISTRO DE MEDICIÓN GENERAL					
					
<i>Desgaste máximo en el ancho del flanco</i>		Medición		Valor (μm)	
VBb máx (μm)	65,63	1		65,63	
<i>Desgaste promedio en el ancho del flanco</i>		2		64,82	
VB (μm)	62,147	3		55,99	
Conclusión: El desgaste de flanco en el filo de la herramienta no supera el criterio establecido por la norma ISO 3685 para plaquitas de metal duro que corresponde a 300 um en la zona media del flanco, y 600 um como desgaste máximo.					
Observación: Se evidencia un mayor desprendimiento de material además del recubrimiento en relación con la medida anterior.					

Reporte de desgaste del flanco, Tiempo 40 min



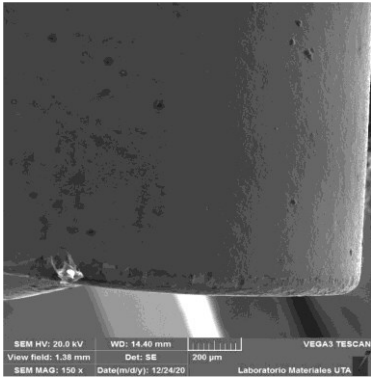
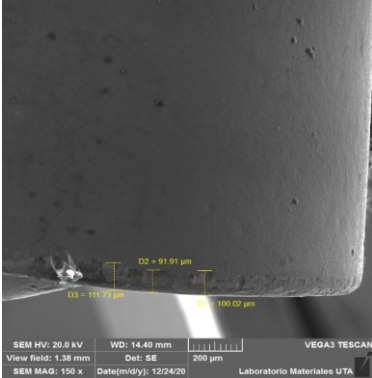
UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO		FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA		CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA	
					
REPORTE DE DESGASTE DEL FLANCO DE LA HERRAMIENTA					
Datos Informativos					
Tipo de estudio	Experimental	Ítem		B	
Fecha de ejecución					
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato Laboratorio FICM				
Elaborado por	Ing. Diego Chadán	Revisado por		Ing. Diego Núñez	
Parámetros de torneado y lubricación					
n (rpm) - Vc (m/min)	Vf (mm/min) - fn (mm/rev)	Ap (mm)	Radio de punta del inserto (mm)	Ángulo de incidencia CO2	Tiempo de mecanizado (min)
1222 - 195	122 - 0.2	0,4	0,8	45°	40
Material:	Acero Inoxidable AISI 304		Racores	2	
Sistema de lubricación	Criogénico		Sistema de lubricación:	MQL+0,5%NanoTiO2+CO2 Criogénico	
Fluido lubricante:	MQL+0,5%NanoTiO2+CO2		Fluido lubricante:	Unist ® Coolube 2210.	
Herramienta de corte:	CNMG120408 MF 2025				
Tipo de operación:	Acabado				
Caudal lubricante (ml/h)	Presión aire comprimido (bar)	Presión CO2	Diámetro de la salida de CO2		
480	2	60	1.5		
REGISTRO DE MEDICIÓN GENERAL					
					
<i>Desgaste máximo en el ancho del flanco</i>		<i>Medición</i>		<i>Valor (µm)</i>	
VBb máx (µm)	74,92	1		74,92	
<i>Desgaste promedio en el ancho del flanco</i>		2		65,63	
VB (µm)	68,673	3		65,47	
Conclusión:					
El desgaste de flanco en el filo de la herramienta no supera el criterio establecido por la norma ISO 3685 para plaquitas de metal duro que corresponde a 300 um en la zona media del flanco, y 600 um como desgaste máximo.					
Observación:					
Se evidencia un mayor desprendimiento de material además del recubrimiento en relación con la medida anterior.					

Reporte de desgaste del flanco, Tiempo 60 min



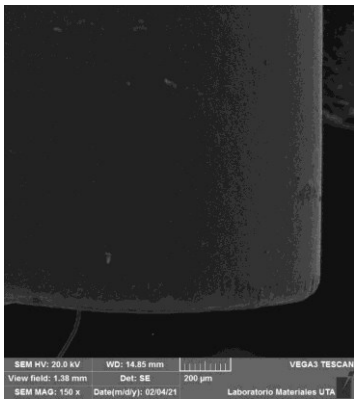
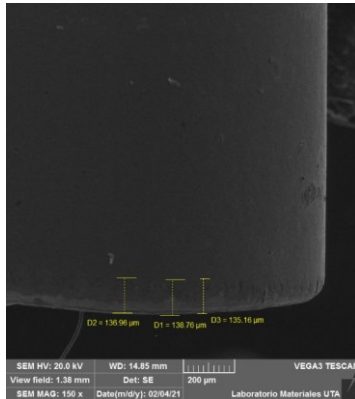
UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO		FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA		CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA	
					
REPORTE DE DESGASTE DEL FLANCO DE LA HERRAMIENTA					
Datos Informativos					
Tipo de estudio	Experimental	Ítem		B	
Fecha de ejecución					
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato Laboratorio FICM				
Elaborado por	Ing. Diego Chadán	Revisado por		Ing. Diego Núñez	
Parámetros de torneado y lubricación					
n (rpm) - Vc (m/min)	Vf (mm/min) - fn (mm/rev)	Ap (mm)	Radio de punta del inserto (mm)	Ángulo de incidencia CO2	Tiempo de mecanizado (min)
1222 - 195	122 - 0.2	0,4	0,8	45°	60
Material:	Acero Inoxidable AISI 304		Racores	2	
Sistema de lubricación	Criogénico		Sistema de lubricación:	MQL+0,5%NanoTiO2+CO2 Criogénico	
Fluido lubricante:	MQL+0,5%NanoTiO2+CO2		Fluido lubricante:	Unist ® Coolube 2210.	
Herramienta de corte:	CNMG120408 MF 2025				
Tipo de operación:	Acabado				
Caudal lubricante (ml/h)	Presión aire comprimido (bar)	Presión CO2	Diámetro de la salida de CO2		
480	2	60	1.5		
REGISTRO DE MEDICIÓN GENERAL					
					
<i>Desgaste máximo en el ancho del flanco</i>		<i>Medición</i>		<i>Valor (µm)</i>	
VBb máx (µm)	82,62	1		70,22	
<i>Desgaste promedio en el ancho del flanco</i>		2		64,82	
VB (µm)	72,553	3		82,62	
<p>Conclusión:</p> <p>El desgaste de flanco en el filo de la herramienta no supera el criterio establecido por la norma ISO 3685 para plaquitas de metal duro que corresponde a 300 um en la zona media del flanco, y 600 um como desgaste máximo.</p>					
<p>Observación:</p> <p>Se evidencia un mayor desprendimiento de material además del recubrimiento en relación con la medida anterior.</p>					

4.6.2. Experimento 2, 235 m/min 2 racores 45°



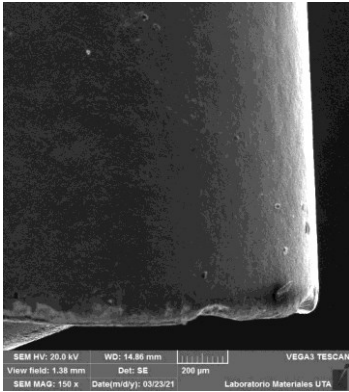
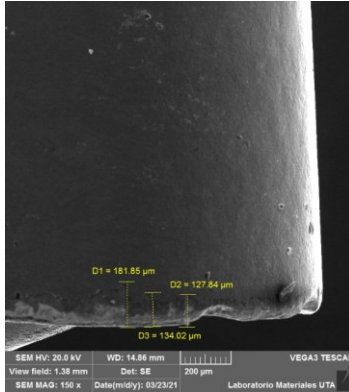
Reporte de desgaste del flanco, Tiempo 5 min

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO		FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA		CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA	
					
REPORTE DE DESGASTE DEL FLANCO DE LA HERRAMIENTA					
Datos Informativos					
Tipo de estudio	Experimental	Ítem		B	
Fecha de ejecución					
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato Laboratorio FICM				
Elaborado por	Ing. Diego Chadán	Revisado por		Ing. Diego Núñez	
Parámetros de torneado y lubricación					
n (rpm) - Vc (m/min)	Vf (mm/min) - fn (mm/rev)	Ap (mm)	Radio de punta del inserto (mm)	Ángulo de incidencia CO2	Tiempo de mecanizado (min)
840 - 235	122 - 0.2	0,4	0,8	45°	5
Material:	Acero Inoxidable AISI 304		Racores	2	
Sistema de lubricación	Criogénico		Sistema de lubricación:	MQL+0,5%NanoTiO2+CO2 Criogénico	
Fluido lubricante:	MQL+0,5%NanoTiO2+CO2		Fluido lubricante:	Unist ® Coolube 2210.	
Herramienta de corte:	CNMG120408 MF 2025				
Tipo de operación:	Acabado				
Caudal lubricante (ml/h)	Presión aire comprimido (bar)	Presión CO2	Diámetro de la salida de CO2		
480	2	60	1.5		
REGISTRO DE MEDICIÓN GENERAL					
					
<i>Desgaste máximo en el ancho del flanco</i>		Medición		Valor (µm)	
VBb máx (µm)	111,73	1		100,02	
<i>Desgaste promedio en el ancho del flanco</i>		2		91,91	
VB (µm)	101,220	3		111,73	
Conclusión:					
El desgaste de flanco en el filo de la herramienta no supera el criterio establecido por la norma ISO 3685 para plaquitas de metal duro que corresponde a 300 µm en la zona media del flanco, y 600 µm como desgaste máximo.					
Observación:					
Se evidencia desprendimiento del material del inserto entre la zona B y la zona C					



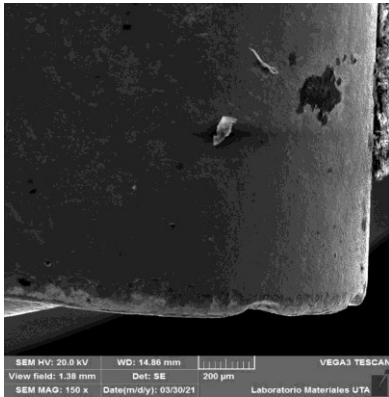
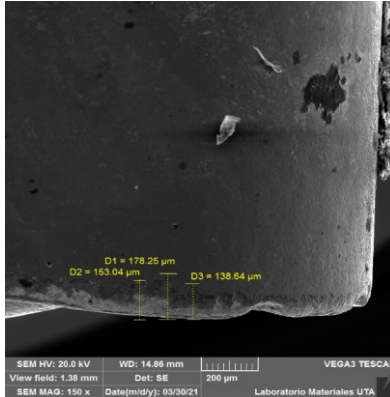
Reporte de desgaste del flanco, Tiempo 20 min

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO		FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA		CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA	
					
REPORTE DE DESGASTE DEL FLANCO DE LA HERRAMIENTA					
Datos Informativos					
Tipo de estudio	Experimental	Ítem		B	
Fecha de ejecución					
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato Laboratorio FICM				
Elaborado por	Ing. Diego Chadán	Revisado por		Ing. Diego Núñez	
Parámetros de torneado y lubricación					
n (rpm) - Vc (m/min)	Vf (mm/min) - fn (mm/rev)	Ap (mm)	Radio de punta del inserto (mm)	Ángulo de incidencia CO2	Tiempo de mecanizado (min)
840 - 235	122 - 0.2	0,4	0,8	45°	20
Material:	Acero Inoxidable AISI 304		Racores	2	
Sistema de lubricación	Criogénico		Sistema de lubricación:	MQL+0,5%NanoTiO2+CO2 Criogénico	
Fluido lubricante:	MQL+0,5%NanoTiO2+CO2		Fluido lubricante:	Unist ® Coolube 2210.	
Herramienta de corte:	CNMG120408 MF 2025				
Tipo de operación: Acabado					
Caudal lubricante (ml/h)	Presión aire comprimido (bar)	Presión CO2	Diámetro de la salida de CO2		
480	2	60	1.5		
REGISTRO DE MEDICIÓN GENERAL					
					
<i>Desgaste máximo en el ancho del flanco</i>		<i>Medición</i>		<i>Valor (µm)</i>	
VBb máx (µm)	138,76	1		135,16	
<i>Desgaste promedio en el ancho del flanco</i>		2		138,76	
VB (µm)	136,960	3		136,96	
Conclusión:					
El desgaste de flanco en el filo de la herramienta no supera el criterio establecido por la norma ISO 3685 para plaquitas de metal duro que corresponde a 300 um en la zona media del flanco, y 600 um como desgaste máximo.					
Observación:					
Se evidencia un mayor desprendimiento de material en relación a la medición anterior					

Reporte de desgaste del flanco, Tiempo 40 min



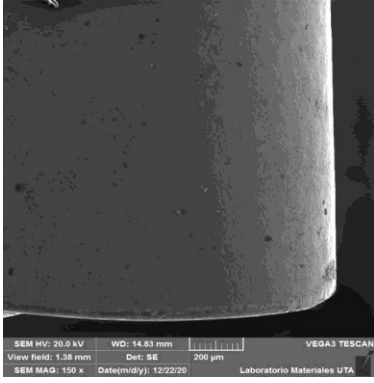
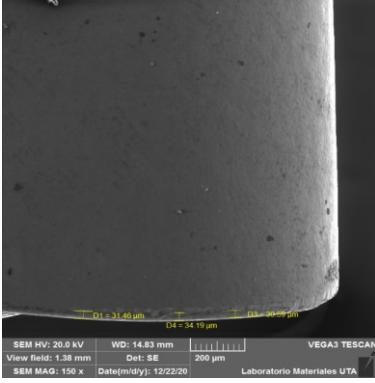
UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO		FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA		CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA	
					
REPORTE DE DESGASTE DEL FLANCO DE LA HERRAMIENTA					
Datos Informativos					
Tipo de estudio	Experimental	Ítem		B	
Fecha de ejecución					
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato Laboratorio FICM				
Elaborado por	Ing. Diego Chadán	Revisado por		Ing. Diego Núñez	
Parámetros de torneado y lubricación					
n (rpm) - Vc (m/min)	Vf (mm/min) - fn (mm/rev)	Ap (mm)	Radio de punta del inserto (mm)	Ángulo de incidencia CO2	Tiempo de mecanizado (min)
840 - 235	122 - 0.2	0,4	0,8	45°	40
Material:	Acero Inoxidable AISI 304		Racores	2	
Sistema de lubricación	Criogénico		Sistema de lubricación:	MQL+0,5%NanoTiO2+CO2 Criogénico	
Fluido lubricante:	MQL+0,5%NanoTiO2+CO2		Fluido lubricante:	Unist ® Coolube 2210.	
Herramienta de corte:	CNMG120408 MF 2025				
Acabado					
Caudal lubricante (ml/h)	Presión aire comprimido (bar)	Presión CO2	Diámetro de la salida de CO2		
480	2	60	1.5		
REGISTRO DE MEDICIÓN GENERAL					
					
<i>Desgaste máximo en el ancho del flanco</i>		Medición		Valor (µm)	
VBb máx (µm)	181,85	1		181,85	
<i>Desgaste promedio en el ancho del flanco</i>		2		127,84	
VB (µm)	147,903	3		134,02	
Conclusión:					
El desgaste de flanco en el filo de la herramienta no supera el criterio establecido por la norma ISO 3685 para plaquitas de metal duro que corresponde a 300 um en la zona media del flanco, y 600 um como desgaste máximo.					
Observación:					
Se evidencia un mayor desprendimiento de material en relación a la medición anterior					

Reporte de desgaste del flanco, Tiempo 60 min



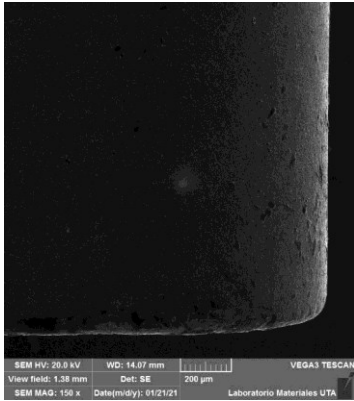
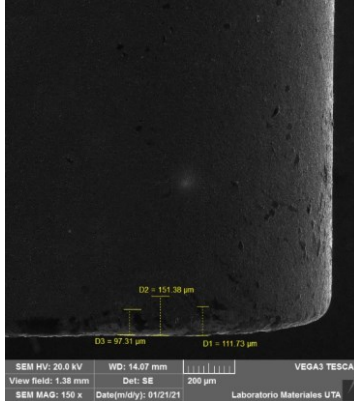
UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO		FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA		CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA	
					
REPORTE DE DESGASTE DEL FLANCO DE LA HERRAMIENTA					
Datos Informativos					
Tipo de estudio	Experimental	Ítem		B	
Fecha de ejecución					
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato Laboratorio FICM				
Elaborado por	Ing. Diego Chadán	Revisado por		Ing. Diego Núñez	
Parámetros de torneado y lubricación					
n (rpm) - Vc (m/min)	Vf (mm/min) - fn (mm/rev)	Ap (mm)	Radio de punta del inserto (mm)	Ángulo de incidencia CO2	Tiempo de mecanizado (min)
840 - 235	122 - 0.2	0,4	0,8	45°	60
Material:	Acero Inoxidable AISI 304		Racores	2	
Sistema de lubricación	Criogénico		Sistema de lubricación:	MQL+0,5%NanoTiO2+CO2 Criogénico	
Fluido lubricante:	MQL+0,5%NanoTiO2+CO2		Fluido lubricante:	Unist ® Coolube 2210.	
Herramienta de corte:	CNMG120408 MF 2025				
Tipo de operación:	Acabado				
Caudal lubricante (m/h)	Presión aire comprimido (bar)	Presión CO2	Diámetro de la salida de CO2		
480	2	60	1.5		
REGISTRO DE MEDICIÓN GENERAL					
					
<i>Desgaste máximo en el ancho del flanco</i>		<i>Medición</i>		<i>Valor (µm)</i>	
VBb máx (µm)	178,25	1		178,25	
<i>Desgaste promedio en el ancho del flanco</i>		2		153,04	
VB (µm)	156,643	3		138,64	
Conclusión:					
El desgaste de flanco en el filo de la herramienta no supera el criterio establecido por la norma ISO 3685 para plaquitas de metal duro que corresponde a 300 um en la zona media del flanco, y 600 um como desgaste máximo.					
Observación:					
Se evidencia un mayor desprendimiento de material en relación a la medición anterior					

4.6.2. Experimento 3, 195 m/min 2 racores 30°



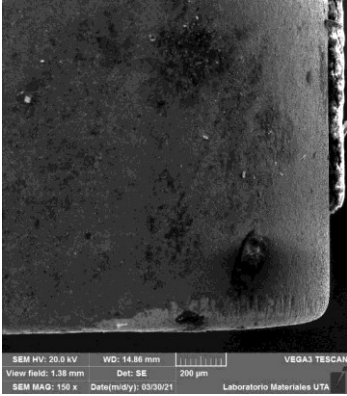
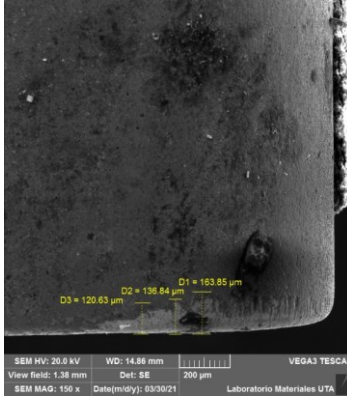
Reporte de desgaste del flanco, Tiempo 5 min

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO		FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA		CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA	
					
REPORTE DE DESGASTE DEL FLANCO DE LA HERRAMIENTA					
Datos Informativos					
Tipo de estudio	Experimental	Ítem	B		
Fecha de ejecución					
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato Laboratorio FICM				
Elaborado por	Ing. Diego Chadán	Revisado por	Ing. Diego Núñez		
Parámetros de torneado y lubricación					
n (rpm) - Vc (m/min)	Vf (mm/min) - fn (mm/rev)	Ap (mm)	Radio de punta del inserto (mm)	Ángulo de incidencia CO2	Tiempo de mecanizado (min)
700 - 195	122 - 0.2	0,4	0,8	30°	5
Material:	Acero Inoxidable AISI 304		Racores	2	
Sistema de lubricación	Criogénico		Sistema de lubricación:	MQL+0,5%NanoTiO2+CO2 Criogénico	
Fluido lubricante:	MQL+0,5%NanoTiO2+CO2		Fluido lubricante:	Unist ® Coolube 2210.	
Herramienta de corte:	CNMG120408 MF 2025				
Tipo de operación:	Acabado				
Caudal lubricante (ml/h)	Presión aire comprimido (bar)	Presión CO2	Diámetro de la salida de CO2		
480	2	60	1.5		
REGISTRO DE MEDICIÓN GENERAL					
					
<i>Desgaste máximo en el ancho del flanco</i>		Medición	Valor (µm)		
VBb máx (µm)	34,19	1	31,46		
<i>Desgaste promedio en el ancho del flanco</i>		2	34,19		
VB (µm)	32,080	3	30,59		
Conclusión:					
El desgaste de flanco en el filo de la herramienta no supera el criterio establecido por la norma ISO 3685 para plaquitas de metal duro que corresponde a 300 um en la zona media del flanco, y 600 um como desgaste máximo.					
Observación:					
Se evidencia un mayor desprendimiento de material en relación a la medición anterior					



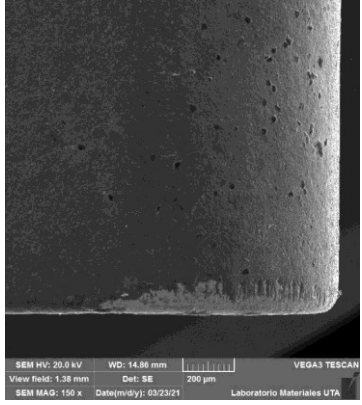
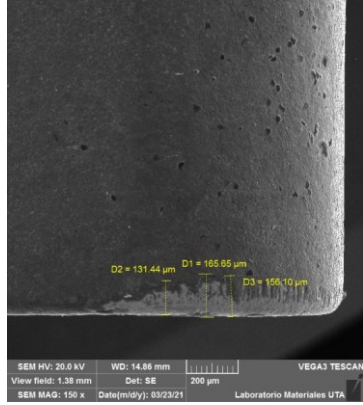
Reporte de desgaste del flanco, Tiempo 20 min

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA			
REPORTE DE DESGASTE DEL FLANCO DE LA HERRAMIENTA					
Datos Informativos					
Tipo de estudio	Experimental	Ítem		B	
Fecha de ejecución					
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato Laboratorio FICM				
Elaborado por	Ing. Diego Chadán	Revisado por		Ing. Diego Núñez	
Parámetros de torneado y lubricación					
n (rpm) - Vc (m/min)	Vf (mm/min) - fn (mm/rev)	Ap (mm)	Radio de punta del inserto (mm)	Ángulo de incidencia CO2	Tiempo de mecanizado (min)
700 - 195	122 - 0.2	0,4	0,8	30°	20
Material:	Acero Inoxidable AISI 304		Racores	2	
Sistema de lubricación	Criogénico		Sistema de lubricación:	MQL+0,5%NanoTiO2+CO2 Criogénico	
Fluido lubricante:	MQL+0,5%NanoTiO2+CO2		Fluido lubricante:	Unist ® Coolube 2210.	
Herramienta de corte:	CNMG120408 MF 2025				
Acabado					
Caudal lubricante (ml/h)	Presión aire comprimido (bar)	Presión CO2	Diámetro de la salida de CO2		
480	2	60	1.5		
REGISTRO DE MEDICIÓN GENERAL					
					
<i>Desgaste máximo en el ancho del flanco</i>		Medición		Valor (μm)	
VBb máx (μm)	151,38	1		97,31	
<i>Desgaste promedio en el ancho del flanco</i>		2		151,38	
VB (μm)	120,140	3		111,73	
Conclusión: El desgaste de flanco en el filo de la herramienta no supera el criterio establecido por la norma ISO 3685 para plaquitas de metal duro que corresponde a 300 um en la zona media del flanco, y 600 um como desgaste máximo.					
Observación: Se evidencia un mayor desprendimiento de material en relación a la medición anterior					

Reporte de desgaste del flanco, Tiempo 40 min



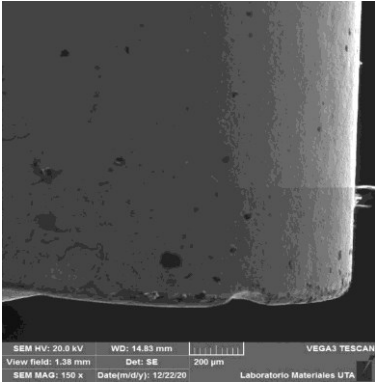
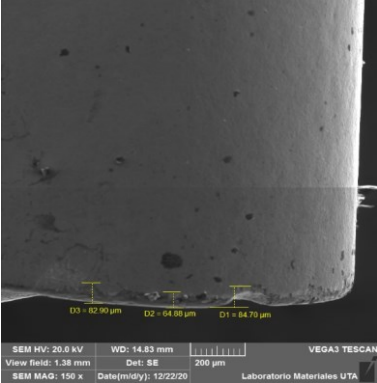
UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO		FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA		CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA	
					
REPORTE DE DESGASTE DEL FLANCO DE LA HERRAMIENTA					
Datos Informativos					
Tipo de estudio	Experimental	Ítem		B	
Fecha de ejecución					
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato Laboratorio FICM				
Elaborado por	Ing. Diego Chadán	Revisado por		Ing. Diego Núñez	
Parámetros de torneado y lubricación					
n (rpm) - Vc (m/min)	Vf (mm/min) - fn (mm/rev)	Ap (mm)	Radio de punta del inserto (mm)	Ángulo de incidencia CO2	Tiempo de mecanizado (min)
700 - 195	122 - 0.2	0,4	0,8	30°	40
Material:	Acero Inoxidable AISI 304		Racores	2	
Sistema de lubricación	Criogénico		Sistema de lubricación:	MQL+0,5%NanoTiO2+CO2 Criogénico	
Fluido lubricante:	MQL+0,5%NanoTiO2+CO2		Fluido lubricante:	Unist ® Coolube 2210.	
Herramienta de corte:	CNMG120408 MF 2025				
Tipo de operación:	Acabado				
Caudal lubricante (ml/h)	Presión aire comprimido (bar)	Presión CO2	Diámetro de la salida de CO2		
480	2	60	1.5		
REGISTRO DE MEDICIÓN GENERAL					
					
<i>Desgaste máximo en el ancho del flanco</i>		<i>Medición</i>		<i>Valor (µm)</i>	
VBb máx (µm)	163,85	1		163,85	
<i>Desgaste promedio en el ancho del flanco</i>		2		136,84	
VB (µm)	140,440	3		120,63	
Conclusión:					
El desgaste de flanco en el filo de la herramienta no supera el criterio establecido por la norma ISO 3685 para plaquitas de metal duro que corresponde a 300 um en la zona media del flanco, y 600 um como desgaste máximo.					
Observación:					
Se evidencia un mayor desprendimiento de material en relación a la medición anterior					

Reporte de desgaste del flanco, Tiempo 60 min



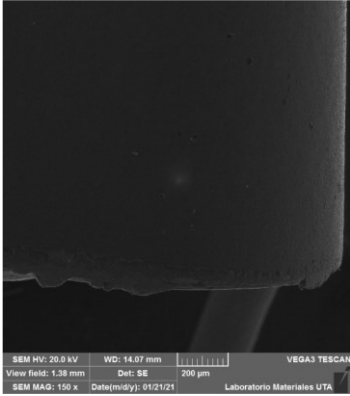
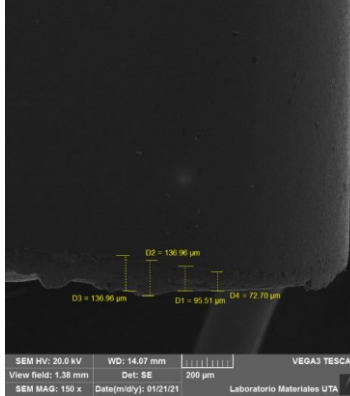
		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA			
REPORTE DE DESGASTE DEL FLANCO DE LA HERRAMIENTA					
Datos Informativos					
Tipo de estudio	Experimental	Ítem		B	
Fecha de ejecución					
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato Laboratorio FICM				
Elaborado por	Ing. Diego Chadán	Revisado por		Ing. Diego Núñez	
Parámetros de torneado y lubricación					
n (rpm) - Vc (m/min)	Vf (mm/min) - fn (mm/rev)	Ap (mm)	Radio de punta del inserto (mm)	Ángulo de incidencia CO2	Tiempo de mecanizado (min)
700 - 195	122 - 0.2	0,4	0,8	30°	60
Material:	Acero Inoxidable AISI 304		Racores	2	
Sistema de lubricación	Criogénico		Sistema de lubricación:	MQL+0,5%NanoTiO2+CO2 Criogénico	
Fluido lubricante:	MQL+0,5%NanoTiO2+CO2		Fluido lubricante:	Unist ® Coolube 2210.	
Herramienta de corte:	CNMG120408 MF 2025				
Tipo de operación:	Acabado				
Caudal lubricante (ml/h)	Presión aire comprimido (bar)	Presión CO2	Diámetro de la salida de CO2		
480	2	60	1.5		
REGISTRO DE MEDICIÓN GENERAL					
					
<i>Desgaste máximo en el ancho del flanco</i>		Medición		Valor (μm)	
VBb máx (μm)	165,65	1		131,44	
<i>Desgaste promedio en el ancho del flanco</i>		2		165,65	
VB (μm)	151,063	3		156,1	
Conclusión: El desgaste de flanco en el filo de la herramienta no supera el criterio establecido por la norma ISO 3685 para plaquitas de metal duro que corresponde a 300 um en la zona media del flanco, y 600 um como desgaste máximo.					
Observación: Se evidencia un mayor desprendimiento de material en relación a la medición anterior					

4.6.2. Experimento 4, 235 m/min 2 racores 30°



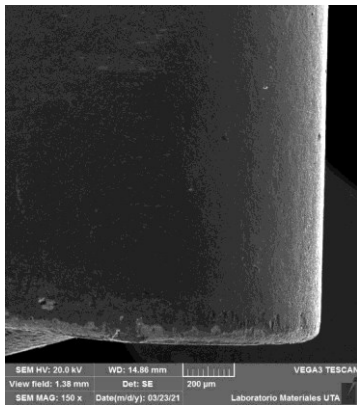
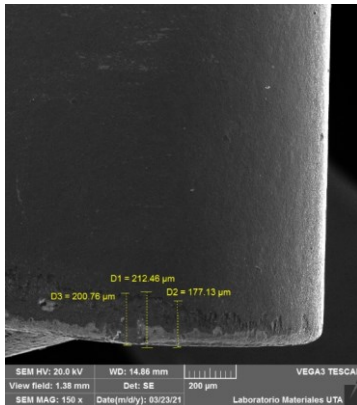
Reporte de desgaste del flanco, Tiempo 5 min

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO		FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA		CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA	
 					
REPORTE DE DESGASTE DEL FLANCO DE LA HERRAMIENTA					
Datos Informativos					
Tipo de estudio	Experimental	Ítem		B	
Fecha de ejecución					
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato Laboratorio FICM				
Elaborado por	Ing. Diego Chadán	Revisado por		Ing. Diego Núñez	
Parámetros de torneado y lubricación					
n (rpm) - Vc (m/min)	Vf (mm/min) - fn (mm/rev)	Ap (mm)	Radio de punta del inserto (mm)	Ángulo de incidencia CO2	Tiempo de mecanizado (min)
840 - 235	122 - 0.2	0,4	0,8	30°	5
Material:	Acero Inoxidable AISI 304		Racores	2	
Sistema de lubricación	Criogénico		Sistema de lubricación:	MQL+0,5%NanoTiO2+CO2 Criogénico	
Fluido lubricante:	MQL+0,5%NanoTiO2+CO2		Fluido lubricante:	Unist ® Coolube 2210.	
Herramienta de corte:	CNMG120408 MF 2025				
Tipo de operación:	Acabado				
Caudal lubricante (ml/h)	Presión aire comprimido (bar)	Presión CO2	Diámetro de la salida de CO2		
480	2	60	1.5		
REGISTRO DE MEDICIÓN GENERAL					
					
<i>Desgaste máximo en el ancho del flanco</i>		<i>Medición</i>		<i>Valor (µm)</i>	
VBb máx (µm)	84,7	1		82,9	
<i>Desgaste promedio en el ancho del flanco</i>		2		64,88	
VB (µm)	77,493	3		84,7	
Conclusión: El desgaste de flanco en el filo de la herramienta no supera el criterio establecido por la norma ISO 3685 para plaquitas de metal duro que corresponde a 300 µm en la zona media del flanco, y 600 µm como desgaste máximo.					
Observación: Se evidencia un mayor desprendimiento de material en relación a la medición anterior					



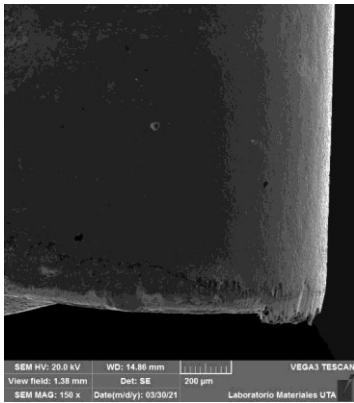
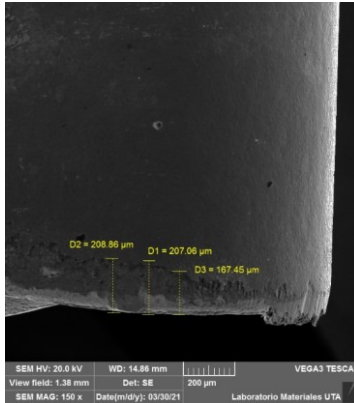
Reporte de desgaste del flanco, Tiempo 20 min

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO		FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA		CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA	
					
REPORTE DE DESGASTE DEL FLANCO DE LA HERRAMIENTA					
Datos Informativos					
Tipo de estudio	Experimental	Ítem		B	
Fecha de ejecución					
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato Laboratorio FICM				
Elaborado por	Ing. Diego Chadán	Revisado por		Ing. Diego Núñez	
Parámetros de torneado y lubricación					
n (rpm) - Vc (m/min)	Vf (mm/min) - fn (mm/rev)	Ap (mm)	Radio de punta del inserto (mm)	Ángulo de incidencia CO2	Tiempo de mecanizado (min)
840 - 235	122 - 0.2	0,4	0,8	30°	20
Material:	Acero Inoxidable AISI 304		Racores	2	
Sistema de lubricación	Criogénico		Sistema de lubricación:	MQL+0,5%NanoTiO2+CO2 Criogénico	
Fluido lubricante:	MQL+0,5%NanoTiO2+CO2		Fluido lubricante:	Unist ® Coolube 2210.	
Herramienta de corte:	CNMG120408 MF 2025				
Tipo de operación:	Acabado				
Caudal lubricante (ml/h)	Presión aire comprimido (bar)	Presión CO2	Diámetro de la salida de CO2		
480	2	60	1.5		
REGISTRO DE MEDICIÓN GENERAL					
					
<i>Desgaste máximo en el ancho del flanco</i>		<i>Medición</i>		<i>Valor (μm)</i>	
VBb máx (μm)	136,96	1		136,96	
<i>Desgaste promedio en el ancho del flanco</i>		2		72,72	
VB (μm)	101,730	3		95,51	
Conclusión:					
El desgaste de flanco en el filo de la herramienta no supera el criterio establecido por la norma ISO 3685 para plaquitas de metal duro que corresponde a 300 um en la zona media del flanco, y 600 um como desgaste máximo.					
Observación:					
Se evidencia un mayor desprendimiento de material en relación a la medición anterior					

Reporte de desgaste del flanco, Tiempo 40 min



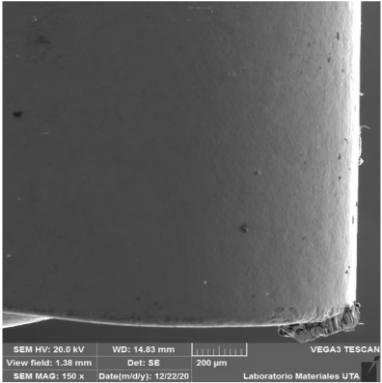
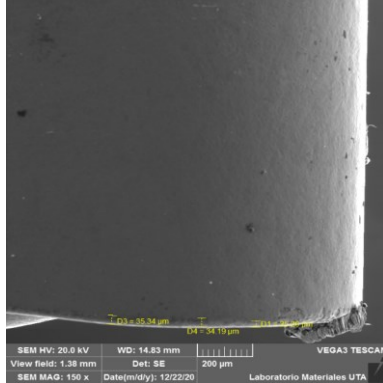
UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO		FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA		CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA	
 					
REPORTE DE DESGASTE DEL FLANCO DE LA HERRAMIENTA					
Datos Informativos					
Tipo de estudio	Experimental	Ítem		B	
Fecha de ejecución					
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato Laboratorio FICM				
Elaborado por	Ing. Diego Chadán	Revisado por		Ing. Diego Núñez	
Parámetros de torneado y lubricación					
n (rpm) - Vc (m/min)	Vf (mm/min) - fn (mm/rev)	Ap (mm)	Radio de punta del inserto (mm)	Ángulo de incidencia CO2	Tiempo de mecanizado (min)
840 - 235	122 - 0.2	0,4	0,8	30°	40
Material:	Acero Inoxidable AISI 304		Racores	2	
Sistema de lubricación	Criogénico		Sistema de lubricación:	MQL+0,5%NanoTiO2+CO2 Criogénico	
Fluido lubricante:	MQL+0,5%NanoTiO2+CO2		Fluido lubricante:	Unist ® Coolube 2210.	
Herramienta de corte:	CNMG120408 MF 2025				
Tipo de operación:	Acabado				
Caudal lubricante (ml/h)	Presión aire comprimido (bar)	Presión CO2	Diámetro de la salida de CO2		
480	2	60	1.5		
REGISTRO DE MEDICIÓN GENERAL					
					
<i>Desgaste máximo en el ancho del flanco</i>		Medición		Valor (μm)	
VBb máx (μm)	212,46	1		177,13	
<i>Desgaste promedio en el ancho del flanco</i>		2		212,46	
VB (μm)	196,783	3		200,76	
Conclusión: El desgaste de flanco en el filo de la herramienta no supera el criterio establecido por la norma ISO 3685 para plaquitas de metal duro que corresponde a 300 um en la zona media del flanco, y 600 um como desgaste máximo.					
Observación: Se evidencia un mayor desprendimiento de material en relación a la medición anterior					

Reporte de desgaste del flanco, Tiempo 60 min



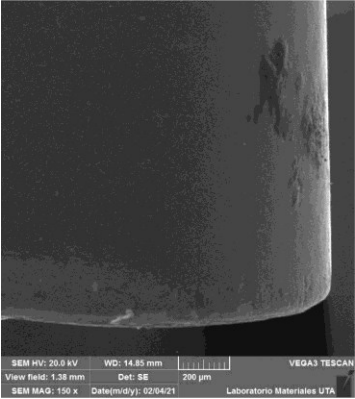
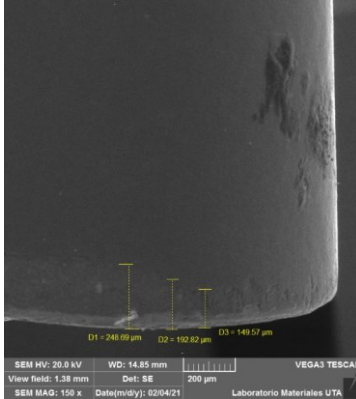
UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO		FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA		CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA	
 					
REPORTE DE DESGASTE DEL FLANCO DE LA HERRAMIENTA					
Datos Informativos					
Tipo de estudio	Experimental	Ítem		B	
Fecha de ejecución					
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato Laboratorio FICM				
Elaborado por	Ing. Diego Chadán	Revisado por		Ing. Diego Núñez	
Parámetros de torneado y lubricación					
n (rpm) - Vc (m/min)	Vf (mm/min) - fn (mm/rev)	Ap (mm)	Radio de punta del inserto (mm)	Ángulo de incidencia CO2	Tiempo de mecanizado (min)
840 - 235	122 - 0.2	0,4	0,8	30°	60
Material:	Acero Inoxidable AISI 304		Racores	2	
Sistema de lubricación	Criogénico		Sistema de lubricación:	MQL+0,5%NanoTiO2+CO2 Criogénico	
Fluido lubricante:	MQL+0,5%NanoTiO2+CO2		Fluido lubricante:	Unist ® Coolube 2210.	
Herramienta de corte:	CNMG120408 MF 2025				
Tipo de operación: Acabado					
Caudal lubricante (ml/h)	Presión aire comprimido (bar)	Presión CO2	Diámetro de la salida de CO2		
480	2	60	1.5		
REGISTRO DE MEDICIÓN GENERAL					
					
<i>Desgaste máximo en el ancho del flanco</i>		Medición		Valor (μm)	
VBb máx (μm)	208,86	1		208,86	
<i>Desgaste promedio en el ancho del flanco</i>		2		207,06	
VB (μm)	194,457	3		167,45	
Conclusión: El desgaste de flanco en el filo de la herramienta no supera el criterio establecido por la norma ISO 3685 para plaquitas de metal duro que corresponde a 300 um en la zona media del flanco, y 600 um como desgaste máximo.					
Observación: Se evidencia un mayor desprendimiento de material en relación a la medición anterior					

4.6.2. Experimento 5, 195 m/min 3 racores 45°



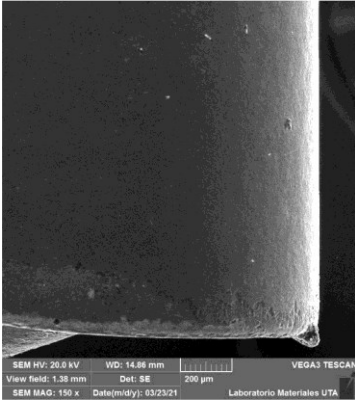
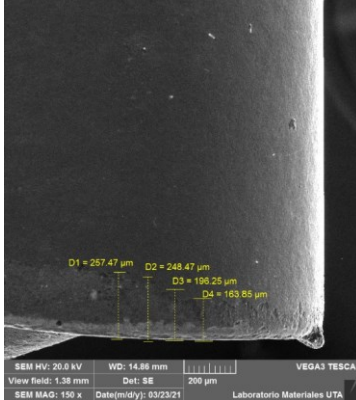
Reporte de desgaste del flanco, Tiempo 5 min

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA			
REPORTE DE DESGASTE DEL FLANCO DE LA HERRAMIENTA					
Datos Informativos					
Tipo de estudio	Experimental	Ítem		B	
Fecha de ejecución					
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato Laboratorio FICM				
Elaborado por	Ing. Diego Chadán	Revisado por		Ing. Diego Núñez	
Parámetros de torneado y lubricación					
n (rpm) - Vc (m/min)	Vf (mm/min) - fn (mm/rev)	Ap (mm)	Radio de punta del inserto (mm)	Ángulo de incidencia CO2	Tiempo de mecanizado (min)
700 - 195	122 - 0.2	0,4	0,8	45°	5
Material:	Acero Inoxidable AISI 304		Racores	3	
Sistema de lubricación	Criogénico		Sistema de lubricación:	MQL+0,5%NanoTiO2+CO2 Criogénico	
Fluido lubricante:	MQL+0,5%NanoTiO2+CO2		Fluido lubricante:	Unist ® Coolube 2210.	
Herramienta de corte:	CNMG120408 MF 2025				
Tipo de operación:	Acabado				
Caudal lubricante (ml/h)	Presión aire comprimido (bar)	Presión CO2	Diámetro de la salida de CO2		
480	2	60	1.5		
REGISTRO DE MEDICIÓN GENERAL					
					
<i>Desgaste máximo en el ancho del flanco</i>		<i>Medición</i>		<i>Valor (µm)</i>	
VBb máx (µm)	35,34	1		35,34	
<i>Desgaste promedio en el ancho del flanco</i>					
VB (µm)	31,640	3		25,39	
Conclusión: El desgaste de flanco en el filo de la herramienta no supera el criterio establecido por la norma ISO 3685 para plaquitas de metal duro que corresponde a 300 µm en la zona media del flanco, y 600 µm como desgaste máximo.					
Observación: Se evidencia desprendimiento del material del inserto entre la zona A y la zona B					



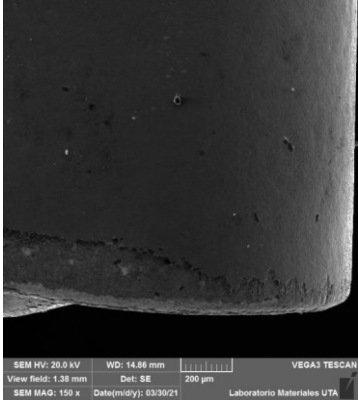
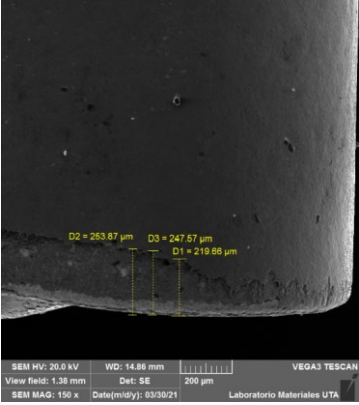
Reporte de desgaste del flanco, Tiempo 20 min

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO		FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA		CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA	
 					
REPORTE DE DESGASTE DEL FLANCO DE LA HERRAMIENTA					
Datos Informativos					
Tipo de estudio	Experimental	Ítem	B		
Fecha de ejecución					
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato Laboratorio FICM				
Elaborado por	Ing. Diego Chadán	Revisado por	Ing. Diego Núñez		
Parámetros de torneado y lubricación					
n (rpm) - Vc (m/min)	Vf (mm/min) - fn (mm/rev)	Ap (mm)	Radio de punta del inserto (mm)	Ángulo de incidencia CO2	Tiempo de mecanizado (min)
700 - 195	122 - 0.2	0,4	0,8	45°	20
Material:	Acero Inoxidable AISI 304		Racores	3	
Sistema de lubricación	Criogénico		Sistema de lubricación:	MQL+0,5%NanoTiO2+CO2 Criogénico	
Fluido lubricante:	MQL+0,5%NanoTiO2+CO2		Fluido lubricante:	Unist ® Coolube 2210.	
Herramienta de corte:	CNMG120408 MF 2025				
Tipo de operación:	Acabado				
Caudal lubricante (ml/h)	Presión aire comprimido (bar)	Presión CO2	Diámetro de la salida de CO2		
480	2	60	1.5		
REGISTRO DE MEDICIÓN GENERAL					
					
<i>Desgaste máximo en el ancho del flanco</i>		Medición		Valor (µm)	
VBb máx (µm)	248,69	1		248,69	
<i>Desgaste promedio en el ancho del flanco</i>		2		192,82	
VB (µm)	197,027	3		149,57	
Conclusión: El desgaste de flanco en el filo de la herramienta no supera el criterio establecido por la norma ISO 3685 para plaquitas de metal duro que corresponde a 300 um en la zona media del flanco, y 600 um como desgaste máximo.					
Observación: Se evidencia desprendimiento del material del inserto entre la zona A y la zona B					

Reporte de desgaste del flanco, Tiempo 40 min



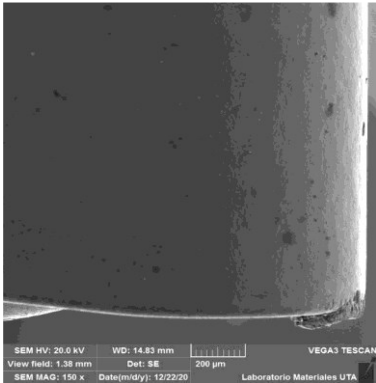
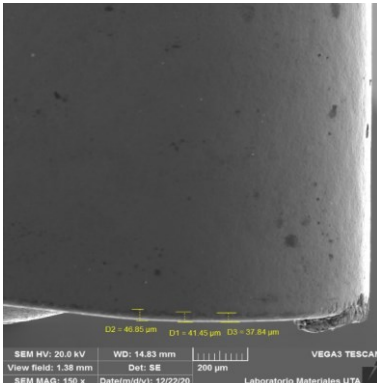
		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA			
REPORTE DE DESGASTE DEL FLANCO DE LA HERRAMIENTA					
Datos Informativos					
Tipo de estudio	Experimental	Ítem		B	
Fecha de ejecución					
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato Laboratorio FICM				
Elaborado por	Ing. Diego Chadán	Revisado por		Ing. Diego Núñez	
Parámetros de torneado y lubricación					
n (rpm) - Vc (m/min)	Vf (mm/min) - fn (mm/rev)	Ap (mm)	Radio de punta del inserto (mm)	Ángulo de incidencia CO2	Tiempo de mecanizado (min)
700 - 195	122 - 0.2	0,4	0,8	45°	40
Material:	Acero Inoxidable AISI 304		Racores	3	
Sistema de lubricación	Criogénico		Sistema de lubricación:	MQL+0,5%NanoTiO2+CO2 Criogénico	
Fluido lubricante:	MQL+0,5%NanoTiO2+CO2		Fluido lubricante:	Unist ® Coolube 2210.	
Herramienta de corte:	CNMG120408 MF 2025				
Tipo de operación:	Acabado				
Caudal lubricante (ml/h)	Presión aire comprimido (bar)	Presión CO2	Diámetro de la salida de CO2		
480	2	60	1.5		
REGISTRO DE MEDICIÓN GENERAL					
					
<i>Desgaste máximo en el ancho del flanco</i>		<i>Medición</i>		<i>Valor (μm)</i>	
VBb máx (μm)	257,47	1		257,47	
<i>Desgaste promedio en el ancho del flanco</i>		2		248,47	
VB (μm)	234,063	3		196,25	
Conclusión: El desgaste de flanco en el filo de la herramienta no supera el criterio establecido por la norma ISO 3685 para plaquitas de metal duro que corresponde a 300 um en la zona media del flanco, y 600 um como desgaste máximo.					
Observación: Se evidencia desprendimiento del material del inserto entre la zona A y la zona B					

Reporte de desgaste del flanco, Tiempo 60 min



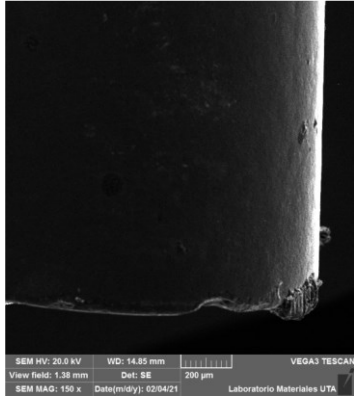
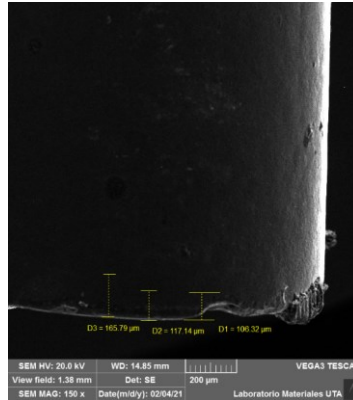
UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO		FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA		CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA	
 					
REPORTE DE DESGASTE DEL FLANCO DE LA HERRAMIENTA					
Datos Informativos					
Tipo de estudio	Experimental	Ítem	B		
Fecha de ejecución					
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato Laboratorio FICM				
Elaborado por	Ing. Diego Chadán	Revisado por	Ing. Diego Núñez		
Parámetros de torneado y lubricación					
n (rpm) - Vc (m/min)	Vf (mm/min) - fn (mm/rev)	Ap (mm)	Radio de punta del inserto (mm)	Ángulo de incidencia CO2	Tiempo de mecanizado (min)
700 - 195	122 - 0.2	0,4	0,8	45°	60
Material:	Acero Inoxidable AISI 304		Racores	3	
Sistema de lubricación	Criogénico		Sistema de lubricación:	MQL+0,5%NanoTiO2+CO2 Criogénico	
Fluido lubricante:	MQL+0,5%NanoTiO2+CO2		Fluido lubricante:	Unist ® Coolube 2210.	
Herramienta de corte:	CNMG120408 MF 2025				
Tipo de operación:	Acabado				
Caudal lubricante (ml/h)	Presión aire comprimido (bar)	Presión CO2	Diámetro de la salida de CO2		
480	2	60	1.5		
REGISTRO DE MEDICIÓN GENERAL					
					
<i>Desgaste máximo en el ancho del flanco</i>		Medición		Valor (µm)	
VBb máx (µm)	253,87	1		253,87	
<i>Desgaste promedio en el ancho del flanco</i>		2		247,57	
VB (µm)	240,367	3		219,66	
Conclusión: El desgaste de flanco en el filo de la herramienta no supera el criterio establecido por la norma ISO 3685 para plaquitas de metal duro que corresponde a 300 um en la zona media del flanco, y 600 um como desgaste máximo.					
Observación: Se evidencia desprendimiento del material del inserto entre la zona A y la zona B					

4.6.2. Experimento 6, 235 m/min 3 racores 45°



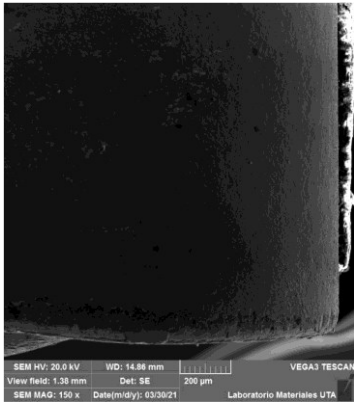
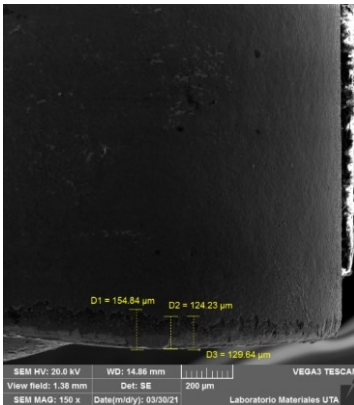
Reporte de desgaste del flanco, Tiempo 5 min

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO		FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA		CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA	
					
REPORTE DE DESGASTE DEL FLANCO DE LA HERRAMIENTA					
Datos Informativos					
Tipo de estudio	Experimental	Ítem		B	
Fecha de ejecución					
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato Laboratorio FICM				
Elaborado por	Ing. Diego Chadán	Revisado por		Ing. Diego Núñez	
Parámetros de torneado y lubricación					
n (rpm) - Vc (m/min)	Vf (mm/min) - fn (mm/rev)	Ap (mm)	Radio de punta del inserto (mm)	Ángulo de incidencia CO2	Tiempo de mecanizado (min)
840 - 235	122 - 0.2	0,4	0,8	45°	5
Material:	Acero Inoxidable AISI 304		Racores	2	
Sistema de lubricación	Criogénico		Sistema de lubricación:	MQL+0,5%NanoTiO2+CO2 Criogénico	
Fluido lubricante:	MQL+0,5%NanoTiO2+CO2		Fluido lubricante:	Unist® Coolube 2210.	
Herramienta de corte:	CNMG120408 MF 2025				
Tipo de operación:	Acabado				
Caudal lubricante (ml/h)	Presión aire comprimido (bar)	Presión CO2	Diámetro de la salida de CO2		
480	2	60	1.5		
REGISTRO DE MEDICIÓN GENERAL					
					
<i>Desgaste máximo en el ancho del flanco</i>		<i>Medición</i>		<i>Valor (µm)</i>	
VBb máx (µm)	48,85	1		48,85	
<i>Desgaste promedio en el ancho del flanco</i>					
VB (µm)	42,713	3		37,84	
Conclusión:					
El desgaste de flanco en el filo de la herramienta no supera el criterio establecido por la norma ISO 3685 para plaquitas de metal duro que corresponde a 300 µm en la zona media del flanco, y 600 µm como desgaste máximo.					
Observación:					
Se evidencia desprendimiento del material del inserto entre la zona B y la zona C					



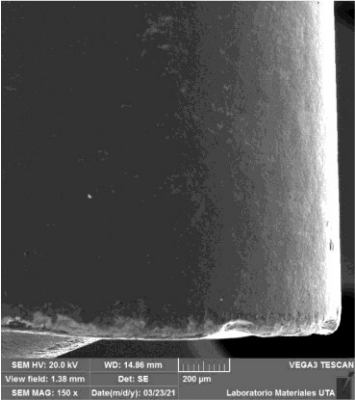
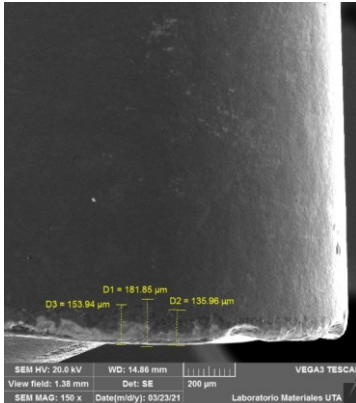
Reporte de desgaste del flanco, Tiempo 20 min

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO		FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA		CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA	
 					
REPORTE DE DESGASTE DEL FLANCO DE LA HERRAMIENTA					
Datos Informativos					
Tipo de estudio	Experimental	Ítem		B	
Fecha de ejecución					
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato Laboratorio FICM				
Elaborado por	Ing. Diego Chadán	Revisado por		Ing. Diego Núñez	
Parámetros de torneado y lubricación					
n (rpm) - Vc (m/min)	Vf (mm/min) - fn (mm/rev)	Ap (mm)	Radio de punta del inserto (mm)	Ángulo de incidencia CO2	Tiempo de mecanizado (min)
840 - 235	122 - 0.2	0,4	0,8	45°	20
Material:	Acero Inoxidable AISI 304		Racores	2	
Sistema de lubricación	Criogénico		Sistema de lubricación:	MQL+0,5%NanoTiO2+CO2 Criogénico	
Fluido lubricante:	MQL+0,5%NanoTiO2+CO2		Fluido lubricante:	Unist ® Coolube 2210.	
Herramienta de corte:	CNMG120408 MF 2025				
Tipo de operación:	Acabado				
Caudal lubricante (ml/h)	Presión aire comprimido (bar)	Presión CO2	Diámetro de la salida de CO2		
480	2	60	1.5		
REGISTRO DE MEDICIÓN GENERAL					
 					
<i>Desgaste máximo en el ancho del flanco</i>		<i>Medición</i>		<i>Valor (μm)</i>	
VBb máx (μm)	165,79	1		165,79	
<i>Desgaste promedio en el ancho del flanco</i>		2		117,14	
VB (μm)	129,750	3		106,32	
Conclusión: El desgaste de flanco en el filo de la herramienta no supera el criterio establecido por la norma ISO 3685 para plaquitas de metal duro que corresponde a 300 um en la zona media del flanco, y 600 um como desgaste máximo.					
Observación: Se evidencia desprendimiento del material del inserto entre la zona B y la zona C					

Reporte de desgaste del flanco, Tiempo 40 min



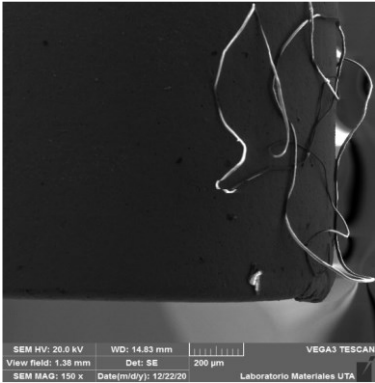
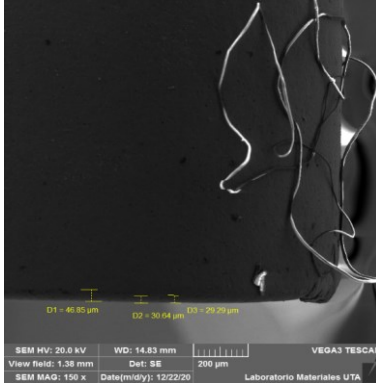
UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO		FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA		CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA	
 					
REPORTE DE DESGASTE DEL FLANCO DE LA HERRAMIENTA					
Datos Informativos					
Tipo de estudio	Experimental	Ítem	B		
Fecha de ejecución					
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato Laboratorio FICM				
Elaborado por	Ing. Diego Chadán	Revisado por	Ing. Diego Núñez		
Parámetros de torneado y lubricación					
n (rpm) - Vc (m/min)	Vf (mm/min) - fn (mm/rev)	Ap (mm)	Radio de punta del inserto (mm)	Ángulo de incidencia CO ₂	Tiempo de mecanizado (min)
840 - 235	122 - 0.2	0,4	0,8	45°	40
Material:	Acero Inoxidable AISI 304	Racores	2		
Sistema de lubricación	Criogénico	Sistema de lubricación:	MQL+0,5%NanoTiO ₂ +CO ₂ Criogénico		
Fluido lubricante:	MQL+0,5%NanoTiO ₂ +CO ₂	Fluido lubricante:	Unist ® Coolube 2210.		
Herramienta de corte:	CNMG120408 MF 2025				
Tipo de operación:	Acabado				
Caudal lubricante (ml/h)	Presión aire comprimido (bar)	Presión CO ₂	Diámetro de la salida de CO ₂		
480	2	60	1.5		
REGISTRO DE MEDICIÓN GENERAL					
 					
<i>Desgaste máximo en el ancho del flanco</i>		<i>Medición</i>	<i>Valor (μm)</i>		
VBb máx (μm)	154,84	1	154,84		
<i>Desgaste promedio en el ancho del flanco</i>		2	124,23		
VB (μm)	136,237	3	129,64		
Conclusión: El desgaste de flanco en el filo de la herramienta no supera el criterio establecido por la norma ISO 3685 para plaquitas de metal duro que corresponde a 300 um en la zona media del flanco, y 600 um como desgaste máximo.					
Observación: Se evidencia desprendimiento del material del inserto entre la zona B y la zona C					

Reporte de desgaste del flanco, Tiempo 60 min



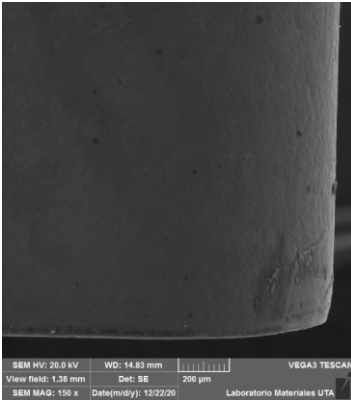
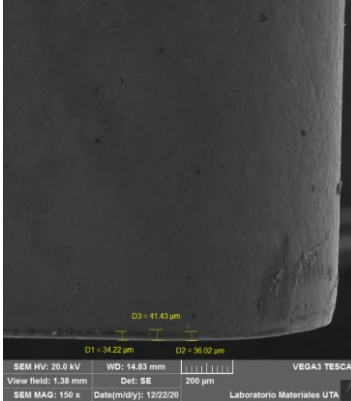
UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO		FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA		CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA	
 					
REPORTE DE DESGASTE DEL FLANCO DE LA HERRAMIENTA					
Datos Informativos					
Tipo de estudio	Experimental	Ítem	B		
Fecha de ejecución					
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato Laboratorio FICM				
Elaborado por	Ing. Diego Chadán	Revisado por	Ing. Diego Núñez		
Parámetros de torneado y lubricación					
n (rpm) - Vc (m/min)	Vf (mm/min) - fn (mm/rev)	Ap (mm)	Radio de punta del inserto (mm)	Ángulo de incidencia CO2	Tiempo de mecanizado (min)
840 - 235	122 - 0.2	0,4	0,8	45°	60
Material:	Acero Inoxidable AISI 304	Racores	2		
Sistema de lubricación	Criogénico	Sistema de lubricación:	MQL+0,5%NanoTiO2+CO2 Criogénico		
Fluido lubricante:	MQL+0,5%NanoTiO2+CO2	Fluido lubricante:	Unist ® Coolube 2210.		
Herramienta de corte:	CNMG120408 MF 2025				
Tipo de operación:	Acabado				
Caudal lubricante (ml/h)	Presión aire comprimido (bar)	Presión CO2	Diámetro de la salida de CO2		
480	2	60	1.5		
REGISTRO DE MEDICIÓN GENERAL					
					
<i>Desgaste máximo en el ancho del flanco</i>		<i>Medición</i>	<i>Valor (μm)</i>		
VBb máx (μm)	181,85	1	181,85		
<i>Desgaste promedio en el ancho del flanco</i>		2	153,94		
VB (μm)	157,250	3	135,96		
Conclusión: El desgaste de flanco en el filo de la herramienta no supera el criterio establecido por la norma ISO 3685 para plaquitas de metal duro que corresponde a 300 um en la zona media del flanco, y 600 um como desgaste máximo.					
Observación: Se evidencia desprendimiento del material del inserto entre la zona B y la zona C					

4.6.2. Experimento 7, 195 m/min 3 racores 30°



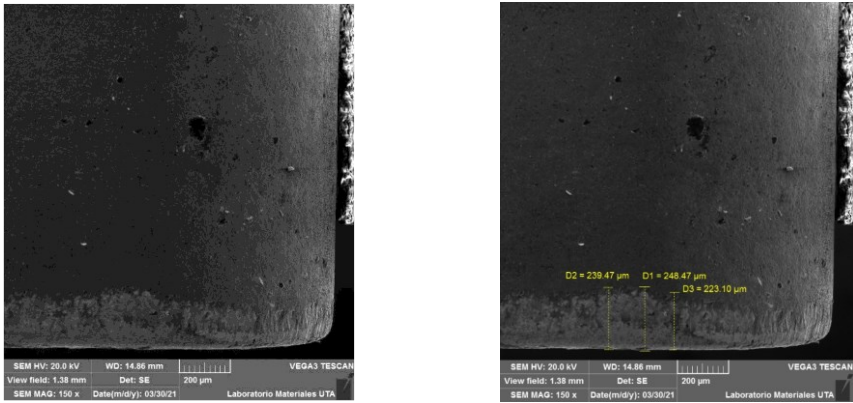
Reporte de desgaste del flanco, Tiempo 5 min

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO		FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA		CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA	
					
REPORTE DE DESGASTE DEL FLANCO DE LA HERRAMIENTA					
Datos Informativos					
Tipo de estudio	Experimental	Ítem		B	
Fecha de ejecución					
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato Laboratorio FICM				
Elaborado por	Ing. Diego Chadán	Revisado por		Ing. Diego Núñez	
Parámetros de torneado y lubricación					
n (rpm) - Vc (m/min)	Vf (mm/min) - fn (mm/rev)	Ap (mm)	Radio de punta del inserto (mm)	Ángulo de incidencia CO2	Tiempo de mecanizado (min)
700 - 195	122 - 0.2	0,4	0,8	30°	5
Material:	Acero Inoxidable AISI 304		Racores	2	
Sistema de lubricación	Criogénico		Sistema de lubricación:	MQL+0,5%NanoTiO2+CO2 Criogénico	
Fluido lubricante:	MQL+0,5%NanoTiO2+CO2		Fluido lubricante:	Unist ® Coolube 2210.	
Herramienta de corte:	CNMG120408 MF 2025				
Tipo de operación:	Acabado				
Caudal lubricante (ml/h)	Presión aire comprimido (bar)	Presión CO2	Diámetro de la salida de CO2		
480	2	60	1.5		
REGISTRO DE MEDICIÓN GENERAL					
					
<i>Desgaste máximo en el ancho del flanco</i>		Medición		Valor (µm)	
VBb máx (µm)	46,85	1		46,85	
<i>Desgaste promedio en el ancho del flanco</i>		2		30,64	
VB (µm)	35,593	3		29,29	
Conclusión: El desgaste de flanco en el filo de la herramienta no supera el criterio establecido por la norma ISO 3685 para plaquitas de metal duro que corresponde a 300 um en la zona media del flanco, y 600 um como desgaste máximo.					
Observación: Se evidencia un mayor desprendimiento de material en relación a la medición anterior					



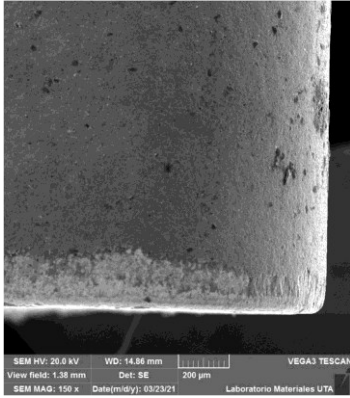
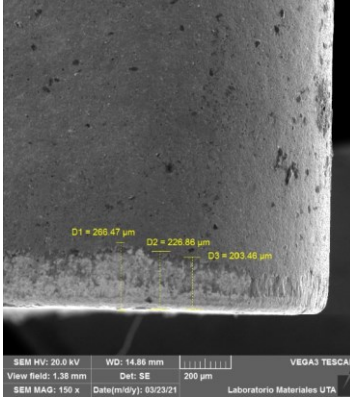
Reporte de desgaste del flanco, Tiempo 20 min

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO		FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA		CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA	
 					
REPORTE DE DESGASTE DEL FLANCO DE LA HERRAMIENTA					
Datos Informativos					
Tipo de estudio	Experimental	Ítem	B		
Fecha de ejecución					
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato Laboratorio FICM				
Elaborado por	Ing. Diego Chadán	Revisado por	Ing. Diego Núñez		
Parámetros de torneado y lubricación					
n (rpm) - Vc (m/min)	Vf (mm/min) - fn (mm/rev)	Ap (mm)	Radio de punta del inserto (mm)	Ángulo de incidencia CO ₂	Tiempo de mecanizado (min)
700 - 195	122 - 0.2	0,4	0,8	30°	20
Material:	Acero Inoxidable AISI 304		Racores	2	
Sistema de lubricación	Criogénico		Sistema de lubricación:	MQL+0,5%NanoTiO ₂ +CO ₂ Criogénico	
Fluido lubricante:	MQL+0,5%NanoTiO ₂ +CO ₂		Fluido lubricante:	Unist ® Coolube 2210.	
Herramienta de corte:	CNMG120408 MF 2025				
Tipo de operación:	Acabado				
Caudal lubricante (ml/h)	Presión aire comprimido (bar)	Presión CO ₂	Diámetro de la salida de CO ₂		
480	2	60	1.5		
REGISTRO DE MEDICIÓN GENERAL					
					
<i>Desgaste máximo en el ancho del flanco</i>		Medición		Valor (μm)	
VBb máx (μm)	41,43	1		41,43	
<i>Desgaste promedio en el ancho del flanco</i>		2		34,22	
VB (μm)	37,223	3		36,02	
Conclusión: El desgaste de flanco en el filo de la herramienta no supera el criterio establecido por la norma ISO 3685 para plaquitas de metal duro que corresponde a 300 um en la zona media del flanco, y 600 um como desgaste máximo.					
Observación: Se evidencia un mayor desprendimiento de material en relación a la medición anterior					

Reporte de desgaste del flanco, Tiempo 40 min



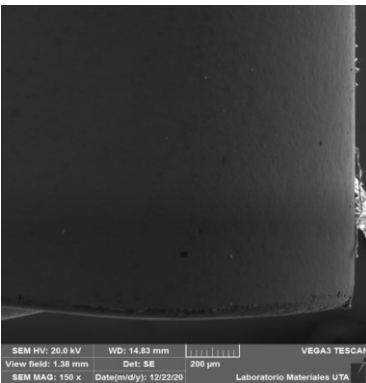
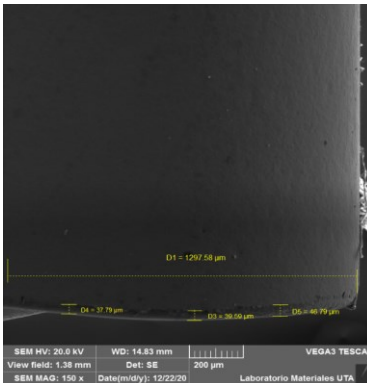
UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO		FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA		CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA	
 					
REPORTE DE DESGASTE DEL FLANCO DE LA HERRAMIENTA					
Datos Informativos					
Tipo de estudio	Experimental	Ítem		B	
Fecha de ejecución					
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato Laboratorio FICM				
Elaborado por	Ing. Diego Chadán	Revisado por		Ing. Diego Núñez	
Parámetros de torneado y lubricación					
n (rpm) - Vc (m/min)	Vf (mm/min) - fn (mm/rev)	Ap (mm)	Radio de punta del inserto (mm)	Ángulo de incidencia CO2	Tiempo de mecanizado (min)
700 - 195	122 - 0.2	0,4	0,8	30°	40
Material:	Acero Inoxidable AISI 304		Racores	2	
Sistema de lubricación	Criogénico		Sistema de lubricación:	MQL+0,5%NanoTiO2+CO2 Criogénico	
Fluido lubricante:	MQL+0,5%NanoTiO2+CO2		Fluido lubricante:	Unist® Coolube 2210.	
Herramienta de corte:	CNMG120408 MF 2025				
Tipo de operación:	Acabado				
Caudal lubricante (ml/h)	Presión aire comprimido (bar)	Presión CO2	Diámetro de la salida de CO2		
480	2	60	1.5		
REGISTRO DE MEDICIÓN GENERAL					
					
<i>Desgaste máximo en el ancho del flanco</i>		Medición		Valor (µm)	
VBb máx (µm)	248,47	1		239,47	
<i>Desgaste promedio en el ancho del flanco</i>		2		248,47	
VB (µm)	230,467	3		203,46	
Conclusión: El desgaste de flanco en el filo de la herramienta no supera el criterio establecido por la norma ISO 3685 para plaquitas de metal duro que corresponde a 300 µm en la zona media del flanco, y 600 µm como desgaste máximo.					
Observación: Se evidencia un mayor desprendimiento de material en relación a la medición anterior					

Reporte de desgaste del flanco, Tiempo 60 min



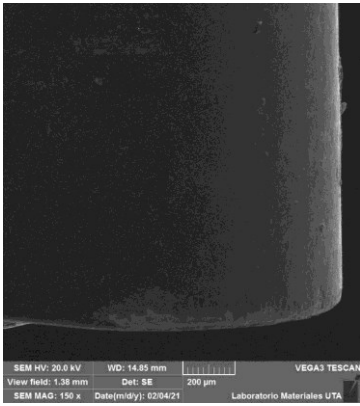
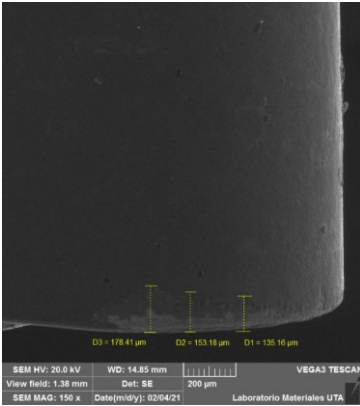
UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO		FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA		CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA	
 					
REPORTE DE DESGASTE DEL FLANCO DE LA HERRAMIENTA					
Datos Informativos					
Tipo de estudio	Experimental	Ítem		B	
Fecha de ejecución					
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato Laboratorio FICM				
Elaborado por	Ing. Diego Chadán	Revisado por		Ing. Diego Núñez	
Parámetros de torneado y lubricación					
n (rpm) - Vc (m/min)	Vf (mm/min) - fn (mm/rev)	Ap (mm)	Radio de punta del inserto (mm)	Ángulo de incidencia CO2	Tiempo de mecanizado (min)
700 - 195	122 - 0.2	0,4	0,8	30°	60
Material:	Acero Inoxidable AISI 304		Racores	2	
Sistema de lubricación	Criogénico		Sistema de lubricación:	MQL+0,5%NanoTiO2+CO2 Criogénico	
Fluido lubricante:	MQL+0,5%NanoTiO2+CO2		Fluido lubricante:	Unist® Coolube 2210.	
Herramienta de corte:	CNMG120408 MF 2025				
Tipo de operación:	Acabado				
Caudal lubricante (ml/h)	Presión aire comprimido (bar)	Presión CO2	Diámetro de la salida de CO2		
480	2	60	1.5		
REGISTRO DE MEDICIÓN GENERAL					
 					
<i>Desgaste máximo en el ancho del flanco</i>		Medición		Valor (μm)	
VBb máx (μm)	266,47	1		266,47	
<i>Desgaste promedio en el ancho del flanco</i>				2	
VB (μm)	232,270			226,88	
				3	
				203,46	
Conclusión: El desgaste de flanco en el filo de la herramienta no supera el criterio establecido por la norma ISO 3685 para plaquitas de metal duro que corresponde a 300 um en la zona media del flanco, y 600 um como desgaste máximo.					
Observación: Se evidencia un mayor desprendimiento de material en relación a la medición anterior					

4.6.2. Experimento 8, 235 m/min 3 racores 30°



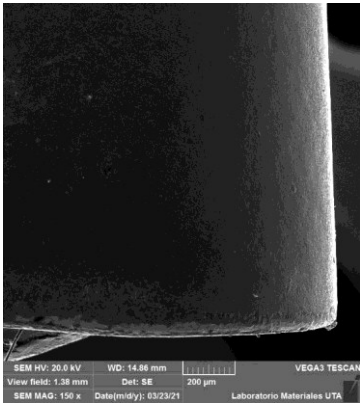
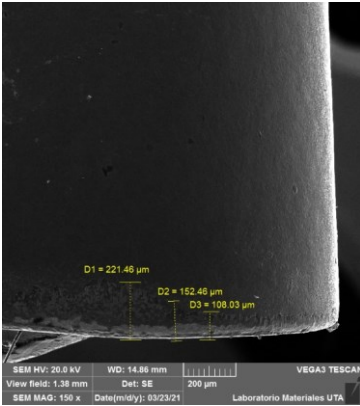
Reporte de desgaste del flanco, Tiempo 5 min

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO		FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA		CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA	
					
REPORTE DE DESGASTE DEL FLANCO DE LA HERRAMIENTA					
Datos Informativos					
Tipo de estudio	Experimental	Ítem		B	
Fecha de ejecución					
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato Laboratorio FICM				
Elaborado por	Ing. Diego Chadán	Revisado por		Ing. Diego Núñez	
Parámetros de torneado y lubricación					
n (rpm) - Vc (m/min)	Vf (mm/min) - fn (mm/rev)	Ap (mm)	Radio de punta del inserto (mm)	Ángulo de incidencia CO2	Tiempo de mecanizado (min)
840 - 235	122 - 0.2	0,4	0,8	30°	5
Material:	Acero Inoxidable AISI 304		Racores	2	
Sistema de lubricación	Criogénico		Sistema de lubricación:	MQL+0,5%NanoTiO2+CO2 Criogénico	
Fluido lubricante:	MQL+0,5%NanoTiO2+CO2		Fluido lubricante:	Unist ® Coolube 2210.	
Herramienta de corte:	CNMG120408 MF 2025				
Tipo de operación:	Acabado				
Caudal lubricante (ml/h)	Presión aire comprimido (bar)	Presión CO2	Diámetro de la salida de CO2		
480	2	60	1.5		
REGISTRO DE MEDICIÓN GENERAL					
					
<i>Desgaste máximo en el ancho del flanco</i>		<i>Medición</i>		<i>Valor (µm)</i>	
VBb máx (µm)	46,79	1		37,79	
<i>Desgaste promedio en el ancho del flanco</i>		2		39,59	
VB (µm)	41,390	3		46,79	
Conclusión: El desgaste de flanco en el filo de la herramienta no supera el criterio establecido por la norma ISO 3685 para plaquitas de metal duro que corresponde a 300 µm en la zona media del flanco, y 600 µm como desgaste máximo.					
Observación: Se evidencia un mayor desprendimiento de material en relación a la medición anterior					



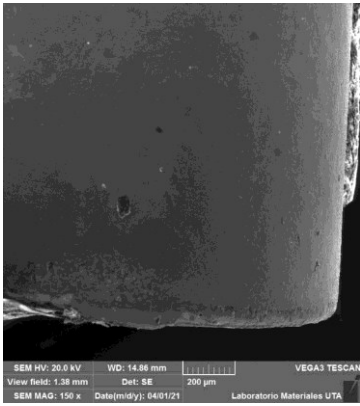
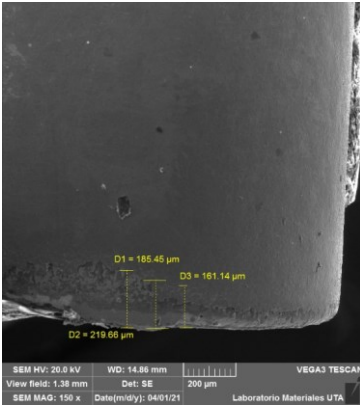
Reporte de desgaste del flanco, Tiempo 20 min

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA			
REPORTE DE DESGASTE DEL FLANCO DE LA HERRAMIENTA					
Datos Informativos					
Tipo de estudio	Experimental	Ítem	B		
Fecha de ejecución					
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato Laboratorio FICM				
Elaborado por	Ing. Diego Chadán	Revisado por	Ing. Diego Núñez		
Parámetros de torneado y lubricación					
n (rpm) - Vc (m/min)	Vf (mm/min) - fn (mm/rev)	Ap (mm)	Radio de punta del inserto (mm)	Ángulo de incidencia CO2	Tiempo de mecanizado (min)
840 - 235	122 - 0.2	0,4	0,8	30°	20
Material:	Acero Inoxidable AISI 304		Racores	2	
Sistema de lubricación	Criogénico		Sistema de lubricación:	MQL+0,5%NanoTiO2+CO2 Criogénico	
Fluido lubricante:	MQL+0,5%NanoTiO2+CO2		Fluido lubricante:	Unist ® Coolube 2210.	
Herramienta de corte:	CNMG120408 MF 2025				
Tipo de operación:	Acabado				
Caudal lubricante (ml/h)	Presión aire comprimido (bar)	Presión CO2	Diámetro de la salida de CO2		
480	2	60	1.5		
REGISTRO DE MEDICIÓN GENERAL					
					
<i>Desgaste máximo en el ancho del flanco</i>		<i>Medición</i>		<i>Valor (µm)</i>	
VBb máx (µm)	178,41	1		178,41	
<i>Desgaste promedio en el ancho del flanco</i>		2		153,18	
VB (µm)	155,583	3		135,16	
Conclusión: El desgaste de flanco en el filo de la herramienta no supera el criterio establecido por la norma ISO 3685 para plaquitas de metal duro que corresponde a 300 um en la zona media del flanco, y 600 um como desgaste máximo.					
Observación: Se evidencia un mayor desprendimiento de material en relación a la medición anterior					

Reporte de desgaste del flanco, Tiempo 40 min

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA			
REPORTE DE DESGASTE DEL FLANCO DE LA HERRAMIENTA					
Datos Informativos					
Tipo de estudio	Experimental	Ítem	B		
Fecha de ejecución					
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato Laboratorio FICM				
Elaborado por	Ing. Diego Chadán	Revisado por	Ing. Diego Núñez		
Parámetros de torneado y lubricación					
n (rpm) - Vc (m/min)	Vf (mm/min) - fn (mm/rev)	Ap (mm)	Radio de punta del inserto (mm)	Ángulo de incidencia CO2	Tiempo de mecanizado (min)
840 - 235	122 - 0.2	0,4	0,8	30°	40
Material:	Acero Inoxidable AISI 304		Racores	2	
Sistema de lubricación	Criogénico		Sistema de lubricación:	MQL+0,5%NanoTiO2+CO2 Criogénico	
Fluido lubricante:	MQL+0,5%NanoTiO2+CO2		Fluido lubricante:	Unist ® Coolube 2210.	
Herramienta de corte:	CNMG120408 MF 2025				
Tipo de operación:	Acabado				
Caudal lubricante (ml/h)	Presión aire comprimido (bar)	Presión CO2	Diámetro de la salida de CO2		
480	2	60	1.5		
REGISTRO DE MEDICIÓN GENERAL					
					
<i>Desgaste máximo en el ancho del flanco</i>		<i>Medición</i>	<i>Valor (μm)</i>		
VBb máx (μm)	221,46	1	221,46		
<i>Desgaste promedio en el ancho del flanco</i>		2	152,46		
VB (μm)	160,650	3	108,03		
Conclusión: El desgaste de flanco en el filo de la herramienta no supera el criterio establecido por la norma ISO 3685 para plaquitas de metal duro que corresponde a 300 um en la zona media del flanco, y 600 um como desgaste máximo.					
Observación: Se evidencia un mayor desprendimiento de material en relación a la medición anterior					

Reporte de desgaste del flanco, Tiempo 60 min

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA			
REPORTE DE DESGASTE DEL FLANCO DE LA HERRAMIENTA					
Datos Informativos					
Tipo de estudio	Experimental	Ítem	B		
Fecha de ejecución					
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato Laboratorio FICM				
Elaborado por	Ing. Diego Chadán	Revisado por	Ing. Diego Núñez		
Parámetros de torneado y lubricación					
n (rpm) - Vc (m/min)	Vf (mm/min) - fn (mm/rev)	Ap (mm)	Radio de punta del inserto (mm)	Ángulo de incidencia CO2	Tiempo de mecanizado (min)
840 - 235	122 - 0.2	0,4	0,8	30°	60
Material:	Acero Inoxidable AISI 304	Racores	2		
Sistema de lubricación	Criogénico	Sistema de lubricación:	MQL+0,5%NanoTiO2+CO2 Criogénico		
Fluido lubricante:	MQL+0,5%NanoTiO2+CO2	Fluido lubricante:	Unist ® Coolube 2210.		
Herramienta de corte:	CNMG120408 MF 2025				
Tipo de operación:	Acabado				
Caudal lubricante (ml/h)	Presión aire comprimido (bar)	Presión CO2	Diámetro de la salida de CO2		
480	2	60	1.5		
REGISTRO DE MEDICIÓN GENERAL					
					
<i>Desgaste máximo en el ancho del flanco</i>		<i>Medición</i>	<i>Valor (μm)</i>		
VBb máx (μm)	219,66	1	219,66		
<i>Desgaste promedio en el ancho del flanco</i>		2	185,45		
VB (μm)	188,750	3	161,14		
Conclusión: El desgaste de flanco en el filo de la herramienta no supera el criterio establecido por la norma ISO 3685 para plaquitas de metal duro que corresponde a 300 um en la zona media del flanco, y 600 um como desgaste máximo.					
Observación: Se evidencia un mayor desprendimiento de material en relación a la medición anterior					

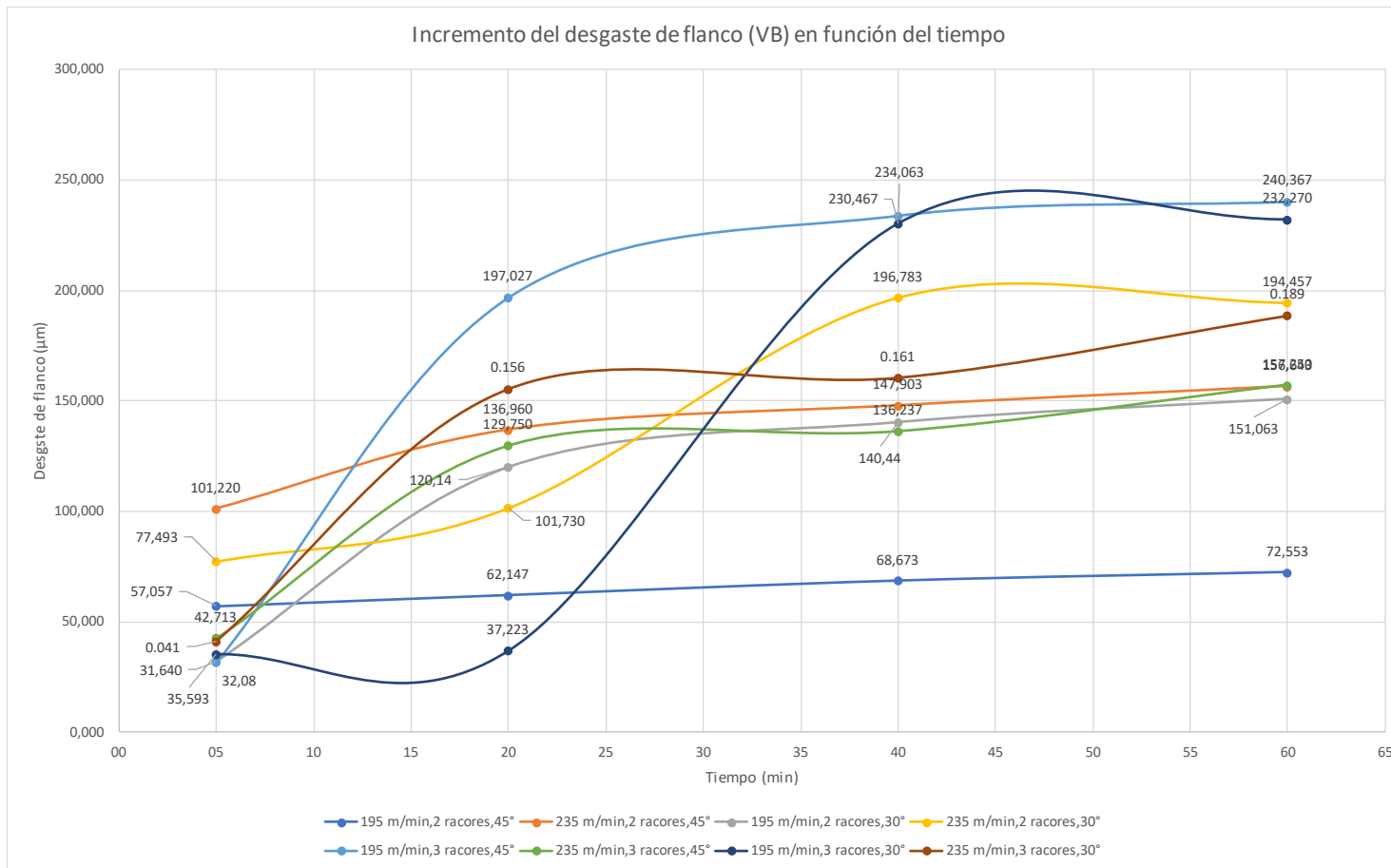


Figura 63. Comportamiento del desgaste de flanco en relación con los parámetros que fueron variados en cada experimento.

Fuente: Autor.

4.7. Interpretación de resultados.

Se observa que el desgaste de flanco evoluciona en función del tiempo, cada curva representa una combinación de parámetros, la evaluación se realizó variando los parámetros descritos en el diseño de experimentos, por lo cual existen 8 combinaciones, en cada una de las curvas se observa que el desgaste de flanco VB evoluciona conforme avanza el tiempo de mecanizado en los primeros 5 minutos se observa que existe un desgaste relativamente bajo en comparación con los 20, 40 y 60 minutos.

La combinación más favorable se presenta en la combinación de parámetros correspondiente a 195 m/min 2 racores y 45 grados de inclinación respecto al eje de la boquilla mientras que el mayor desgaste se presenta en la combinación de parámetros 195 m/min 3 racores y 45 grados.

Aunque estos datos son relevantes, es necesario evaluar otros factores para tomar una decisión sobre que combinación de parámetros elegir, como la calidad superficial alcanzada en cada experimento y los resultados del análisis CFD obtenidos como temperaturas, velocidades y longitud de la nube de fluido criogénico que en su mayor parte dependen de la configuración del adaptador de boquilla además de la velocidad de corte y la velocidad de avance.

Tabla 27. Datos obtenidos mediante microscopía SEM del desgaste de flanco en cada experimento.

Fuente: Autor

Medición	Experimento	Tiempo			
		5,0	20,0	40,0	60,0
1	195 m/min, 2 racores, 45°	46,85	65,63	74,92	70,22
2		54,06	64,82	65,63	64,82
3		70,26	55,99	65,47	82,62
Promedio		57,057	62,147	68,673	72,553
1	235 m/min, 2 racores, 45°	100,02	135,16	181,85	178,25
2		91,91	138,76	127,84	153,04
3		111,73	136,96	134,02	138,64
Promedio		101,220	136,960	147,903	156,643
1	195 m/min, 2 racores, 30°	31,46	97,31	163,85	131,44
2		34,19	151,38	136,84	165,65
3		30,59	111,73	120,63	156,1
Promedio		32,08	120,14	140,44	151,063
1	235 m/min, 2 racores, 30°	82,9	136,96	177,13	208,86
2		64,88	72,72	212,46	207,06
3		84,7	95,51	200,76	167,45
Promedio		77,493	101,730	196,783	194,457
1	195 m/min, 3 racores, 45°	35,34	248,69	257,47	253,87
2		34,19	192,82	248,47	247,57
3		25,39	149,57	196,25	219,66
Promedio		31,640	197,027	234,063	240,367
1	235 m/min, 3 racores, 45°	48,85	165,79	154,84	181,85
2		41,45	117,14	124,23	153,94
3		37,84	106,32	129,64	135,96
Promedio		42,713	129,750	136,237	157,250
1	195 m/min, 3 racores, 30°	46,85	41,43	239,47	266,47
2		30,64	34,22	248,47	226,88
3		29,29	36,02	203,46	203,46
Promedio		35,593	37,223	230,467	232,270
1	235 m/min, 3 racores, 30°	37,79	178,41	221,46	219,66
2		39,59	153,18	152,46	185,45
3		46,79	135,16	108,03	161,14
Promedio		41,390	155,583	160,650	188,750

Fuente: Autor.

Comparación experimento 1 y 5.

Tabla 28. Desgaste de flanco del inserto alcanzando el criterio de desgaste establecido por la norma ISO 3685 para la combinación de parámetros 195 m/min 45° para 2 y 3 racores. Fuente: Autor

Tiempo (min)	195 m/min, 2 racores, 45°	195 m/min, 3 racores, 45°
	Desgaste Vb (µm)	Desgaste Vb (µm)
5	57,057	31,640
20	62,147	197,027
40	68,673	234,063
60	72,553	240,367
80	80,335	343,444
100	87,725	412,232
120	95,794	481,02
140	104,606	549,808
160	114,229	618,596
180	124,737	687,384
200	136,211	756,172
220	148,741	824,96
240	162,423	893,748
260	177,364	962,536
280	193,680	1031,324
300	211,496	1100,112
320	230,951	1168,9
340	252,196	1237,688
360	275,395	1306,476
380	300,728	1375,264

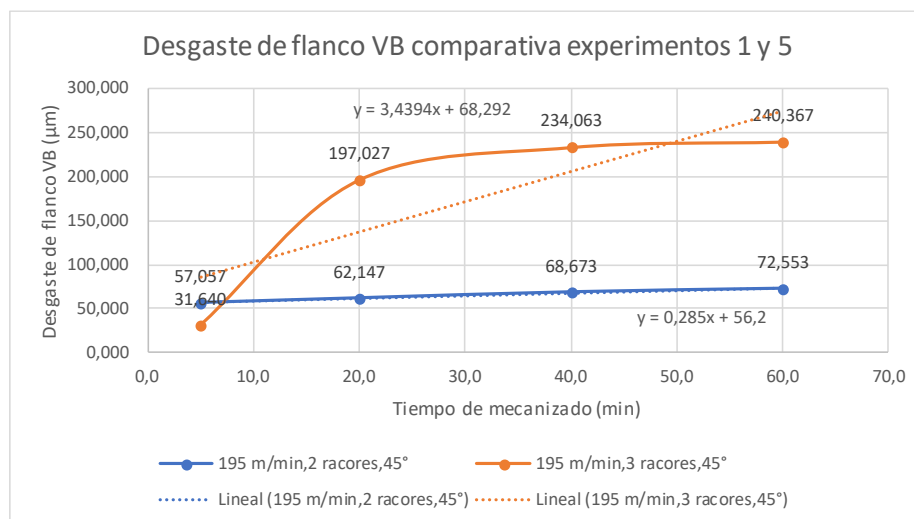


Figura 64. Desgaste de flanco medido en función del tiempo de mecanizado experimentos 1 y 5. Fuente: Autor.

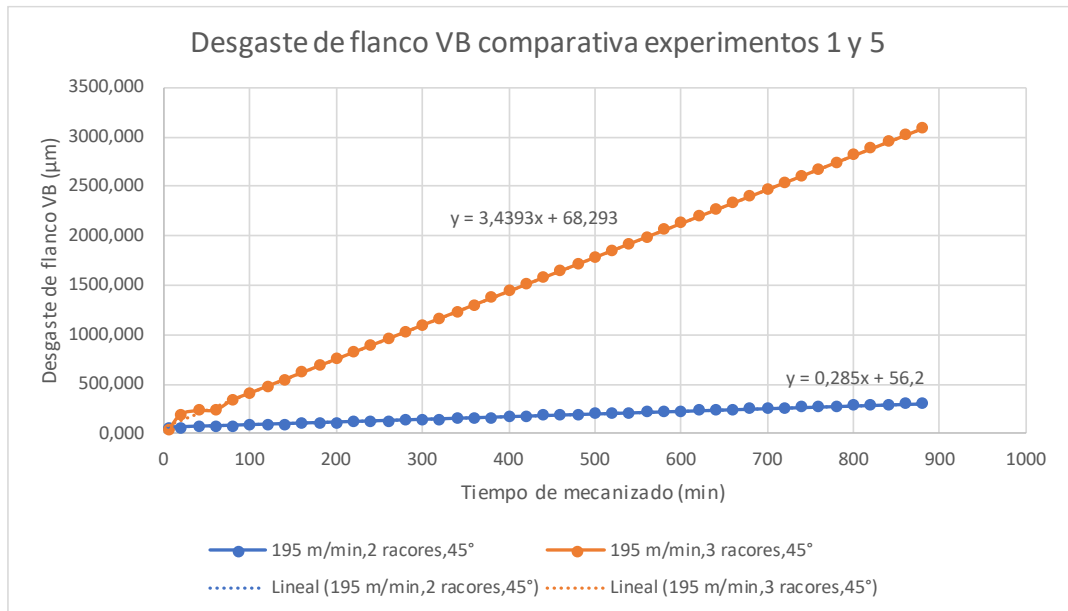


Figura 65. Evolución del desgaste de flanco en función del tiempo hasta alcanzar el criterio máximo de desgaste, se presentan las líneas de tendencia y las ecuaciones que gobiernan el desgaste de la herramienta de corte. Comparando el experimento 1 con el 5. Fuente: Autor.

El desgaste de flanco alcanza el criterio establecido por la norma ISO 3685 para desgaste uniforme tempranamente en el experimento 5 la cota de 300 µm es alcanzada a los 80 minutos mientras que en el experimento 1 a los 860 minutos, este fenómeno puede ser producto de la caída de presión conforme se aumentan accesorios en el sistema, por lo que existen más pérdidas y la cantidad de fluido de corte llega en menos cantidad cuando la boquilla tiene 3 racores que cuando tiene 2, por lo que la zona de corte se enfriaría más eficientemente utilizando únicamente 2 racores.

Comparación experimento 2 y 6.

Tabla 29. Desgaste de flanco del inserto alcanzando el criterio de desgaste establecido por la norma ISO 3685 para la combinación de parámetros 235 m/min 45° para 2 y 3 racores. Fuente: Autor

Tiempo (min)	235 m/min, 2 racores, 45°	235 m/min, 3 racores, 45°
	Desgaste Vb (µm)	Desgaste Vb (µm)
5	101,2200	42,7133
20	136,9600	129,7500
40	147,9033	136,2367
60	156,6433	157,2500
80	181,054	205,3240
100	199,67	241,7700
120	218,286	278,2160
140	236,902	314,6620
160	255,518	351,1080
180	274,134	387,5540
200	292,75	424,0000
220	311,366	460,4460
240	329,982	496,8920
260	348,598	533,3380

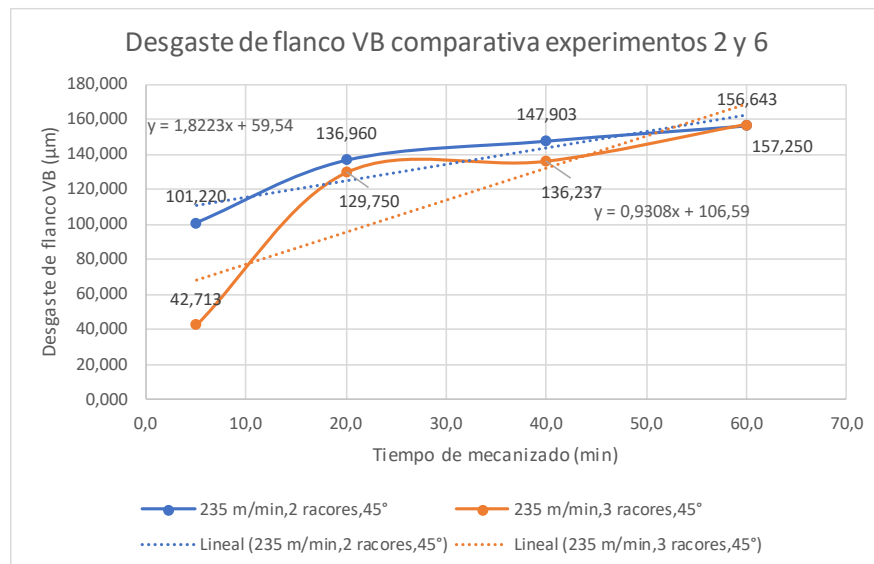


Figura 66. Desgaste de flanco medido en función del tiempo de mecanizado experimentos 2 y 6. Fuente: Autor.

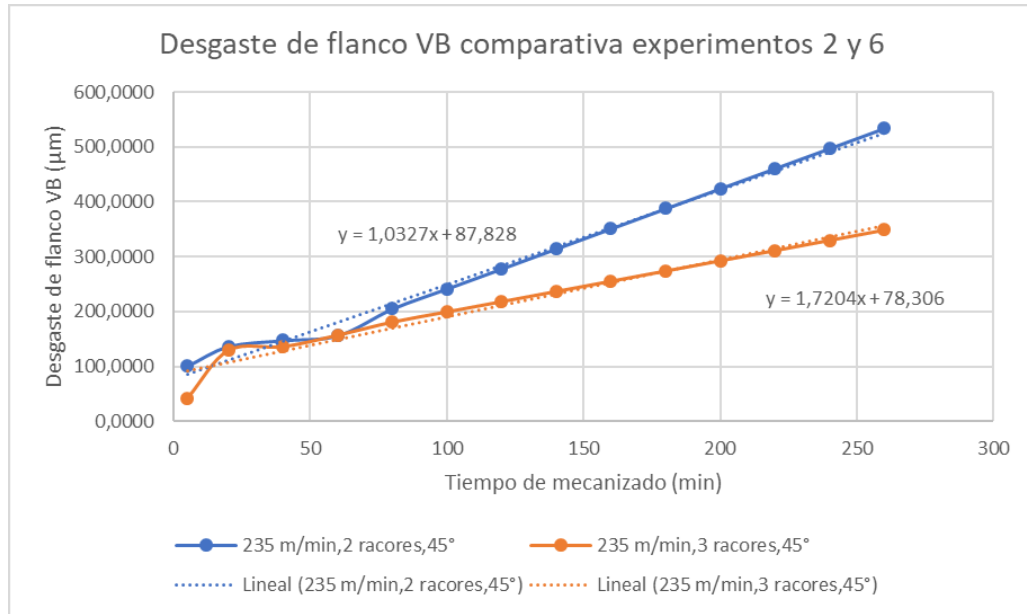


Figura 67. Evolución del desgaste de flanco en función del tiempo hasta alcanzar el criterio máximo, se presentan las líneas de tendencia y las ecuaciones que gobiernan el desgaste de la herramienta de corte. Comparando el experimento 2 con el 6. Fuente: Autor.

El desgaste de flanco alcanzó el criterio establecido por la norma ISO 3685 para desgaste uniforme tempranamente en el experimento 2 a 235 m/min 3 racores y una orientación de 45° la cota de 300 µm es alcanzada en este experimento 2, a los 140 minutos mientras que en el experimento 6 a los 220 minutos, esto se debe a que se utiliza una velocidad de corte mayor en relación con los experimentos 1 y 5, lo que nos dice que conforme subimos la velocidad de corte el desgaste de flanco de la herramienta de corte es mayor para ambos casos, sin embargo, cabe destacar que la combinación de parámetros en el experimento 6 presenta resultados más favorables que en el experimento 2.

Comparación experimento 3 y 7.

Tabla 30. Desgaste de flanco del inserto alcanzando el criterio de desgaste establecido por la norma ISO 3685 para la combinación de parámetros 195 m/min 30° para 2 y 3 racores. Fuente: Autor

Tiempo (min)	195 m/min, 2 racores, 30°	195 m/min, 3 racores, 30°
	Desgaste Vb (µm)	Desgaste Vb (µm)
5	32,080	35,593
20	120,140	37,223
40	140,440	230,467
60	151,063	232,270
80	206,7480	342,115
100	246,0580	427,541
120	285,3680	512,967
140	324,6780	598,393
160	363,9880	683,819
180	403,2980	769,245
200	442,6080	854,671
220	481,9180	940,097
240	521,2280	1025,523
260	560,5380	1110,949

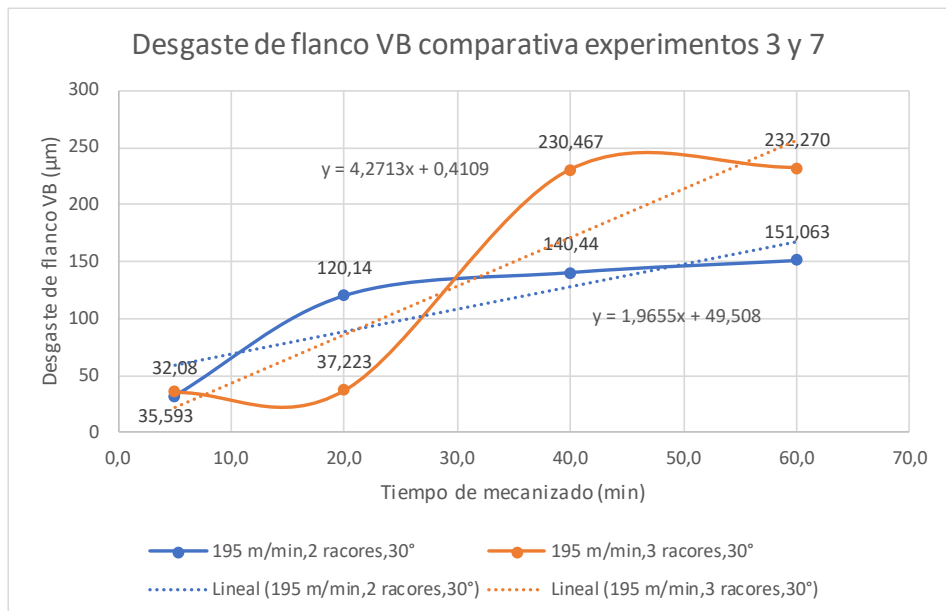


Figura 68. Desgaste de flanco medido en función del tiempo de mecanizado experimentos 3 y 7. Fuente: Autor.

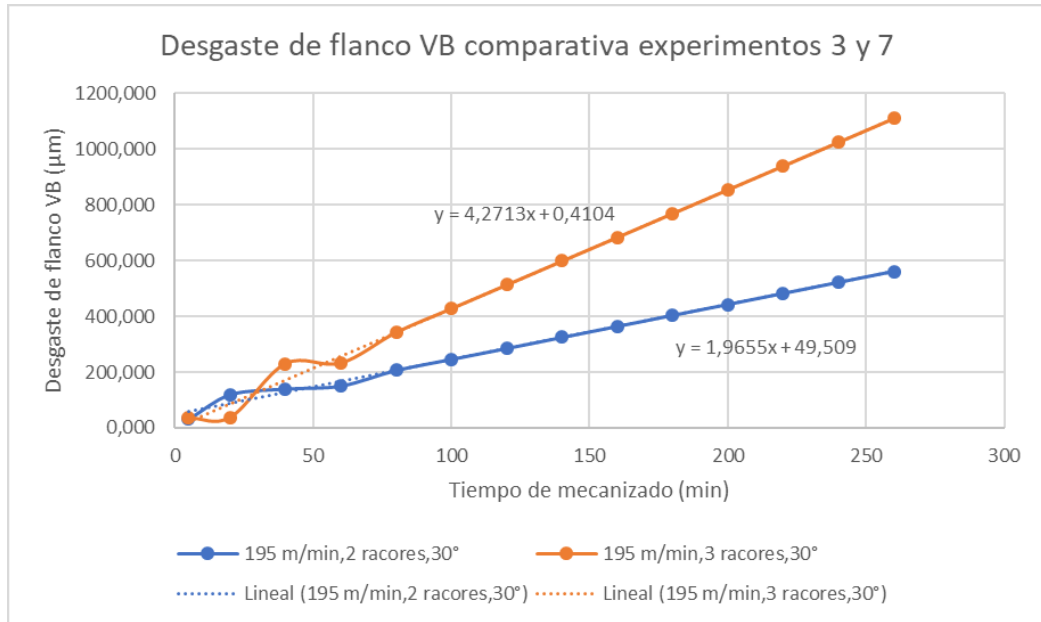


Figura 69. Evolución del desgaste de flanco en función del tiempo hasta alcanzar el criterio máximo, se presentan las líneas de tendencia y las ecuaciones que gobiernan el desgaste de la herramienta de corte. Comparando el experimento 3 con el 7. Fuente: Autor.

El desgaste de flanco alcanza el criterio establecido por la norma ISO 3685 para desgaste uniforme tempranamente en el experimento 7 a 195 m/min 3 racores y una orientación de 30° la cota de 300 µm es alcanzada en este experimento 3 a los 140 minutos mientras que en el experimento 7 a los 80 minutos, dado que la inclinación de los racores respecto al eje del adaptador de boquilla es más pronunciado y la cantidad de accesorios es menor, existe una mayor presión y longitud del haz de fluido criogénico, por ello el desgaste de flanco en la combinación 7 a 195 m/min 30° y 2 Racores es más favorable.

Comparación experimento 4 y 8.

Tabla 31. Desgaste de flanco del inserto alcanzando el criterio de desgaste establecido por la norma ISO 3685 para la combinación de parámetros 235 m/min 30° para 2 y 3 racores. Fuente: Autor

Tiempo (min)	235 m/min, 2 racores, 30°	235 m/min, 3 racores, 30°
	Desgaste Vb (μm)	Desgaste Vb (μm)
5	32,080	35,593
20	120,140	37,223
40	140,440	230,467
60	151,063	232,270
80	259,8630	249,917
100	307,9650	296,409
120	356,0670	342,901
140	404,1690	389,393
160	452,2710	435,885
180	500,3730	482,377
200	548,4750	528,869
220	596,5770	575,361
240	644,6790	621,853
260	692,7810	668,345

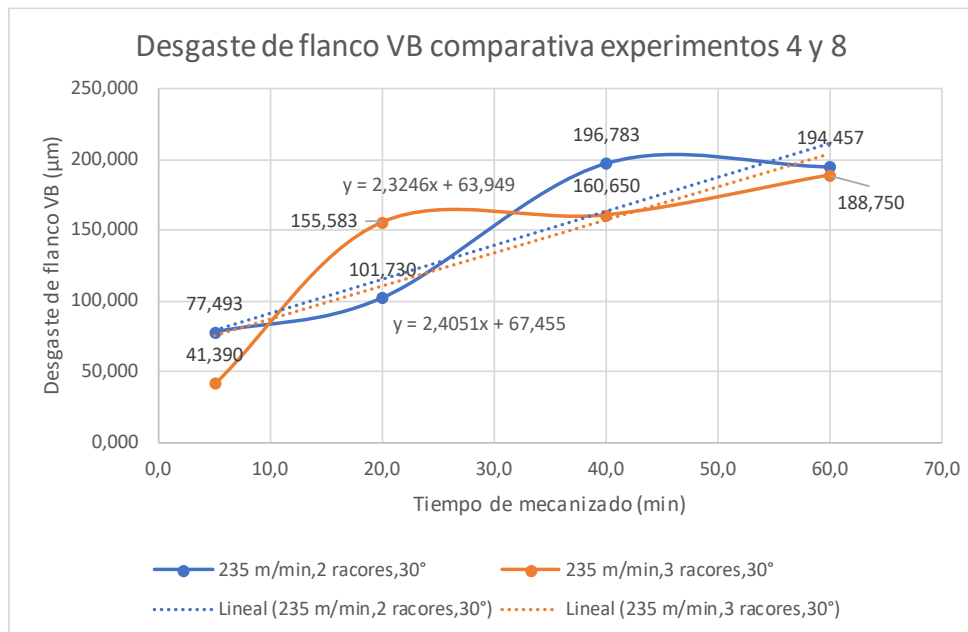


Figura 70. Desgaste de flanco medido en función del tiempo de mecanizado experimentos 4 y 8. Fuente: Autor.

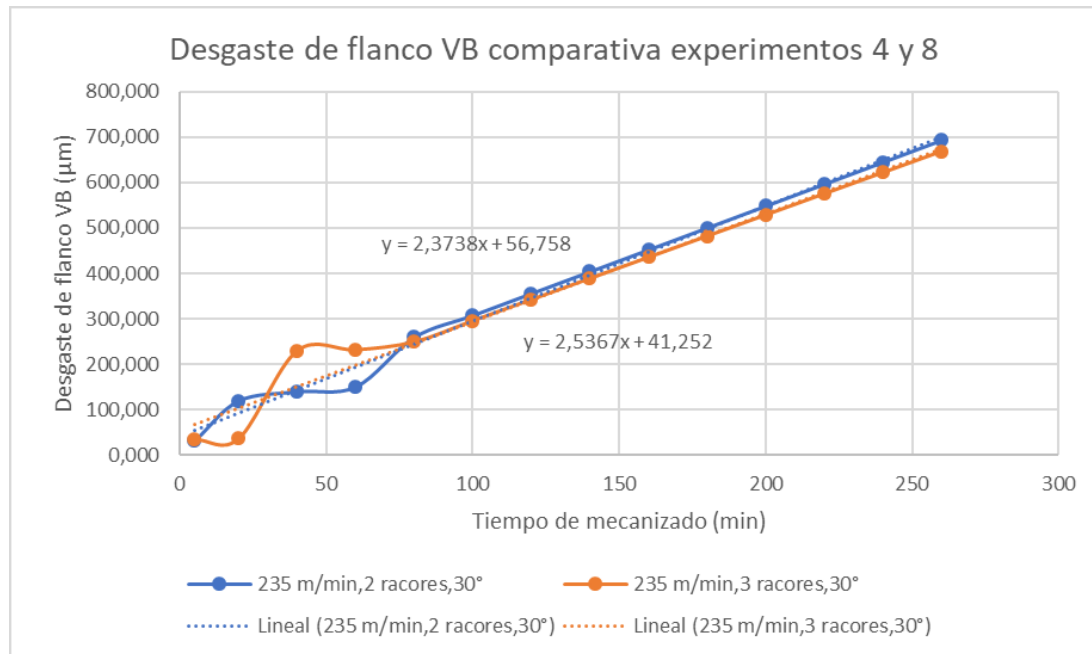


Figura 71. Evolución del desgaste de flanco en función del tiempo hasta alcanzar el criterio máximo, se presentan las líneas de tendencia y las ecuaciones que gobiernan el desgaste de la herramienta de corte. Comparando el experimento 4 con el 8. Fuente: Autor

El desgaste de flanco alcanza el criterio establecido por la norma ISO 3685 para desgaste uniforme tempranamente en el experimento 4 a 235 m/min 3 racores y una orientación de 30° la cota de 300 µm es alcanzada en este experimento a los 100 minutos mientras que en el experimento 8 a los 120 minutos, dado que la inclinación de los racores respecto al eje del adaptador de boquilla es más pronunciado y la cantidad de accesorios es menor, existe una mayor presión y longitud del haz de fluido criogénico, por ello el desgaste de flanco en la combinación 7 y 8 es casi similar en ambos casos tomando en cuenta que mientras se aumenta la velocidad de corte el desgaste también se incrementa.

4.8. Ecuación de Taylor.

La norma ISO 3685 establece una expresión matemática que es útil para determinar la vida útil de la herramienta de corte, en este caso se utilizó la expresión simplificada establecida en el apartado F 3.2 que emplea dos constantes C & K que se fundamentan en los parámetros de corte y el tiempo en el que se llega al criterio de desgaste en cada experimento.

$$V_c T c^{\frac{1}{k}} = C$$

Donde:

V_c : Velocidad de corte.

T_c : Tiempo de vida útil de la herramienta.

C & k : Constantes calculadas en función de los parámetros de corte.

Constante C.

Las constantes C y k se obtienen mediante las siguientes expresiones, establecidas en el anexo F tabla F1 de la ficha de reporte de la norma ISO 3685.

Constante k.

$$k = \frac{\sum xy - \frac{\sum x \sum y}{n}}{\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n}}$$

Constante C.

$$\log C = \bar{x} - \bar{y}/k$$

Para optimizar el proceso se elaboró una hoja de cálculo descrita en las tablas y que facilita el cálculo de las dos constantes y la obtención de la expresión matemática que determina la vida útil de las herramientas de corte, en este caso para conocer cómo influye la cantidad de racores en el proceso determinamos una expresión matemática para los experimentos con 2 racores y otra para 3 racores.

Tabla 32. Parámetros de las constantes C y k para mecanizado criogénico con 2 racores. Fuente: Autor

Número de experimento	V_c (m/min)	t (min)	$X = \log(V_c)$	$Y = \log(t)$	XY	X^2	Y^2
1	195	379,425	2,290	2,579	5,906	5,244	6,652
2	235	207,789	2,371	2,318	5,495	5,622	5,371
3	195	127,444	2,290	2,105	4,821	5,244	4,432
4	235	96,688	2,371	1,985	4,707	5,622	3,942
SUMA			9,322	8,987	20,930	21,732	20,397

Tabla 33. Resultados para las constantes C & k calculados para mecanizado criogénico con 2 racores. Fuente: Autor

$(\Sigma x)^2$	86,904
$(\Sigma x)^2/n$	21,726
$\Sigma x \Sigma y$	83,783
$\Sigma x \Sigma y/n$	20,946
k	-2,354
\bar{y}	2,247
\bar{x}	2,331
log C	3,285
C	1928,288

Tabla 34. Parámetros de las constantes C y k para mecanizado criogénico con 3 racores. Fuente: Autor

Número de experimento	Vc (m/min)	t (min)	X = log(Vc)	Y = log(t)	XY	X ²	Y ²
1	195	71,57	2,2900346	1,8547346	4,2474065	5,2442585	3,4400406
2	235	131,95	2,3710678	2,1204229	5,0276667	5,6219628	4,4961935
3	195	72,33	2,2900346	1,8593300	4,2579302	5,2442585	3,4571083
4	235	101,54	2,3710678	2,0066576	4,7579213	5,6219628	4,0266747
SUMA			9,3222049	7,8411453	18,290924	21,732442	15,420017

Tabla 35. Parámetros de las constantes C y k para mecanizado criogénico con 3 racores. Fuente: Autor

$(\Sigma x)^2$	86,903505
$(\Sigma x)^2/n$	21,725876
$\Sigma x \Sigma y$	73,096764
$\Sigma x \Sigma y/n$	18,274191
k	2,548434
\bar{y}	1,960286
\bar{x}	2,330551
log C	1,561339
C	1326,4120

Reemplazando los valores obtenidos para las constantes C & k en la expresión matemática dada por la norma ISO 3685 se obtiene la ecuación de Taylor para mecanizado criogénico con 2 racores, que ayuda a determinar la vida útil de la herramienta de corte.

$$Vc Tc^{\frac{1}{2,354}} = 1928,288$$

De donde podemos despejar Tc, que determina la vida útil de la herramienta de corte.

$$Tc^{\frac{1}{2,354}} = \frac{1928,288}{Vc}$$

$$T_c = \sqrt{\frac{1928,288}{V_c}}^{\frac{1}{2,354}}$$

Del mismo modo se obtiene la ecuación que rige para 3 racores.

$$V_c T_c^{1/2548} = 1326,41$$

De donde podemos despejar T_c , que determina la vida útil de la herramienta de corte.

$$T_c^{\frac{1}{2,548}} = \frac{1326,41}{V_c}$$

$$T_c = \sqrt{\frac{1326,41}{V_c}}^{\frac{1}{2,548}}$$

Los resultados para la vida útil de la herramienta de corte se muestran en la tabla 34 empleando las expresiones matemáticas obtenidas par 2 y 3 racores.

Tabla 36. Parámetros de las constantes C y k para mecanizado criogénico con 3 racores. Fuente: Autor

Velocidad de Corte	2 Racores	3 Racores
	Tiempo de vida útil (min)	Tiempo de vida útil (min)
195	219,899	132,415
205	195,481	116,570
215	174,751	103,246
225	157,017	91,951
235	141,742	82,306
245	128,499	74,013
255	116,952	66,839
265	106,829	60,598
275	97,910	55,139
285	90,015	50,342
295	82,997	46,106
305	76,734	42,351
315	71,123	39,009
325	66,079	36,022
335	61,530	33,345

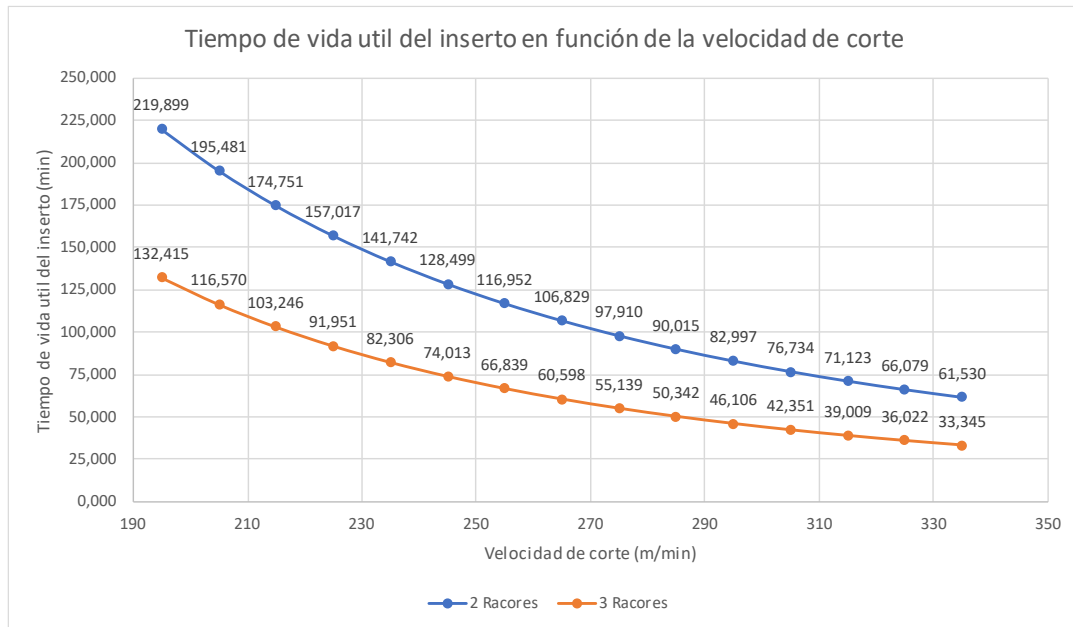


Figura 72. Tiempo de vida útil del inserto en función de la velocidad de corte, se aprecia que los resultados son más favorables para el adaptador de boquilla de 3 racores. Fuente: Autor

Según los resultados obtenidos en los análisis de rugosidad, desgaste de flanco y fluido dinámica computacional, validando los resultados con el equipo construido es concluyente que la combinación más favorable corresponde al adaptador de boquilla de 2 racores y 30 grados de orientación respecto al eje, debido a que el fluido criogénico llega más fácilmente a la zona de corte y enfría la herramienta disminuyendo la temperatura y los esfuerzos por fricción, respecto a los parámetros de corte, principalmente la velocidad de corte, es más recomendable trabajar con el valor menor recomendado por el fabricante correspondiente a 195 m/min.

4.9. Verificación de la hipótesis.

Hipótesis

El cambio de orientación y número de racores en el sistema de lubricación/enfriamiento híbrido MQL+ Nano TiO₂ y CO₂ criogénico, optimizará el proceso de torneado del acero AISI 304

Variable dependiente.

El proceso de Torneado de acero AISI 304

Variable Independiente.

Orientación y número de racores en el sistema de lubricación/enfriamiento híbrido MQL+ Nano TiO₂ y CO₂ criogénico.

Hipótesis nula Ho:

El cambio de orientación y número de racores en el sistema de lubricación/enfriamiento híbrido MQL+ Nano TiO₂ y CO₂ criogénico, no optimizará el proceso de torneado del acero AISI 304

Hipótesis alterna Ha:

El cambio de orientación y número de racores en el sistema de lubricación/enfriamiento híbrido MQL+ Nano TiO₂ y CO₂ criogénico, optimizará el proceso de torneado del acero AISI 304

Modelo matemático:

$$H_o = Ra \text{ 2 racores} = Ra \text{ 3 racores}; H_a = Ra \text{ 2 racores} \neq Ra \text{ 3 racores}$$

Nivel de significancia:

El nivel de confianza seleccionado es del 95%; por lo tanto, el nivel de significancia es del 5% que corresponde a un valor de probabilidad P de 0,05

Grados de libertad.

$$v = n_1 + n_2 - 2$$

$$v = 4 + 4 - 2$$

$$v = 6$$

Para determinar los grados de libertad se tomó en cuenta las muestras de calidad superficial para los experimentos realizados con dos y tres racores a los primeros 5 minutos cuando los insertos se encuentran en buenas condiciones, consecuentemente se obtiene la mejor rugosidad.

Tabla 37. Valores estadísticos de los experimentos para la distribución calculada. Fuente: Autor

N°	2 racores (x)	3 Racores (y)	(x-μx) ²	(x-μy) ²
1	1,152	1,933	0,045177502	0,04010006
2	1,3126	1,284	0,002698802	0,20137656
3	1,4152	1,8044	0,002565423	0,00513372
4	1,5784	1,9096	0,045731822	0,03127592
Media (μ)	1,36455	1,73275	0,09617355	0,2778863

$$S^2 = \frac{\Sigma(x - \mu_x)^2 + \Sigma(y - \mu_y)^2}{v}$$

Donde:

x es un valor del conjunto de datos que corresponden a la rugosidad medida en el proceso de mecanizado con 2 racores

y es un valor del conjunto de datos que corresponde a la rugosidad medida en el proceso de mecanizado con 3 racores.

v son los grados de libertad

S^2 es la varianza

$$S^2 = \frac{0,09617355 + 0,2778863}{6}$$

$$S^2 = 0,0623$$

Distribución t student.

$$t = \frac{\mu_x - \mu_y}{\sqrt{\frac{s^2}{n_1} + \frac{s^2}{n_2}}}$$

$$t = \frac{1,36455 - 1,7328}{\sqrt{\frac{0,0623}{6} + \frac{0,0623}{6}}}$$

$$t \text{ calculado} = 2,555 > t \text{ tabulado}$$

Tabla 38. Distribución t student tabulada. Fuente: [32].

	0.50	0.20	0.10	0.05	0.02	0.01	0.005	0.002
1	1.000	3.078	6.314	12.706	31.821	63.657	127.321	318.309
2	0.816	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925	14.089	22.327
3	0.765	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	7.453	10.215
4	0.741	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	5.598	7.173
5	0.727	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	4.773	5.893
6	0.718	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707	4.317	5.208
7	0.711	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499	4.029	4.785
8	0.706	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355	3.833	4.501
9	0.703	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250	3.690	4.297
10	0.700	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	3.581	4.144
11	0.697	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106	3.497	4.025
12	0.695	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055	3.428	3.930
13	0.694	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012	3.372	3.852
14	0.692	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977	3.326	3.787
15	0.691	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947	3.286	3.733
16	0.690	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921	3.252	3.686
17	0.689	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898	3.222	3.646
18	0.688	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878	3.197	3.610
19	0.688	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861	3.174	3.579
20	0.687	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845	3.153	3.552

Como el t calculado es mayor que el tabulado se acepta la hipótesis alternativa y se rechaza la hipótesis nula, por lo que concluimos que la variación del número de racores incide en la calidad superficial del eje mecanizado de AISI 304 en el proceso de torneado siendo óptimo con 2 racores.

Gracias a los resultados obtenidos de desgaste de flanco y rugosidad superficial, podemos concluir que la configuración más óptima en la cual se obtienen resultados más favorables, es el experimento cuyos parámetros se muestran en la tabla 35.

Tabla 39. Parámetros del experimento 3, la configuración más óptima de condiciones de corte y características del adaptador de boquilla. Fuente: Autor

Parámetro	Valor.
Velocidad de corte	195 m/min
Cantidad de racores	2
Ángulo de incidencia	30°

Para seleccionar esta propuesta de optimización del sistema de fluido de corte criogénico analizamos los resultados obtenidos en el capítulo 3 los cuales fueron validados in situ con el equipo Cryo MQL construido.

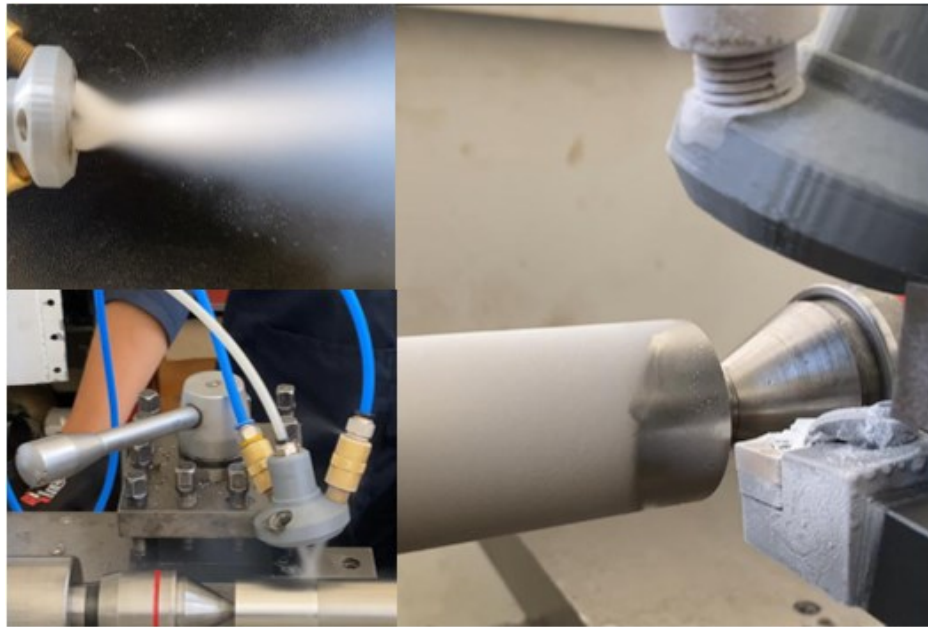


Figura 73. Propuesta de adaptador de boquilla para la optimización del sistema Cryo MQL el modelo propuesto consta de 2 racores orientados a 30° del eje del adaptador, se evidencia el haz de fluido criogénico y el enfriamiento en la herramienta de corte. Fuente: Autor

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

5.1. Conclusiones.

- La vida útil de la herramienta tiende a disminuir conforme se incrementa la velocidad de corte, en la evaluación del desgaste de flanco del inserto se evidenció que en los experimentos en los cuales la velocidad de corte fue mayor, existió un desgaste más temprano en la herramienta, mientras que, en la velocidad de corte menor, el desgaste no se dio de una manera tan prematura.
- La calidad superficial medida empeora conforme se desgasta la herramienta, esto lo pudimos notar gracias a las mediciones de rugosidad realizadas a los 5, 20, 40 y 60 minutos, esto se debe a que la geometría del radio de punta del inserto y el filo no es la misma que al principio, por ende, la rugosidad se ve afectada.
- Los experimentos donde se emplearon 2 racores, con una orientación de 30 grados presentan resultados más favorables tanto en el análisis CFD como en los de calidad superficial y vida útil de la herramienta, debido a varios factores relacionados con la hidráulica del sistema, y su geometría que hace que en esta configuración el fluido de corte alcance adecuadamente la herramienta.
- Mediante el análisis CFD se determinaron temperaturas presiones y demás parámetros, que fueron validados con la experimentación in situ, que arrojó valores similares en la forma del haz de fluido criogénico como en la temperatura, validando los diseños planteados, lo que ayudó a tomar una decisión más acertada para la propuesta de optimización.
- La vida útil de la herramienta de corte se prolonga más en el experimento que hace uso de 2 racores con el ángulo de incidencia menor, dado que el fluido de corte alcanza perfectamente la zona de interacción de la herramienta con la

pieza de trabajo, por lo que el criterio de desgaste se alcanzaría a los 140 minutos de mecanizado.

- La temperatura medida de la configuración más favorable de racores y ángulo de inclinación correspondiente a 2 racores y 30 grados, fue de -62°C que es a la que se enfría la herramienta de corte, la temperatura fue registrada mediante una termocupla calibrada en el punto de convergencia del haz de fluido criogénico.
- En las simulaciones CFD el valor mínimo de la Temperatura a la que el modelo propuesto enfría la herramienta de corte da como resultado entre 171 y 226 K (-74.65°C) es un valor superior al medido en el sistema construido, esto se debe a que el software de elementos finitos considera condiciones ideales sin tomar en cuenta las condiciones ambientales ni las pérdidas que se presentan en las cañerías y conductos del sistema de distribución de CO_2 criogénico.
- La presión que se obtuvo en la simulación CFD se concentra en las salidas de los racores, y se observa que va disminuyendo conforme se dirige a la zona de contacto de la herramienta de corte con la herramienta de trabajo, la presión justo a la salida en la reducción de sección tiene un valor aproximado de 1.2MPa.
- La vida útil de la herramienta de corte tiene un valor de 218,9 minutos cuando se mecaniza a una velocidad de corte de 195 m/min en la configuración de 2 racores, mientras que en la configuración de 3 racores la vida útil corresponde a 132,42 minutos lo que demuestra que el sistema de refrigeración criogénico propuesto optimiza el proceso de torneado incrementando la vida útil de la herramienta de corte.
- La calidad superficial promedio obtenida en los experimentos con 2 racores corresponde a $1,36455\ \mu\text{m}$ mientras que para los experimentos con 3 racores se registra un valor de $1,73275\ \mu\text{m}$ esto se debe a que la geometría de la herramienta se mantiene gracias a la optimización por la refrigeración criogénica con 2 racores.

- En la verificación de la hipótesis el t calculado es superior al tabulado por lo que se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa demostrando que la variación de parámetros en el adaptador de boquilla como el ángulo de salida y el número de racores influye en el desempeño del proceso de torneado del acero AISI 304.

5.2. Recomendaciones.

- Verificar la calibración de los equipos utilizados en la evaluación del desgaste de flanco de la herramienta de corte y en la calidad superficial de la pieza de trabajo como son el microscopio electrónico de barrido y el rugosímetro Mitutoyo SJ-210.
- Limpiar adecuadamente los insertos y la pieza de trabajo antes de realizar las mediciones correspondientes, para obtener valores exactos sin la influencia de impurezas que puedan comprometer la exactitud de las mediciones obteniendo resultados confiables.
- Verificar la sujeción y el centrado de la pieza de trabajo antes de realizar los experimentos, utilizar el contrapunto para garantizar que el eje quede perfectamente centrado y no existan desbalances que afecten la vida útil de la herramienta de corte tempranamente.
- Identificar mediante etiquetas y un registro adecuado las caras de los insertos, donde se encuentra el filo que corresponde a la zona descrita en la norma ISO 3685, para no confundirse en las mediciones del desgaste y registrar los datos que corresponde a cada experimento.
- Utilizar CO_2 gaseoso para presurizar el sistema antes de dosificar el CO_2 líquido, esto ayuda a que no se genere hielo seco a la salida de los racores debido a que el CO_2 gaseoso barre cualquier residuo que se forme en el sistema.
- Utilizar los equipos de protección personal en la ejecución de los ensayos como guantes, gafas y mandil lo que mitiga los riesgos inherentes de trabajar en una máquina herramienta, reduciendo el riesgo de sufrir cortes, golpes o daños en los ojos por la proyección de partículas como la viruta.

Bibliografía.

- [1]. O. Pereira *et al.*, “The Use of Hybrid CO₂+MQL in Machining Operations,” *Procedia Eng.*, vol. 132, pp. 492–499, 2015.
- [2]. M. Lastres and A. Cordovés, “Distribución y corte de piezas irregulares con anidamiento bidimensional en la industria minera,” *Minería y Geol.*, vol. 26, no. 3, pp. 48–67, 2010.
- [3]. K. Yusimit and M. Arlys, “Predicción del desgaste del flanco de la herramienta de corte durante el torneado en seco de alta velocidad para piezas de acero AISI 316L en la industria minera,” *Minería y Geol.*, vol. 31, no. 2, pp. 113–128, 2015.
- [4]. O. Pereira, A. Rodríguez, J. Barreiro, A. I. Fernández-Abia, and L. N. L. de Lacalle, “Nozzle design for combined use of MQL and cryogenic gas in machining,” *Int. J. Precis. Eng. Manuf. - Green Technol.*, vol. 4, no. 1, pp. 87–95, 2017.
- [5]. A. Nandakumar, T. Rajmohan, and S. Vijayabhaskar, “Experimental Evaluation of the Lubrication Performance in MQL Grinding of Nano SiC Reinforced Al Matrix Composites,” *Silicon*, vol. 11, no. 6, pp. 2987–2999, 2019.
- [6]. C. Morales and D. Núñez, “Efecto del nanolubricante (aceite lubricante+TiO₂) en el acabado superficial del torneado del acero inoxidable AISI 304,” *Univ. Técnica Ambato*, vol. 5, no. 1, pp. 1–8, 2017.
- [7]. L. Márquez and P. Valle, “Estudio del efecto del sistema de mínima cantidad de lubricante (MQL) con aceite vegetal en la vida de las herramientas de corte de metal duro en el proceso de torneado del acero inoxidable AISI 304,” 2016.
- [8]. S. Isakson, M. I. Sadik, A. Malakizadi, and P. Krajnik, “Effect of cryogenic cooling and tool wear on surface integrity of turned Ti-6Al-4V,” *Procedia CIRP*, vol. 71, pp. 254–259, 2018.
- [9]. A. Shokrani, V. Dhokia, P. Muñoz-Escalona, and S. T. Newman, “State-of-the-art cryogenic machining and processing,” *Int. J. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 26, no. 7, pp. 616–648, 2016.
- [10]. C. Tahri, P. Lequien, J. C. Outeiro, and G. Poulachon, “CFD Simulation and

- Optimize of LN2 Flow Inside Channels Used for Cryogenic Machining: Application to Milling of Titanium Alloy Ti-6Al-4V,” *Procedia CIRP*, vol. 58, pp. 584–589, 2017.
- [11]. E. Tahmasebi, P. Albertelli, T. Lucchini, M. Monno, and V. Mussi, “CFD and experimental analysis of the coolant flow in cryogenic milling,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 140, no. October 2018, pp. 20–33, 2019.
- [12]. C. Salame, R. Bejjani, and P. Marimuthu, “A better understanding of cryogenic machining using CFD and FEM simulation,” *Procedia CIRP*, vol. 81, pp. 1071–1076, 2019.
- [13]. B. Shi, A. Elsayed, A. Damir, H. Attia, and R. M’Saoubi, “A Hybrid Modeling Approach for Characterization and Simulation of Cryogenic Machining of Ti-6Al-4V Alloy,” *J. Manuf. Sci. Eng. Trans. ASME*, vol. 141, no. 2, pp. 1–8, 2019.
- [14]. A. Damir, B. Shi, and M. H. Attia, “Flow characteristics of optimized hybrid cryogenic-minimum quantity lubrication cooling in machining of aerospace materials,” *CIRP Ann.*, vol. 68, no. 1, pp. 77–80, 2019.
- [15]. Y. Wang, M. Dai, K. Liu, J. Liu, L. Han, and H. Liu, “Research on surface heat transfer mechanism of liquid nitrogen jet cooling in cryogenic machining,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 179, p. 115607, 2020.
- [16]. N. Khanna and C. Agrawal, “Titanium Machining Using Indigenously Developed Sustainable Cryogenic Machining Facility,” pp. 183–205, 2020.
- [17]. N. Tapoglou, M. I. A. Lopez, I. Cook, and C. M. Taylor, “Investigation of the Influence of CO₂ Cryogenic Coolant Application on Tool Wear,” *Procedia CIRP*, vol. 63, pp. 745–749, 2017.
- [18]. A. M. Khan, M. Jamil, M. Mia, N. He, W. Zhao, and L. Gong, “Sustainability-based performance evaluation of hybrid nanofluid assisted machining: Sustainability assessment of hybrid nanofluid assisted machining,” *J. Clean. Prod.*, vol. 257, p. 120541, 2020.
- [19]. A. K. Sharma, A. K. Tiwari, R. K. Singh, and A. R. Dixit, “Tribological Investigation of TiO₂ Nanoparticle based Cutting Fluid in Machining under Minimum Quantity Lubrication (MQL),” *Mater. Today Proc.*, vol. 3, no. 6, pp. 2155–2162, 2016.
- [20]. N. K. Sahu, A. B. Andhare, and R. A. Raju, “Evaluation of performance of

- nanofluid using multiwalled carbon nanotubes for machining of Ti–6Al–4V,” *Mach. Sci. Technol.*, vol. 22, no. 3, pp. 476–492, 2018.
- [21]. A. K. Sharma, A. K. Tiwari, and A. R. Dixit, “Effects of Minimum Quantity Lubrication (MQL) in machining processes using conventional and nanofluid based cutting fluids: A comprehensive review,” *J. Clean. Prod.*, vol. 127, pp. 1–18, 2016.
- [22]. R. Manivannan and M. Pradeep Kumar, “Improving the machining performance characteristics of the μ EDM drilling process by the online cryogenic cooling approach,” *Mater. Manuf. Process.*, vol. 33, no. 4, pp. 390–396, 2018.
- [23]. A. Shokrani, I. Al-Samarrai, and S. T. Newman, “Hybrid cryogenic MQL for improving tool life in machining of Ti-6Al-4V titanium alloy,” *J. Manuf. Process.*, vol. 43, no. September 2018, pp. 229–243, 2019.
- [24]. M. Jamil *et al.*, “Sustainable milling of Ti–6Al–4V: A trade-off between energy efficiency, carbon emissions and machining characteristics under MQL and cryogenic environment,” *J. Clean. Prod.*, vol. 281, p. 125374, 2021.
- [25]. A. Bordin, S. Bruschi, A. Ghiotti, and P. F. Bariani, “Analysis of tool wear in cryogenic machining of additive manufactured Ti6Al4V alloy,” *Wear*, vol. 328–329, pp. 89–99, 2015.
- [26]. Ç. V. Yildirim, T. Kivak, M. Sarikaya, and Ş. Şirin, “Evaluation of tool wear, surface roughness/topography and chip morphology when machining of Ni-based alloy 625 under MQL, cryogenic cooling and CryoMQL,” *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 9, no. 2, pp. 2079–2092, 2020.
- [27]. Y. Kaynak and A. Gharibi, “Progressive Tool Wear in Cryogenic Machining: The Effect of Liquid Nitrogen and Carbon Dioxide,” *J. Manuf. Mater. Process.*, vol. 2, no. 2, p. 31, 2018.
- [28]. S. Coromant, “Алгоритмизация выбора инструментов фирм Sandvik Coromant и Walter,” *Вестник Приазовского Государственного Технического Университета. Серия: Технические Науки*, vol. 2, no. 30, pp. 18–19, 2015.
- [29]. I. Lerma, M. Jimenez, I. Edinbarough, J. Krell, and N. P. Hung, “Characterization of Micromist for Effective Minimum Quantity Lubrication,”

Adv. Mater. Res., vol. 1115, pp. 43–46, 2015.

- [30]. H. Shi, R. Magaye, V. Castranova, and J. Zhao, “Titanium dioxide nanoparticles: a review of current toxicological data,” 2017.
- [31]. O. M. P. Neto, “Disminución Del Impacto Medioambiental De Procesos De Mecanizado Mediante Combinación De Micropulverización Mql Y Refrigeración Criogénica,” 2017.
- [32]. A. Shah, A. G. Wilson, and Z. Ghahramani, “Student-t processes as alternatives to Gaussian processes,” *J. Mach. Learn. Res.*, vol. 33, pp. 877–885, 2014.

ANEXOS.

Anexo 1: Adaptador de boquilla propuesto para el sistema de refrigeración criogénica para optimizar el torneado del acero AISI 304.

