

EVALUACIÓN DEL DESGASTE EN INSERTOS PARA TORNEADO
MODIFICADOS SUPERFICIALMENTE CON TITANIO Y NITRÓGENO USANDO
LA METODOLOGÍA ANOVA

JHON ALEXANDER MUÑOZ DIAZ

WILMER PALOMINO MARMOL

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECAÑICAS
ESCUELA DE INGENIERIA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2017

EVALUACIÓN DEL DESGASTE EN INSERTOS PARA TORNEADO
MODIFICADOS SUPERFICIALMENTE CON TITANIO Y NITRÓGENO USANDO
LA METODOLOGÍA ANOVA

JHON ALEXANDER MUÑOZ DIAZ

WILMER PALOMINO MARMOL

Trabajo de Grado para optar por el título de Ingenieros Mecánicos

Director

ISNARDO GONZÁLEZ JAIMES

Ingeniero Mecánico

Codirector

ELY DANNIER V. NIÑO

Magister en Física

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECAÑICAS
ESCUELA DE INGENIERIA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2017

A Dios, quien siempre me acompaña en mi camino y cada momento de mi vida, de la mano de Él todo es posible.

A mis padres Ofelia Díaz y Josué Muñoz, quienes por su esfuerzo y apoyo incondicional hacen posible el cumplimiento de esta meta, con sacrificio me enseñan la importancia de la educación en el crecimiento profesional y personal del ser.

A mis tías Martha y Esperanza por su apoyo incondicional en cada etapa de mi vida.

A mi compañera de vida Yennifer por su comprensión y apoyo sentimental, moral y espiritual en cada momento de esta etapa de mi vida.

A mis amigos, familiares, profesores y a todos los que hicieron posible el cumplimiento de este objetivo, agradezco a Dios por haberlos colocado en mi camino.

Jhon Alexander Muñoz Díaz

Dedico este trabajo de grado a Dios, quien hace que todas las cosas sean posibles, permitiéndome contar con personas que me motivaron y me ayudaron a culminar mi formación de ingeniero mecánico.

A mi madre Sotera Marmol, por ser mi persona favorita, quien con amor y cariño me brindó la oportunidad de alcanzar esta meta.

A mis hermanos menores, Brayán y Sofía que junto a mi padre Alfonso, con alegría y entusiasmo motivan mi ser.

A Yesica Rosero y Tatiana Villareal, por su cariño y amistad.

Wilmer Palomino Marmol

AGRADECIMIENTOS

Jhon Alexander Muñoz Diaz y Wilmer Palomino Marmol como autores del presente trabajo de grado expresan los más sinceros agradecimientos a las siguientes personas:

Al ingeniero Isnardo González Jaimes, quien nos brindó su conocimiento y experiencia para el desarrollo del presente trabajo de grado y en el transcurso de nuestra formación profesional.

A Ely Dannier V. Niño, por su apoyo incondicional y dedicación al fomento de la ciencia y la investigación para el desarrollo y consecución de los recursos necesarios en el presente trabajo de grado.

A la empresa Nano4energy ubicada en el Instituto de Fusión Nuclear de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales (ETSII) de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) y su personal, por su apoyo y servicio durante la fase de modificación superficial.

Al Laboratorio de Microscopía de la Universidad Industrial de Santander, Parque Tecnológico Guatiguará y su personal, por el servicio de microscopía suministrada para la adquisición de datos.

Al Laboratorio de Espectroscopía de la Universidad Industrial de Santander, Parque Tecnológico Guatiguará y su personal, por su apoyo en el servicio de espectroscopía suministrada para la adquisición de datos y resultados.

Al ambiente de máquinas herramientas con control numérico por computador, del centro Industrial de Mantenimiento Integral, SENA y su personal, por el préstamo de instalaciones y apoyo de personal para la adquisición de datos.

Al Laboratorio de rayos X de la Universidad Industrial de Santander, Parque Tecnológico Guatiguará y su personal, por el servicio de Difracción de rayos X suministrada para la adquisición de datos.

A los docentes de la Escuela de Ingeniería Mecánica por su labor diaria de orientación profesional.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	24
1. ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE Y OBJETIVOS	25
1.1 ESTADO DEL ARTE	25
1.2 OBJETIVOS	31
1.2.1 Objetivo general	31
1.2.2 Objetivos específicos	31
2. TECNOLOGÍA DE LOS PROCESOS DE MECANIZADO	33
2.1 MANUFACTURA Y PROCESO DE TORNEADO	33
2.1.1 Movimientos de corte en el proceso de torneado.	34
2.1.2 Parámetros de corte en el proceso de torneado.	35
2.1.3 Análisis del proceso de torneado.	36
2.1.3.1 Ángulos de Corte.	37
2.1.3.2 Fuerzas de corte.	38
2.2 ACABADO SUPERFICIAL Y RUGOSIDAD DEL MATERIAL	40
2.2.1 Velocidad de corte.	42
2.2.2 Avance.	42
2.2.3 Profundidad de corte.	42
2.2.4 Geometría de la herramienta de corte.	43
2.3 TRIBOLOGÍA Y DESGASTE DE LA HERRAMIENTA	44
2.3.1 Desgaste de flanco.	44
2.3.2 Desgaste de cráter.	45
2.3.3 Desgaste por adhesión.	45
2.4 TECNOLOGÍA DE LAS HERRAMIENTAS	45
2.4.1 Nitruro de titanio (TiN).	45
2.4.2 Carburo de tungsteno.	46

2.4.3	Alúmina (Al ₂ O ₃).	47
2.4.4	Carburo de Titanio (TiC).	47
2.5	TÉCNICAS DE MODIFICACIÓN SUPERFICIAL	48
2.5.1	Deposición Química de Vapor (Chemical Vapor Deposition-CVD).	49
2.5.2	Deposición Física de Vapor (Physical Vapor Deposition-PVD).	50
2.5.3	High-Power Impulse Magnetron Sputtering (HIPIMS).	51
3.	HERRAMIENTAS DE CORTE Y EQUIPOS UTILIZADOS EN EL EXPERIMENTO	53
3.1	SELECCIÓN DE LA HERRAMIENTA DE CORTE	53
3.1.1	Selección de la calidad de la herramienta de corte.	53
3.1.2	Selección del rompe-viruta de la herramienta.	55
3.1.3	Selección de la geometría de la herramienta de corte.	56
3.2	SELECCIÓN DEL PORTA-HERRAMIENTAS	57
3.3	EQUIPO DE TRATAMIENTO SUPERFICIAL	58
3.3.1	Generalidades.	58
3.3.2	Especificaciones y componentes.	59
3.4	TORNO CNC	61
3.4.1	Generalidades.	61
3.4.2	Especificaciones técnicas.	61
4.	EVALUACIÓN DEL DESGASTE DE LOS INSERTOS	63
4.1	MODIFICACIÓN SUPERFICIAL DE LOS INSERTOS POR HIPIMS	63
4.2	SELECCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE CORTE	65
4.2.1	Selección de parámetros de corte fijos de mecanizado.	65
4.2.2	Selección de las velocidades de corte.	65
4.3	GEOMETRÍA Y PROPIEDADES DE LAS PROBETAS A MECANIZAR	66
4.3.1.	Selección de propiedades y material a mecanizar.	66
4.3.2.	Alistamiento y geometría de las probetas.	67
4.4	ALISTAMIENTO DE EXPERIMENTO Y CONDICIONES DE CORTE	68

4.5	CRITERIO Y MEDICIÓN DEL DESGASTE Y VIDA DE LA HERRAMIENTA	70
4.6	ADQUISICIÓN DE RESULTADOS	72
5.	CARACTERIZACIÓN SUPERFICIAL	80
5.1	INSPECCIÓN VISUAL	80
5.2	MICROSCOPIA MEB Y ESPECTROSCOPIA EDX	81
6.	ANÁLISIS EXPERIMENTALES Y ESTADÍSTICOS PARA LA MEDICIÓN DE LOS INSERTOS	91
6.1	ADQUISICIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES	91
6.2	APLICACIÓN DE TAYLOR PARA LA VIDA ÚTIL DE LOS INSERTOS	92
6.2.1	Análisis de los datos experimentales.	92
6.2.1.	Cálculo de la ecuación de Taylor.	93
6.2.1.1	Ecuación de Taylor del inserto sin recubrimiento.	94
6.2.1.2	Ecuación de Taylor del inserto con recubrimiento de nitruro de titanio en atmosfera abundante de titanio.	96
6.2.1.3	Ecuación de Taylor del inserto con recubrimiento de nitruro de titanio en atmosfera abundante de nitrógeno.	98
6.3	ANÁLISIS DE VARIANZA ANOVA	101
6.3.1	Planteamiento del problema.	101
6.3.2	Desgaste de los insertos en función del material removido.	102
6.3.3	Planteamiento de hipótesis.	102
6.3.4	Análisis varianza factorial de dos factores.	103
6.3.5	Hipótesis ganadora.	109
6.3.6	Verificación de la adecuación del modelo.	112
6.4	COMPARACIONES MÚLTIPLES O ANÁLISIS DE TUKEY	114
6.5	AJUSTE DE MODELO DE REGRESIÓN EXPERIMENTAL	118
6.6	AJUSTE DE CURVA Y SUPERFICIE DE RESPUESTA DEL EXPERIMENTO	122

7. CONCLUSIONES	126
8. RECOMENDACIONES	130
BIBLIOGRAFÍA	131
ANEXOS	CD-ROM

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Variables en el proceso de mecanizado.	33
Figura 2. Ángulos principales en el torneado.	38
Figura 3. Diagrama de fuerzas en el proceso de torneado.	40
Figura 4. Influencia de los parámetros de corte en la rugosidad.	43
Figura 5. Influencia de la geometría de la herramienta en la rugosidad.	43
Figura 6. Principales desgastes en insertos de torneado.	45
Figura 7. Grados o calidades de insertos para torneado.	54
Figura 8. Calidades de metal duro Mitsubishi	54
Figura 9. Propiedades de las calidades de metal duro Mitsubishi.	55
Figura 10. Viruta de materiales. (a) Bronce, (b) aluminio, (c) acero y (d) fundición gris.	55
Figura 11. Herramientas cuadradas positivas	57
Figura 12. Selección del porta-insertos Sandvik.	58
Figura 13. Esquema básico del sistema de magnetrón sputtering.	59
Figura 14. Componentes del sistema HIPIMS. Cámara de vacío (a), bomba rotatoria (b), bomba turbo-molecular (c).	59

Figura 15. Componentes del sistema HIPIMS. Magnetrones rectangulares (a), fuente HIPIMS (b) y control de presión y temperatura (c).	60
Figura 16. Torno CNC Emco Turn 342.	61
Figura 17. Torno CNC Emco Turn 342 componentes y panel de control.	62
Figura 18. Insertos dentro de cámara (a) y recubiertos con TiN, retirados del porta sustratos (b).	64
Figura 19. Insertos recubiertos con TiN por HIPIMS. (a) En atmosfera abundante de N y (b) en atmosfera abundante de Ti.	64
Figura 20. Estandarización de las probetas a maquinar.	68
Figura 21. Probetas en fundición gris de tipo FC300.	68
Figura 22. Mecanizado sin lubricante de las probetas en fundición gris.	69
Figura 23. Panel de control del torno CNC.	71
Figura 24. Factor de potencia en el panel CNC y cambio de calidad superficial.	71
Figura 25. Incremento de corriente del husillo según desgaste de herramienta.	72
Figura 26. Insertos no modificados y modificados superficialmente. (a) Inserto de referencia (sin tratamiento superficial), (b) inserto recubierto con TiN en atmosfera abundante de N y (c) inserto recubierto con TiN en atmosfera abundante de Ti.	80
Figura 27. Microscopio electrónico de barrido QUANTA FEG 650, equipo en general (a), cámara de vacío (b) y montaje dentro de la cámara (c).	81
Figura 28. Micrografías en la punta de un inserto sin recubrir. Superficie sin desgastar (a), (c) y (e), y desgastada (b), (d) y (f). A una magnificación de 200X (a) y (b), de 1000X (c) y (d), y 8000X (e) y (f).	82

- Figura 29. Espectro de composición elemental en la superficie del inserto de metal duro sin recubrimiento y sin desgastar. 83
- Figura 30. Micrografías en la punta de un inserto recubierto con TiN en atmosfera abundante de Ti. Superficie sin desgastar (a), (c) y (e), y desgastada (b), (d) y (f). A una magnificación de 200X (a) y (b), de 1000X (c) y (d), y 8000X (e) y (f). 85
- Figura 31. Espectro de composición elemental en la superficie del inserto de metal duro recubierto con nitruro de titanio en atmosfera abundante de Ti y sin desgastar. 86
- Figura 32. Micrografías en la punta de un inserto recubierto con TiN en atmosfera abundante de N. Superficie sin desgastar (a), (c) y (e), y desgastada (b), (d) y (f). A una magnificación de 200X (a) y (b), de 1000X (c) y (d), y 8000X (e) y (f). 87
- Figura 33. Espectro de composición elemental en la superficie del inserto de metal duro recubierto con nitruro de titanio en atmosfera abundante de N y sin desgastar. 88
- Figura 34. Espectro de composición elemental en la superficie desgastada de un inserto de metal duro sin recubrimiento 88
- Figura 35. Espectro de composición elemental en la superficie desgastada de un inserto de metal duro recubierto con nitruro de titanio en atmosfera abundante de titanio. 89
- Figura 36. Espectro de composición elemental en la superficie desgastada de un inserto de metal duro recubierto con nitruro de titanio en atmosfera abundante de nitrógeno. 90
- Figura 37. Comportamiento de la ecuación de Taylor del inserto sin recubrimiento. 95

Figura 38. Comportamiento de la ecuación de Taylor del inserto recubierto con TiN en abundante Ti.	98
Figura 39. Comportamiento de la ecuación de Taylor del inserto recubierto con TiN en abundante N.	100
Figura 40 Grafica de volumen removido a velocidad de 115 <i>mm</i> in.	110
Figura 41. Grafica de volumen removido a velocidad de 130 <i>mm</i> in.	110
Figura 42. Grafica de volumen removido a velocidad de 145 <i>mm</i> in.	111
Figura 43. Grafica de volumen removido a velocidad de 160 <i>mm</i> in.	111
Figura 44. Probabilidad normal del experimento.	112
Figura 45. Prueba de igualdad de varianzas Bartlett.	113
Figura 46. Gráfica de interacción de respuesta.	114
Figura 47. Análisis de Tukey de las calidades superficiales de los insertos.	115
Figura 48. Análisis de Tukey de las velocidades de corte.	115
Figura 49. Resultados análisis Tukey de la calidad superficial obtenidos en el software minitab.	116
Figura 50. Resultados análisis Tukey de la velocidad de corte obtenidos en el software minitab.	117
Figura 51. Resultados del análisis Tukey de la interacción de factores obtenidos en el software minitab.	118
Figura 52. Comportamiento del modelo de regresión experimental.	121
Figura 53. Superficie de respuesta cuadrática completa en el software minitab.	122

Figura 54. Superficie de respuesta ajustada en el software minitab.	123
Figura 55. Coeficientes de regresión estimados en el software minitab.	123
Figura 56. Comportamiento de la superficie de respuesta experimental.	124

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Parámetros a usar en el experimento factorial.	32
Tabla 2. Propiedades del nitruro de titanio.	46
Tabla 3. Propiedades del carburo de tungsteno.	46
Tabla 4. Propiedades de la alúmina.	47
Tabla 5. Propiedades carburo de titanio.	48
Tabla 6. Referencia de geometría de la herramienta según ISO 1832.	56
Tabla 7. Especificaciones técnicas Emco turn 342.	62
Tabla 8. Composición química de la fundición gris de tipo FC300 certificada por el fabricante.	67
Tabla 9. Propiedades mecánicas de la fundición gris de tipo FC300 certificada por fabricante.	67
Tabla 10. Parámetros de corte para pruebas de mecanizado.	69
Tabla 11. Resultados obtenidos del mecanizado realizado con el inserto sin recubrimiento, número 1.	73
Tabla 12. Resultados obtenidos del mecanizado realizado con el inserto sin recubrimiento, número 2.	74
Tabla 13. Resultados obtenidos del mecanizado realizado con el inserto recubierto con TiN en abundante atmosfera de Ti, número 1.	75

Tabla 14. Resultados obtenidos del mecanizado realizado con el inserto recubierto con TiN en abundante atmosfera de Ti, número 2.	76
Tabla 15. Resultados obtenidos del mecanizado realizado con el inserto recubierto con TiN en abundante atmosfera de Ti, repetición de pruebas.	77
Tabla 16. Resultados obtenidos del mecanizado realizado con el inserto recubierto con TiN en abundante atmosfera de N, número 1.	78
Tabla 17. Resultados obtenidos del mecanizado realizado con el inserto recubierto con TiN en abundante atmosfera de N, número 2.	79
Tabla 18. Datos experimentales y cálculo de material removido.	91
Tabla 19. Valores de rata de remoción de material en función de las velocidades de corte.	93
Tabla 20. Vida útil en de los insertos en función de la velocidad de corte.	93
Tabla 21. Análisis de mínimos cuadrados de los resultados experimentales obtenidos con el inserto sin recubrimiento.	94
Tabla 22. Análisis de mínimos cuadrados de los resultados experimentales obtenidos con el inserto recubierto con TiN en abundante Ti.	96
Tabla 23. Análisis de mínimos cuadrados de los resultados experimentales obtenidos con el inserto recubierto con TiN en abundante N.	99
Tabla 24. Descripción de calidades superficiales de los insertos.	101
Tabla 25. Descripción de las velocidades de corte establecidas en el experimento.	102
Tabla 26. Experimentos de medición de desgaste en función del material removido.	102

Tabla 27. Arreglo general de un diseño factorial de dos factores.	104
Tabla 28. Grados de libertad, experimento factorial.	106
Tabla 29. Modelo factorial ANOVA para dos factores.	107
Tabla 30. Datos de vida de la herramienta en volumen de material removido.	108
Tabla 31. ANOVA, experimento factorial.	108
Tabla 32. Selección de F_t para nivel de significancia de 0.05.	109
Tabla 33. Valores de F_0 y F_t para análisis de varianza.	109
Tabla 34. Datos experimentales del modelo de regresión y matriz X y Y .	119
Tabla 35. Predicciones, residuos y error de regresión.	121
Tabla 36. Predicciones, residuos y errores de superficie de respuesta.	125

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. HERRAMIENTAS EN CAD.	CD-ROM
Anexo B. SELECCIÓN DE PARÁMETROS DE CORTE PARA EL INSERTO SPMN 120408.	CD-ROM
Anexo C. PROPIEDADES DE FUNDICIÓN FC300 DEL FABRICANTE.	CD-ROM
Anexo D. FRAGMENTO DE NORMA ISO 3685.	CD-ROM
Anexo E. PROGRAMACIÓN DEL TORNO CNC.	CD-ROM
Anexo F. TABLA ANOVA PARA $\alpha:0,05$.	CD-ROM
Anexo G. ADQUISICIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES	CD-ROM
Anexo H. TRATAMIENTO DE DATOS ANOVA Y TAYLOR	CD-ROM
Anexo I. TRATAMIENTO DE DATOS SOFTWARE MINITAB	CD-ROM

RESUMEN

TÍTULO: EVALUACIÓN DEL DESGASTE EN INSERTOS PARA TORNEADO MODIFICADOS SUPERFICIALMENTE CON TITANIO Y NITRÓGENO USANDO LA METODOLOGÍA ANOVA *

AUTOR: Jhon Alexander Muñoz Díaz
Wilmer Palomino Marmol **

PALABRAS CLAVES: Insertos de torneado, metal duro, desgaste, modificación superficial, HIPIMS, ANOVA.

DESCRIPCIÓN:

Se evaluó la influencia de la modificación superficial de las herramientas de corte generada por Magnetron Sputtering por Impulsos de Alta Potencia (HIPIMS) en insertos intercambiables de metal duro para torneado. El presente proyecto de investigación consistió en modificar superficialmente y evaluar la vida útil en servicio de insertos de torneado de referencia SPMN 120408 sin modificación superficial y con dos tratamientos superficiales a diferentes concentraciones en atmosfera con iones de titanio (Ti) y nitrógeno (N).

La evaluación al desgaste de los insertos se realizó mediante un proceso de mecanizado en seco de fundición gris de tipo FC300 a diferentes velocidades de corte. Los resultados fueron analizados estadísticamente utilizando la herramienta ANOVA en función del material removido durante su vida efectiva. Adicionalmente, las superficies de los insertos se analizaron mediante microscopía electrónica de barrido (MEB) y espectroscopia de energía dispersa (EDX).

Los resultados obtenidos en el proceso de mecanizado y análisis de varianza indican un incremento en la vida útil en servicio de los insertos recubiertos por HIPIMS con de nitruro de titanio en atmosferas con mayor concentración de nitrógeno, en consecuencia, mediante la ecuación de Taylor se comprueba la influencia de la velocidad de corte en la vida media de las herramientas de torneado, donde se registra un decremento logarítmico de la vida media útil en servicio de la herramienta al aumentar su velocidad de corte.

* Proyecto de Grado.

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Isnardo González Jaimes (Director). Ely Dannier V. Niño (Codirector).

ABSTRACT

TITLE: EVALUATION OF WEAR ON SUPERFICIALLY MODIFIED TURN INSERTS WITH TITANIUM AND NITROGEN USING THE ANOVA METHODOLOGY *

AUTHOR: Jhon Alexander Muñoz Díaz
Wilmer Palomino Marmol **

KEYWORDS: Turning inserts, carbide, wear, surface modification, HIPIMS, ANOVA.

DESCRIPTION:

The influence of the surface modification of cutting tools generated by High Power Impulses Magnetron Sputtering (HIPIMS) on interchangeable carbide inserts for turning was evaluated. The present research project consisted in modifying superficially and evaluating the useful life of reference turning inserts SPMN 120408 without any surface modification and with two surface treatments at different atmospheric concentrations with titanium (Ti) and nitrogen ions (N).

The study of the carbides was made by a dry machining process of FC300 gray cast iron at different cutting speeds. The results were analyzed statistically by an ANOVA tool as a function of the removed material during its useful life. Additionally the surfaces of the carbides were analyzed by scanning electron microscopy (SEM) and scattered energy spectroscopy (EDS).

The results obtained in the machining process and in the variance analysis indicated an increase in the useful life of the inserts, which were coated with HIPIMS and titanium nitride in atmospheres with higher nitrogen concentration. Consequently, the Taylor equation checked the influence of the cutting speed on the average life of turning tools, where a logarithmic decrease of the useful life is recorded and related with the service of the tool by increasing its cutting speed.

* Degree Project.

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering. Mechanical Engineering School. Isnardo González Jaimes (Director). Ely Dannier V. Niño (Co-director).

INTRODUCCIÓN

En la actualidad existen estudios científicos o desarrollos tecnológicos encaminados hacia el mejoramiento de las propiedades superficiales de los materiales por medio de recubrimientos, tal es el caso de los materiales empleados en la fabricación de las herramientas de corte, que buscan mejorar las propiedades mecánicas y térmicas, aumentando la vida útil en servicio e incrementar la productividad en el sector metalmecánico.

El torneado por arranque de viruta es el proceso más utilizadas actualmente en la industria de manufactura, por tal motivo, surge la necesidad de encontrar nuevos materiales o mejorar las tecnologías existentes con el fin de aumentar sus propiedades mecánicas y tribológicas. De acuerdo a lo anterior, se ha generado una investigación en búsqueda de nuevas tecnologías de modificación superficial que permita fortalecer los fundamentos científicos y garantice un aumento de la resistencia al desgaste, dureza y vida útil en servicio de las herramientas, y que incursione con gran accesibilidad económica en el mercado.

En el presente trabajo de investigación se propone el desarrollo de una nueva tecnología de recubrimiento superficial, un proceso de PVD por HIPIMS, como una alternativa para mejorar las propiedades tribológicas de las herramientas de corte. La viabilidad de la aplicación de los recubrimientos de TiN a diferentes concentraciones de titanio y nitrógeno serán evaluados mediante ensayos repetitivos de cilindrado sobre fundición gris de tipo FC300 y las superficies serán caracterizadas por microscopia electrónica de barrido (MEB) y espectroscopia de energía dispersiva de rayos X (EDX). La validación de la vida media útil en servicio de los insertos será analizada estadísticamente utilizando la herramienta ANOVA en función del material removido.

1. ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE Y OBJETIVOS

El análisis del estado del arte y los objetivos propuestos en el trabajo de investigación son presentados a continuación.

1.1 ESTADO DEL ARTE

En la actualidad, investigaciones aplicadas y de desarrollo tecnológico se están encaminando hacia el mejoramiento de las máquinas de corte y la búsqueda de herramientas más eficientes, con mejores propiedades tribológicas, que permitan un mayor tiempo de vida útil en servicio y calidad de los productos fabricados. El desarrollo de súper aleaciones y el aumento de los parámetros de corte en la búsqueda de disminuir tiempos y costos de mecanizado^{1,2}, se hace indispensable usar elementos refrigerantes que reduzcan la fricción y aumenten la transferencia de calor en el proceso³, obteniéndose un incremento de la vida útil de la herramienta (metal duro), pero el uso de los fluidos de corte generan un aumento de costos de mecanizado excesivo y trae consigo problemas ambientales de gran impacto y alto riesgo en la salud del ser humano^{4,5}, dejando en tela de juicio la importancia del uso o no de refrigerantes⁶.

¹ EZUGWU, E. y BORNNEY J. Effect of high-pressure coolant supply when machining nickle-base, Inconel 718, alloy with coated carbide tools. En: Materials Processing Technology. 2004. Vol. 153-154, p. 1045-1050.

² EZUGWU, E. et al. Evaluation of the performance of CBN tools when turning Ti-6Al-4V alloy with high pressure coolant supplies. En: Machine Tools & Manufacture. 2005. Vol. 42, p. 1009-1014.

³ HARON, Che; GINTING, A. y GOH, J. Wear of coated and uncoated carbides in turning tool steel. En: Materials Processing Technology. 2001. Vol. 116, p. 49-54.

⁴ DIAZ, Fernando. Recomendaciones para el buen uso de taladras. [Base de datos en línea]. Agosto 19 de 2013. Revista Interempresas.net Metalmecánica. (Recuperado en 20 abril 2017). Disponible en: <http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/112720-Recomendaciones-para-el-buen-uso-de-taladras.html>

⁵ HERNÁNDEZ, Luis y QUESADA, Ana. Fluidos de corte, consecuencias y perspectivas. En: Revista trimestral Ciencias Holguín. Julio-Septiembre 2002. Vol. 8, p. 1-11.

⁶ PEREIRA, O., et al. Lubricar o no lubricar, esa es la cuestión. [Base de datos en línea]. Abril 27 de 2017. Revista Interempresas. Net Metalmecánica. (Recuperado en 05 mayo 2017). Disponible en: <http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/185246-Lubricar-o-no-lubricar-esa-es-la-cuestion.html>

Una alternativa limpia, en las nuevas tecnologías de mecanizado, para controlar la temperatura de corte y mantener un mecanizado estable es el enfriamiento criogénico por chorro de nitrógeno líquido⁷, que más allá de la investigación son tecnologías que están muy limitadas y con poco uso en la industria. En pro de la búsqueda de nuevas tecnologías limpias y herramientas auto lubricantes de mecanizado en seco, se han desarrollado diversos tipos de procesos con el propósito de mejorar las herramientas de corte mediante la deposición de pequeñas capas de materiales de mayor dureza o con propiedades lubricantes, que aumentan la resistencia al desgaste y conservan las propiedades de tenacidad del material base³, minimizando o eliminando el uso de fluidos de corte en la remoción de viruta.

El continuo avance en la industria metalmecánica, exige disminuir los tiempos de remoción de material y los costos de mecanizado, por tal motivo es necesario fabricar herramientas de alta calidad, que soporten mayores velocidades de corte. Investigaciones previas, han evaluado el efecto de los parámetros principales de mecanizado, velocidad de corte, avance y profundidad de corte, donde cada parámetro tiene un efecto sobre la vida efectiva de las herramientas. La profundidad de corte tiene poco efecto en la vida de la herramienta, por considerarse prácticamente constante; seguido de la velocidad de avance, la cual tiene un efecto un poco mayor a la profundidad de corte, pero muchos fabricantes la consideran nula ya que su efecto es reducido. La velocidad de corte tiene un efecto significativo sobre la vida útil en servicio de la herramienta, generando un desgaste creciente de manera exponencial⁸. Los valores bajos de velocidades de corte y avances, ocasionan un elevado tiempo de producción con un excesivo tiempo de corte y un bajo número de piezas mecanizadas, pero valores altos causan elevados tiempos en la producción debido al aumento de los tiempos muertos por cambio de herramientas de corte. La verdadera problemática del fabricante es la búsqueda de

⁷ DHAR, N. y KAMRUZZAMAN, M. Cutting temperature, tool wear, Surface roughness and dimensional deviation in turning AISI 4037 steel under cryogenic condition. En: Machine tools & Manufacture. 2007. Vol. 47, p. 754-759.

⁸ BHATT, Abhay, et al. Wear mechanisms of WC coated and uncoated tools in finish turning of Inconel 718. En: Tribology International. 2010. Vol. 43, p. 1113-1121.

una condición óptima que proporcione el mínimo tiempo de producción posible. De acuerdo a lo anterior y teniendo en cuenta que la problemática no se puede solucionar de forma simultánea, es necesario encontrar los parámetros intermedios que garanticen la adecuada vida útil en servicio de la herramienta, como factor económico importante en el mecanizado, usando tiempos cortos de corte efectivo en la remoción de material⁹.

Los productores de herramientas de corte y laboratorios de investigación, con el fin de manipular eficientemente los parámetros de corte, han desarrollado tecnologías de recubrimientos superficiales, donde se puedan obtener rangos amplios de velocidades y adecuados tiempos de vida efectiva de las herramientas, reduciendo tiempos de mecanizado y costos de fabricación. Las herramientas de metal duro están limitadas a velocidades de corte promedios de 75m/min, con vida útil en servicio inferior a 5 minutos de corte efectivo, por tal motivo el uso de recubrimientos por CVD y PVD surgió como solución innovadora mediante la deposición de películas de múltiples materiales sobre la superficie de corte en la herramientas, aumentando la resistencia al desgaste a velocidades relativamente altas, hasta 350m/min, con una vida de corte superior a 5 minutos, en un mecanizado limpio, libre de fluidos de corte³. El uso de recubrimientos industriales de mono-capa como TiC presenta una muy buena adherencia al material base y un desgaste uniforme sobre la herramienta, pero una tasa de desgaste no es muy diferente a los insertos sin recubrir, mientras que en los insertos recubiertos con Al₂O₃, debido a su buena conductividad térmica, se determinó un desgaste de flanco inferior al 10% del desgaste en los insertos vírgenes¹⁰. El uso de TiN en herramientas de corte presenta un aumento significativo en la vida útil en servicio de las herramientas de

⁹ DA SILVA, Rosemar, et al. Tool life and wear mechanisms in high speed machining of Ti-6Al-4V alloy with PCD tools under various coolant pressures. En: Journal of materials processing technology. 2013. Vol. 213, p. 1459-1464.

¹⁰ DEARNLEY, P. y TRENT, E. Wear mechanisms of coated carbide tools. En: The Metals Technology. Febrero 1982. Vol. 9, p. 60-75.

corte, gracias a la disminución en el coeficiente de fricción que ofrece, al igual que su grado de dureza¹¹.

La búsqueda de nuevos recubrimientos mono-capa y multicapas con propiedades auto-lubricantes y resistentes al desgaste, hace inminente la inmersión de nuevos materiales de deposición como el AlTiN, de cristalinidad ultra fina, que proporcionan alta dureza, aumenta la resistencia al desgaste y conserva una buena conductividad térmica de la herramienta, debido a la presencia de aluminio en la deposición¹². Bouzakis, encontró que los insertos recubiertos por TiSiN poseen una gran resistencia a la fatiga y altas temperaturas, sobre recubrimientos base de TiN¹³, pero con baja vida útil en servicio respecto a la película de TiAlN. Ducros propuso los recubrimientos de CrN/TiN, donde obtuvo menores rugosidades y fragilidades, al igual que un mejor desgaste abrasivo respecto a las herramientas de TiN y TiAlN¹⁴. Haruyo implementó el uso de DLC (Diamond Like Carbon) como deposición para el mecanizado de aluminio, que por su extremada dureza aumenta la resistencia al desgaste y por su bajo coeficiente de fricción permite un mayor flujo de viruta y por tanto un mejor acabado superficial¹⁵. De acuerdo a lo anterior, es muy común encontrar herramientas de corte con recubrimientos multicapa que proporcionan un

¹¹ AUGER, M.; SANCHEZ, O. y ALBELLA, J. Depósito de TiN sobre herramientas de corte para uso industrial. En: Boletín de la sociedad española de cerámica y vidrio. 2004. Vol. 43, No. 2, p. 488-490.

¹² DEVILLEZ, A. et al. Cutting forces and wear in dry machining of Inconel 718 with coated carbide tools. En: Wear. 2007. Vol. 262. P. 931-942.

¹³ BOUZAKIS, K. et al. Ambient and elevated temperature properties of TiN, TiAlN and TiSiN PVD films and their impact on the cutting performance of coated carbide tools. En: Surface & Coating Technology. 2009. Vol 204. P. 1061-1065.

¹⁴ DUCROS, C.; BENEVENT, V. y SANCHETTE, F. Deposition, characterization and machining performance of multilayer PVD coatings on cemented carbide cutting tools. En: Surface & Coatings Technology. 2003. Vol. 163-164, p. 681-688.

¹⁵ FUKUI, Haruyo, et al. Cutting performance of DLC coated tools in dry machining aluminum alloys. En: Surface & Coatings Technology. 2004. Vol. 187, p. 70-76.

buen rendimiento de las herramientas en cuanto a su resistencia al desgaste, capacidad térmica y adherencia al material base de la herramienta de corte^{16,17,2}.

Entre los procesos de modificación superficial de mayor uso en la industria se encuentra los procesos físicos de deposición en fase vapor (PVD) y una de las técnicas de gran impacto en la industria metalmeccánica es el “Magnetron Sputtering”; que consiste en la evaporación física, por bombardeo de partículas energéticas de tamaño atómico, de un material de aporte o blanco hasta su deposición en el sustrato. Las partículas energéticas son normalmente iones de un plasma acelerado en un campo eléctrico¹⁸, las cuales impactan en la superficie de un blanco con una especie reactiva, produciendo una especie volátil que se deposita en un sustrato¹⁹. En la búsqueda de mejorar el proceso, con buenos resultados en la calidad de la deposición, se han desarrollado diversas técnicas desde la pulverización por corriente directa (DC)^{20,21,22}, pasando por la de radio frecuencia (RF)^{23,24} y culminando en el estudio de nuevas propuestas como lo es el HIPIMS.

En la técnica HIPIMS se genera un plasma de alta densidad y fracción de ionización del material vaporizado (iones de especies metálicas), donde pulsos de alta potencia de cientos de microsegundos son aplicados al objetivo del magnetron, con

¹⁶ EZUGWU, E.; WANG, Z. y MACHADO, A. Wear of coated carbide tools when machining nickel (inconel 718) and titanium base (Ti-6 Al-4V) alloys. En: Tribology Transactions. 2000. Vol. 43, No. 2, p. 263-268.

¹⁷ HARON, Che; GINTING, A. y ARSHAD, H. Performance of alloyed uncoated and CVD-coated carbide tools in dry milling of titanium alloy Ti-6242S. En: Materials Processing Technology. 2007. Vol. 185, p. 77-82.

¹⁸ BEHRISCH, Rainer; WITTMACK, K. Sputtering by particle bombardment. Berlin: Springer, 1981.

¹⁹ FLAMM, D. L.; HERB, G. K. Plasma Etching Technology-An Overview. En: Plasma Etching an Introduction, DM Manos. and DL Flamm eds. 1989.

²⁰ DAS, Santanu, et al. Neural-Networks-Based tool wear monitoring in turning medium carbon steel using a coated carbide tool. En: Journal of Materials Processing Technology. 1997. Vol. 63, p. 187-192.

²¹ WEHNER, Gottfried K. Sputtering by ion bombardment. En: Advances in electronics and electron physics. 1955. Vol. 7, p. 239-298.

²² HOLLAND, Leslie. Vacuum deposition of thin films. London: Chapman & Hall, 1970. vol. 1.

²³ MAYRHOFER, Paul, et al. A comparative study on reactive and non-reactive unbalanced magnetron sputters deposition of TiN coatings. En: Thin solid films. Agosto 2001. Vol. 415, p. 151-159.

²⁴ WINDOW, B. y SAVVIDES, N. Charge particle fluxes from planar magnetron sputtering sources. En: Journal of Vacuum Science & Technology A. 1986. Vol 4, No. 2, p. 196-202.

frecuencias que van desde unos pocos Hz a varios kHz²⁵. En la descarga HIPIMS, los pulsos de alta potencia de pico generan un plasma con densidades electrónicas de tres órdenes de magnitud mayor que las producidas por magnetron sputtering de corriente directa (DCMS). No obstante, las altas densidades del plasma originan la ionización del material, que forma un flujo de material pulverizado ionizado, donde la fracción de ionización puede alcanzar el 90% en comparación con el DCMS.

La técnica HIPIMS se ha utilizado para depositar una alta variedad de recubrimientos metálicos²⁶, óxidos metálicos^{27,28} y nitruros metálicos^{29,30}. Adicionalmente, recientes estudios sobre deposición de monocapa y multicapa de diversos materiales, exponen las diversas ventajas de HIPIMS respecto al DCMS^{31,32}, en donde el uso de recubrimientos multicapa depositados por HIPIMS sobre herramientas de carburo cementado, presentaron la mayor resistencia al desgaste y el aumento de la vida útil del revestimiento^{33,34}. La implementación de nuevos materiales de deposición no convencionales industrialmente como TiAlN, Cr

²⁵ BOHLMARK, Johan, et al. Ionization of sputtered metals in high power pulsed magnetron sputtering. En: Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces and Films. 2005. Vol. 23, No 1, p. 18-22.

²⁶ WEST, G. T.; KELLY, P. J.; BRADLEY, J. W. A comparison of thin silver films grown onto zinc oxide via conventional magnetron sputtering and HiPIMS deposition. En: IEEE Transactions on Plasma Science. 2010. Vol. 38, No. 11, p. 3057-3061.

²⁷ SARAOKINOS, Kostas, et al. Process stabilization and enhancement of deposition rate during reactive high power pulsed magnetron sputtering of zirconium oxide. En: Surface and Coatings Technology. 2008. Vol. 202, No. 20, p. 5033-5035.

²⁸ RUSKE, F., et al. Reactive deposition of aluminium-doped zinc oxide thin films using high power pulsed magnetron sputtering. En: Thin Solid Films. 2008. Vol. 516, No. 14, p. 4472-4477.

²⁹ EHIASARIAN, A. P., et al. High power pulsed magnetron sputtered CrN x films. En: Surface and coatings technology. 2003. Vol. 163, p. 267-272.

³⁰ LIN, Jianliang, et al. High rate deposition of thick CrN and Cr 2 N coatings using modulated pulse power (MPP) magnetron sputtering. En: Surface and Coatings Technology. 2011. Vol. 205, No. 10, p. 3226-3234.

³¹ UHLMANN, E. et al. HIPIMS coated carbides with high adhesive strength for hard machining. En: MM Science Journal. Diciembre 2014. Vol. 4, p. 516-520.

³² UHLMANN, E., et al. Hard Turning of Hot Work and Cold Work Steels with HiPIMS and DCMS TiAlN Coated Carbide Inserts. En: Procedia CIRP. 2016. Vol. 46, p. 591-594.

³³ SKORDARIS, G., et al. Film thickness effect on mechanical properties and milling performance of nano-structured multilayer PVD coated tools. En: Surface and Coatings Technology. 2016. Vol. 307, p. 452-460.

³⁴ SHIMIZU, Tetsuhide, et al. HIPIMS deposition of TiAlN films on inner wall of micro-dies and its applicability in micro-sheet metal forming. En: Surface and Coatings Technology. 2014. Vol. 250, p. 44-51.

y CrN, adaptando el espesor de capa y calidad superficial de la herramienta base, han mejorado significativamente el rendimiento de corte^{35,36}.

De acuerdo a lo anteriormente expuesto, mediante ensayos repetitivos de cilindrado de acabado en seco de probetas fabricadas de fundición gris, se evalúa el desgaste de insertos intercambiables de torneado, con y sin recubrimientos de nitruro de titanio depositados por HIPIMS.

1.2 OBJETIVOS

A continuación, se presentan los objetivos propuestos en el trabajo de investigación.

1.2.1 Objetivo general

Evaluar el desgaste en insertos para torneado modificados superficialmente con titanio y nitrógeno, usando la metodología ANOVA, contribuyendo al desarrollo científico y tecnológico para dar respuesta a las necesidades de la industria colombiana.

1.2.2 Objetivos específicos

- Modificar superficialmente con Ti y N, insertos intercambiables de metal duro (HM) para torneado, mediante HIPIMS (High-Power Impulse Magnetron Sputtering).
- Verificar la morfología superficial y composición química de los insertos depositados y no depositados con Ti y N, antes y después del proceso de desgaste por medio de laboratorios de microscopía y espectroscopía.

³⁵ BOUZAKIS, K.-D., et al. Adaption of graded Cr/CrN-interlayer thickness to cemented carbide substrates' roughness for improving the adhesion of HPPMS PVD films and the cutting performance. En: Surface and Coatings Technology. 2010. Vol. 205, No. 5, p. 1564-1570.

³⁶ BOUZAKIS, Konstantinos-Dionysios, et al. Cutting with coated tools: Coating technologies, characterization methods and performance optimization. En: CIRP Annals-Manufacturing Technology. 2012. Vol. 61, No. 2, p. 703-723.

- Evaluar el desgaste de las herramientas de corte modificadas y no modificadas superficialmente con el uso de un proceso de torneado CNC bajo condiciones de operación y parámetros de corte tales como:
 - ✓ Tipo de material a mecanizar, fundición gris.
 - ✓ Operación de cilindrado externo para acabado superficial.
 - ✓ Profundidad de corte en un rango de 0,1–0,8mm.
 - ✓ Avance en un rango de 0,1–0,8mm/rev.
- Realizar el análisis de experimento de varianza ANOVA, con el fin de evaluar la importancia de la modificación superficial de Ti y N en la superficie de las herramientas de corte. Los experimentos a implementar se presentan a continuación:
 - **Experimento Factorial**

Este experimento busca evaluar los cambios de la vida útil en servicio que presentan los insertos intercambiables modificados y no modificados a diferentes velocidades de corte durante el torneado.

- ✓ Variables independientes:

FACTOR A: Tipo de recubrimiento superficial.

FACTOR B: Velocidad de corte.

- ✓ Variable dependiente: Volumen de material removido [mm^3].

Tabla 1. Parámetros a usar en el experimento factorial.

Tratamiento Superficial	Volumen de Material removido en el proceso [mm^3].			
	Velocidad 1	Velocidad 2	Velocidad 3	Velocidad 4
Recubrimiento 1				
Recubrimiento 2				
Sin Recubrimiento				

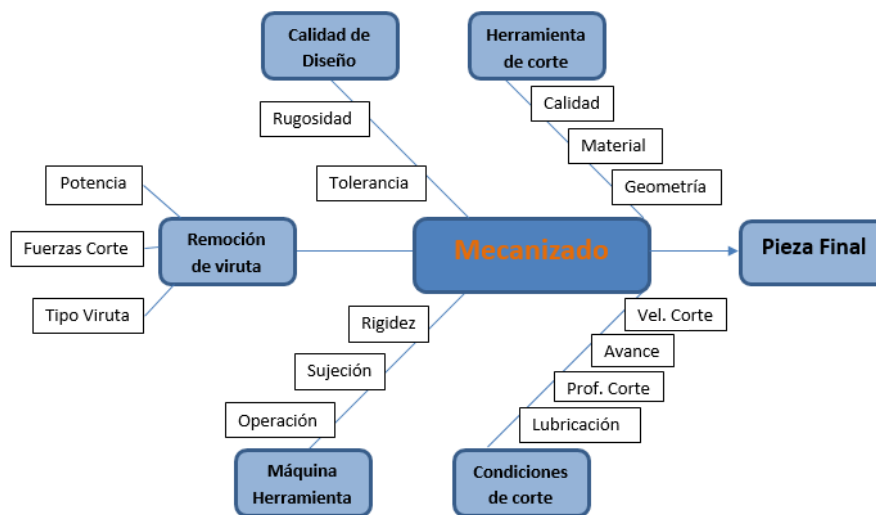
2. TECNOLOGÍA DE LOS PROCESOS DE MECANIZADO

A continuación, se presenta la descripción del contenido teórico abordado en el presente trabajo de investigación.

2.1 MANUFACTURA Y PROCESO DE TORNEADO

La manufactura se puede definir como un proceso tecnológico, físico o químico aplicado a un material, cambiando sus propiedades, aspecto o geometría, para aumentar su disponibilidad, y su vida útil, reflejado económicamente en la industria³⁷.

Figura 1. Variables en el proceso de mecanizado.



El maquinado es un proceso de arranque de viruta, y uno de los procesos de mayor importancia en la manufactura³⁸, ya que se puede modificar una gran variedad de materiales, como metales, plásticos, cerámicos, entre otros. Con una adecuada

³⁷ GROOVER, Mikell. P. Fundamentals of modern manufacturing materials, processes and systems 4th Edition. United States of America: John Wiley & Sons. Inc, 2010. p. 2 - 180; 543 - 605; 821- 840.

³⁸ SCHVAB, Luis. Máquinas y herramientas. República de Argentina: Instituto Nacional de Educación Tecnológica, 2011. 23p.

selección del proceso de maquinado y la herramienta correcta a usar con los parámetros de remoción indicados y recomendados, es posible obtener cualquier tipo de figura geométrica, con una adecuada precisión y acabado superficial definido en el diseño previo.

Una de las máquinas de mayor importancia en la industria de maquinado de metales es el torno, el cual es una máquina que hace girar una pieza que entra en contacto con un material de corte y por medio de fricción se produce el desprendimiento de material del elemento que presenta menor dureza, en este caso la pieza a maquinar³⁹, y por medio de los procesos adecuados obtener las propiedades y geometrías que se requiera. Debido a la fricción que se genera entre la pieza y la herramienta de corte, no solo se produce el desprendimiento de viruta, sino también el desgaste de la herramienta de corte, por lo cual es muy importante una correcta selección de los parámetros de corte para aprovechar de manera óptima la vida de la herramienta⁴⁰, tanto en los procesos de máxima producción, como en procesos de mínimo costo.

2.1.1 Movimientos de corte en el proceso de torneado. El desprendimiento de material en el proceso de torneado, se produce al generar los tres principales movimientos:

- **Movimiento de inserción:** es el movimiento perpendicular de la herramienta de corte con respecto a la pieza de trabajo, con este movimiento se regula la profundidad de corte del proceso.
- **Movimiento de avance:** es el movimiento en un plano paralelo de la herramienta de corte con respecto a la pieza de trabajo, este movimiento produce el desprendimiento de nuevo material en contacto con la herramienta de corte.

³⁹ LABORATORIO DE PRODUCCION. Torno protocolo, curso de procesos de manufactura. Bogotá D.C.: Escuela colombiana de ingeniería, 2007. 29 p.

⁴⁰ VALLE, David; ALFONSO, Ricardo y GONZALEZ, Raide. Calzos pentagonales cementados: influencia de la velocidad de corte en la productividad y los costos. En: Ingeniería Mecánica. Septiembre-Diciembre 2013. Vol. 16, No. 3, p. 210-218.

- Movimiento de corte: es el movimiento relativo o tangencial entre la herramienta de corte y la pieza de trabajo.

2.1.2 Parámetros de corte en el proceso de torneado. Los movimientos de trabajo son controlados mediante los parámetros de corte, en el proceso de torneado es importante seleccionar y establecer los valores adecuados⁴¹, a continuación, se muestra los principales parámetros usados en el proceso de torneado:

- Velocidad de corte: La velocidad de corte es la velocidad relativa entre la pieza y herramienta de corte, la cual está relacionada directamente con la velocidad de rotación y la geometría de la pieza de trabajo.

$$v = \pi * D_o * N \quad (1)$$

En donde n: velocidad de rotación (rev/min), do: diámetro inicial de la pieza (m), v: velocidad de corte (m/min).

- Profundidad de corte: El desprendimiento de material genera una reducción en el diámetro de la pieza de trabajo, la reducción del diámetro está relacionada directamente con la profundidad de corte a_p :

$$D_I - D_F = 2a_p \quad (2)$$

Considerando que se realiza el mecanizado, y se obtiene la dimensión requerida con una única pasada de la herramienta de corte.

⁴¹ MONTILLA, Carlos A. y RIOS, Luis C. Caracterización de regímenes de corte del torno spectralight 0400 de la facultad de ingeniería mecánica universidad tecnológica de Pereira. En: Scientia et Technica. Mayo 2006. Vol. 12, No. 30, p. 209-214.

- Avance: El avance de corte de la herramienta de torneado no se expresa como una velocidad lineal de la herramienta (mm/min), sino en dimensiones de avance por revolución (mm/rev):

$$f_r = f * N \quad (3)$$

En donde f : velocidad lineal (mm/min), f_r : avance (mm/rev), N : velocidad de rotación de la pieza de trabajo (rev/min).

- Tiempo de mecanizado: El tiempo gastado por la herramienta de corte a la hora de realizar un diseño específico está dado por la geometría inicial y final de la pieza, al igual que los parámetros de corte expuestos con anterioridad, el tiempo de mecanizado se puede expresar por la siguiente expresión matemática:

$$T = \frac{L}{f_r} * \frac{D_i - D_f}{a_p} \quad (4)$$

Se recomienda agregar una pequeña distancia a la longitud de la pieza a mecanizar, para ajustar el valor de un posible sobre-recorrido de la herramienta de corte sobre el material.

El material removido de la pieza de trabajo se expresa como velocidad volumétrica de remoción de material, y se puede determinar por la siguiente ecuación:

$$MRR = V_{Rem} * T \quad (5)$$

2.1.3 Análisis del proceso de torneado. En el proceso de torneado cuando el desplazamiento relativo entre la herramienta de corte y la pieza de trabajo es perpendicular al filo de corte, se puede llamar un proceso de corte ortogonal. Si el filo de corte tiene un ángulo de inclinación respecto a la pieza de trabajo el proceso

se denomina de corte oblicuo^{42,37}. En la industria y fabricación de insertos de torneado el ángulo de inclinación del filo es cercano a cero, por lo cual en el análisis práctico se usa con frecuencia un modelo de corte ortogonal debido a su simplicidad^{43,44,45}.

2.1.3.1 Ángulos de Corte. Ángulo de filo (φ), es el ángulo formado entre la normal al plano de la pieza y la herramienta, este ángulo determina la dirección de desprendimiento y tipo de la viruta de la pieza de trabajo, la modificación de este ángulo incide en la generación de viruta continua o discontinua, helicoidal o segmentada etc.⁴⁶. Un ángulo φ grande facilita la salida de la viruta de forma continua, pero si φ es pequeño dificulta el corte del material y generaría vibraciones en la herramienta de corte.

Otro ángulo importante es el ángulo de incidencia, dicho ángulo es el formado por la herramienta de corte y el plano de la pieza de corte, este ángulo facilita el corte de material. Entre menor sea el ángulo α , habrá mayor contacto entre la herramienta y la pieza de trabajo, lo cual generaría mayor fricción, pérdida de potencia y desgaste prematuro de la herramienta de corte, pero entre mayor sea el ángulo α el filo de la herramienta se debilita y produce el astillamiento de la misma.

Por último, el ángulo β es el ángulo del filo de la herramienta, el cual depende exclusivamente de la geometría de la misma, entre mayor sea el ángulo β , el área resistente de la herramienta será mayor, aumentando la tenacidad de esta.

⁴² MARIN, Nacarí. Análisis termo-mecánico de la influencia del desgaste geométrico de las herramientas en procesos de corte ortogonal de aceros inoxidables austeníticos. Tesis Doctoral. Leganés: Universidad Carlos III de Madrid. Área de ingeniería Mecánica, 2010. 320p.

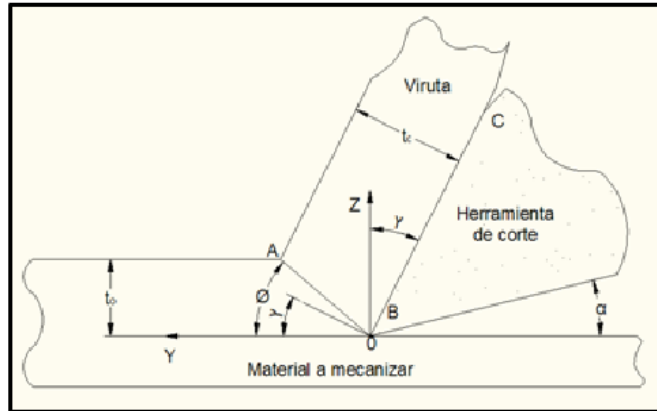
⁴³ SANDVIK COROMANT, Herramientas de torneado. Catálogo [online]. Brasil: 2015 [consultado: septiembre, 2016]. Disponible en: http://sandvik.ecbook.se/se/es/turning_tools_2015/

⁴⁴ KENNAMETAL, Herramientas de corte. Catálogo [online]. Brasil: 2013 [consultado: Diciembre, 2016]. Disponible en: https://www.kennametal.com/content/dam/kennametal/kennametal/es/Resources/Catalogs-Literature/Metalworking/A-15-04370_KMT_Master_ES.pdf

⁴⁵ ISCAR, Complete machining solutions turning tools. Catálogo [online]. Argentina: 2015 [consultado: Diciembre, 2016]. Disponible en: <http://www.iscar.com/catalogs.aspx/CountryId/27>

⁴⁶ GERLING, Heinrich. Alrededor de las máquinas-herramienta 3ra Edición. Barcelona, España: Verté, S.A. 2006. 273p.

Figura 2. Ángulos principales en el torneado.



Fuente: Vida de la herramienta y ecuación de Taylor. <https://goo.gl/GxKKXs>

2.1.3.2 Fuerzas de corte. El modelo ortogonal es válido cuando la fuerza que se presenta entre la cara de la herramienta y la viruta (R) y la fuerza entre la viruta y la pieza (R'') son iguales, es decir es un análisis en dos dimensiones⁴⁷, la herramienta sobre la viruta ejerce una fuerza tangencial F_t , la cual actúa en dirección normal a la velocidad de corte y una fuerza de corte F_c que actúa en dirección paralela a la velocidad de corte⁴⁸. En el modelo ortogonal se ignora la fuerza de avance, producida por el movimiento de la herramienta a lo largo de la pieza.

$$F_c = \frac{F_s * \cos(\beta - \alpha)}{\text{sen}\phi * \cos(\phi + \beta - \alpha)} \quad (6)$$

$$F_t = \frac{F_s * \text{sen}(\beta - \alpha)}{\cos(\phi + \beta - \alpha)} \quad (7)$$

⁴⁷ GARCÉS, O., et al. Utilización del criterio de desgaste de flanco y la ecuación de Taylor para simular el tiempo de vida de una herramienta de corte mediante el proceso de torneado en CNC para un material AISI 1018. Trabajo de Grado-FIMCP. Ecuador: Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2011. 104 p.

⁴⁸ LUO, X, et al. Modeling flank wear of carbide tool insert in metal cutting. En: International Conference on wear of materials. Julio-Agosto 2005. Vol. 259, p. 1235-1240.

En donde F_s : es la Fuerza de cizallamiento, F_t : la fuerza tangencial, F_c : la fuerza de corte y \emptyset el ángulo de corte. Los otros ángulos presentes en la ecuación ya fueron explicados con anterioridad.

Merchant mediante la definición de la fuerza de cizallamiento expresa la siguiente ecuación:

$$F_s = F_c * \cos\emptyset - F_t * \sen\emptyset \quad (8)$$

$$F_s = \tau * A \quad (9)$$

$$\tau \approx 0.5 * S_y \quad (10)$$

$$\emptyset = 45 + \frac{\alpha}{2} - \frac{\beta}{2} \quad (11)$$

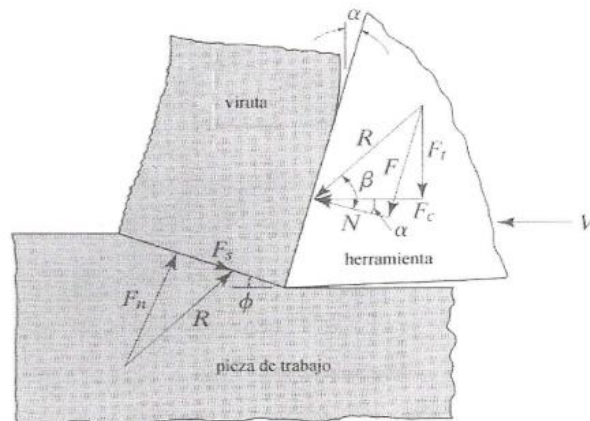
Teniendo en cuenta que Merchant considera como material de corte un acero al carbono en la ecuación (10) para el valor de τ . Si el material de corte es diferente, este valor difiere respecto al calculado en la ecuación. La ecuación de Merchant supone una resistencia al corte del material constante, a la cual no afecta la deformación de la viruta, la temperatura u otros factores externos, debido a lo anterior, el valor de ángulo de plano de corte es un valor aproximado, pero no es el valor adecuado para cálculos posteriores³⁷. El valor del ángulo de corte se obtienen a partir de la ecuación de corte ortogonal, donde:

$$\tan\emptyset = \frac{r * \cos\psi}{1 - r * \sen\psi} \quad (12)$$

$$r = \frac{a_p}{Esp\ Viruta} \quad (13)$$

$$A = \frac{a_p}{h * \sen\emptyset} \quad (14)$$

Figura 3. Diagrama de fuerzas en el proceso de torneado.



Fuente: Utilización del criterio de desgaste de flanco y la ecuación de Taylor. Escuela Superior Politécnica del Litoral.

2.2 ACABADO SUPERFICIAL Y RUGOSIDAD DEL MATERIAL

La búsqueda en la industria de manufactura está basada en el aumento de la tasa de remoción de material, disminuyendo la tasa de desgaste en la herramienta, manteniendo los valores preestablecidos de rugosidad superficial y dimensiones de la pieza⁴⁹.

La rugosidad es una medida integral superficial, incluyendo su textura superficial, propiedades mecánicas y propiedades metalúrgicas. Afectando directamente en la resistencia a la corrosión, resistencias electrónicas y térmicas, características de fricción y resistencia a la fatiga, según el trabajo y ambiente expuestos, disminuyendo significativamente la vida de servicio de la pieza⁵⁰.

⁴⁹ CORREA, M, et al. Factores que afectan el acabado superficial en los procesos de mecanizado: Técnicas de análisis y modelos. En: Comité Español de Automática CEA. 2004. Vol. 25, No 75, p.

⁵⁰ GUTIERREZ, Yesid y LOPEZ, Kevin. Estudio de rugosidad en maquinado por el proceso de torneado en CLIMET LTDA. Basado en las normas ISO de rugosidad. Trabajo de Grado Ingeniero Mecánico. Barranquilla: Universidad Autónoma del Caribe. Facultad de Ingenierías. Programa de Ingeniería Mecánica, 2014. p. 6-35.

La altura del perfil de la rugosidad superficial se puede determinar teóricamente por la siguiente ecuación^{51,49}.

$$Rug = \left(r_p - \frac{1}{2} * \sqrt{4 * r_p^2 - f^2} \right) * 1000 \quad (15)$$

O con la ecuación aproximada:

$$Rug = \frac{f^2}{8 * r_p} * 1000 [\mu m] \quad (16)$$

En donde f : Avance (mm/rev), r_p : Radio de punta (mm).

La importancia de la investigación y mejora de los acabados superficiales de las piezas, radica en el creciente uso del proceso de remoción de material, con tiempos de mecanizado mínimos y acabados superficiales de gran calidad y tolerancias dimensionales de gran precisión, en las diferentes industrias como metalmecánicas, automotrices, hidráulica, aeronáuticas, entre otras. Aunque no siempre es óptimo modificar las herramientas y parámetros de corte para mejorar este acabado, ya que los tiempos de corte y costos aumentan significativamente en el mecanizado, generando el interrogante, ¿Es necesario un buen acabado superficial en la pieza final?, en muchos casos la vida útil de la pieza de trabajo no lo amerita, o el ambiente de trabajo es auto-lubricado lo cual aumenta la vida útil de esta y no es necesario una buena rugosidad.

⁵¹ GAMA, José E. Estudio comparativo de acabados superficiales de probetas de aluminio 6061-T6, cobre UNS C11000 y acero AISI 1020 a través del análisis de virutas obtenidas en el proceso de torneado, utilizando diferentes parámetros de corte y diferentes insertos SANDVIK. Trabajo de Grado Ingeniero Mecánico. México: Universidad de las Américas Puebla. Escuela de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Mecánica, 2005. p. 77-103.

La rugosidad en las piezas de mecanizado se ve afectado directamente por las propiedades de corte utilizadas en el proceso de desprendimiento de material al igual que la geometría y calidad de la herramienta de corte, como lubricación y rigidez de la máquina de mecanizado^{52,53,54}. A continuación, se exponen los efectos de cada una de las propiedades y factores en el proceso de torneado.

2.2.1 Velocidad de corte. La influencia de la velocidad de corte en el mecanizado, es proporcional a la calidad superficial de la pieza de trabajo e inverso a la rugosidad del mismo, por lo cual, en el proceso de torneado, cuando se aumenta la velocidad de corte, disminuye la rugosidad y aumenta la calidad superficial de la pieza

2.2.2 Avance. La influencia del avance en la rugosidad, es inverso a la velocidad de corte, entre mayor sea el avance, la calidad superficial en la pieza de trabajo disminuye, o aumenta la rugosidad del material.

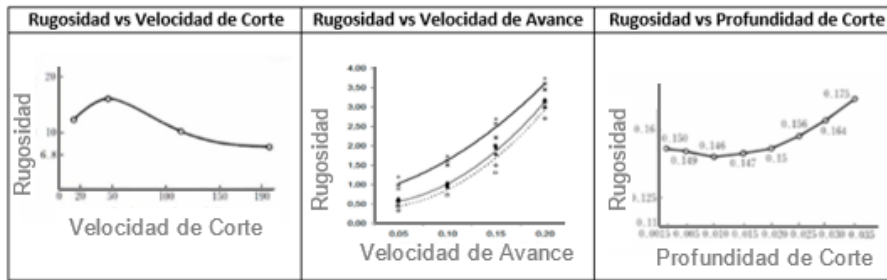
2.2.3 Profundidad de corte. El aumento en la profundidad de corte, en cierto límite de valores, produce un aumento de la viruta retirada del material, la cual ayuda en la disipación de calor en el mecanizado, mejorando la calidad superficial de la pieza. Pero sobrepasar los valores de profundidad de corte óptimos, aumenta la superficie de contacto entre la pieza de trabajo y la herramienta de corte, lo cual genera mayor fricción y aumento de la temperatura de corte, disminuyendo así la calidad superficial de la pieza.

⁵² CASSIER, Z. et al. Predicción del acabado superficial de piezas de acero torneadas en función de las propiedades mecánicas del material y de las condiciones de corte. En: Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales. 1997. Vol. 17, No. 1, p.13-18.

⁵³ MAZINI, N.E, et al. Relación entre la rugosidad y las variables de mecanizado en una operación de torneado con insertos. En: Coloquio Latinoamericano de fractura y Fatiga. Agosto 2000. Vol. 4, p. 475-482.

⁵⁴ SANCHEZ, M, et al. Evaluación de la calidad superficial de piezas mecanizadas a partir de la fuerza de corte. En: Centro Nacional de Investigaciones metalúrgicas. Mayo 1998. Vol. 34, p. 27-31.

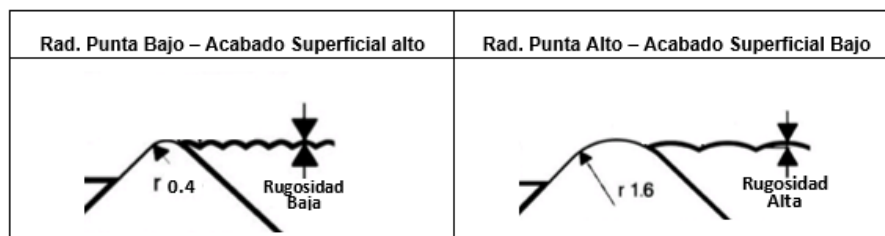
Figura 4. Influencia de los parámetros de corte en la rugosidad.



Fuente: PEREIRA, Juan C. y RUIZ, Rubén G. Influencia de los parámetros de corte y geometría de la herramienta en la rugosidad superficial obtenida en operaciones de torneado del bronce SAE 40. En: Revista Ingeniería UC. 2007. Vol. 14, No. 3, p. 77-85.

2.2.4 Geometría de la herramienta de corte. La rugosidad es manipulada básicamente por los valores de radio de punta de la herramienta de corte, en pocas palabras valores de radios de punta elevados de la herramienta de corte, tienen como consecuencia una alta rugosidad y un bajo nivel de acabado superficial por tanto una disminución en la vida útil de la pieza^{55,49}.

Figura 5. Influencia de la geometría de la herramienta en la rugosidad.



Fuente: PEREIRA, Juan C. y RUIZ, Rubén G. Influencia de los parámetros de corte y geometría de la herramienta en la rugosidad superficial obtenida en operaciones de torneado del bronce SAE 40. En: Revista Ingeniería UC. 2007. Vol. 14, No. 3, p. 77-85.

⁵⁵ PEREIRA, Juan C. y RUIZ, Rubén G. Influencia de los parámetros de corte y geometría de la herramienta en la rugosidad superficial obtenida en operaciones de torneado del bronce SAE 40. En: Revista Ingeniería UC. 2007. Vol. 14, No. 3, p. 77-85.

2.3 TRIBOLOGÍA Y DESGASTE DE LA HERRAMIENTA

La tribología es la ciencia que estudia la interacción entre dos superficies en contacto y movimiento relativo entre ellas, involucrando fenómenos de fricción, desbaste y lubricación⁵⁶.

El desgaste de las herramientas de corte genera un trabajo inadecuado sobre la pieza a mecanizar, provocando un acortamiento de su vida útil, con la necesidad de un cambio prematuro de esta, generando paradas inesperadas en la industria lo cual se ve reflejado en pérdidas de energía, horas hombre, tiempos de producción y perdidas económicas. Por tal motivo al seleccionar o diseñar herramientas de corte es importante que no presente solubilidad con la pieza de trabajo. El desgaste por adherencia, como la abrasión, muy común en las herramientas de corte, muestra que entre mayor sea la dureza de la herramienta, tendrá mayor resistencia al desgaste.⁵⁷ Teniendo en cuenta que una herramienta excesivamente dura es susceptible a fallar por fractura, por tal motivo para evitar fallas mecánicas, es necesaria la búsqueda de herramientas con un grado de dureza alto, pero sin sacrificar la tenacidad de la misma.

A continuación, se presenta una descripción general de los tipos de desgaste más comunes e importantes presentes en los insertos de torneado.

2.3.1 Desgaste de flanco. Desgaste producido por el rozamiento entre la superficie recién creada y la cara del flanco adyacente al borde de corte, este rozamiento produce un aumento de temperatura en la herramienta, modificando sus propiedades superficiales y como consecuencia el deterioro de la misma.

⁵⁶ BROSTOW, Witold, et al. Tribología con énfasis en polímeros: fricción, resistencia al rayado y al desgaste. En: Journal of Materials Education, 2003, vol. 25, no 4-6, p. 119.

⁵⁷ SAMPÉN, Luis. Pautas para el Diseño de Partes Metálicas Resistentes al Desgaste. En: Industrial Data. Diciembre 2003. vol. 6, No. 2, p. 66-73.

2.3.2 Desgaste de cráter. Desgaste producido en la superficie de ataque de la herramienta, originado por la acción de la viruta que roza dicha superficie, los grandes esfuerzos y la alta temperatura a la cual se desprende la viruta. Este desgaste se mide por la profundidad del cráter o por su área.

2.3.3 Desgaste por adhesión. Adhesión de material producido en la superficie de desprendimiento y la punta de la herramienta. Se produce con mayor frecuencia en materiales dúctiles a bajas velocidades de corte.

Figura 6. Principales desgastes en insertos de torneado.



Fuente: Sandvik Coromant, herramientas de torneado. <https://goo.gl/vBWHDM>.

2.4 TECNOLOGÍA DE LAS HERRAMIENTAS

El uso de recubrimientos en las herramientas de corte ha tenido un crecimiento inminente en la búsqueda de herramientas con mayor dureza y resistencia al desgaste, pero conservando una buena tenacidad para evitar fracturas en ellas, y un cambio prematuro en el proceso. A continuación, se exponen algunos de los recubrimientos de mayor importancia en la industria de los insertos de torneado.

2.4.1 Nitruro de titanio (TiN). El Nitruro de Titanio es un compuesto utilizados con mayor frecuentemente en los tratamientos superficiales de insertos de metal duro, debido a que permite mejorar las propiedades mecánicas y químicas; como el incremento de la dureza, disminución del coeficiente de fricción, aumento de la

resistencia al desgaste, a la fatiga y a la corrosión, logrando un incremento en la vida útil del inserto⁵⁸.

Tabla 2. Propiedades del nitruro de titanio.

Propiedad	TiN
Dureza	85HRC
Resistencia Química	Inerte a ácidos, bases y disolventes
Módulo de Elasticidad	2950GPa
Coefficiente de Fricción	0.4 a 0.9 contra sí (sin lubricación)
Resistencia a la Temperatura	En aire comienza a oxidar a 600°C
Temperatura de Fusión	2950°C
Conductividad Térmica	0.046 Cal/s · cm · °C
Coefficiente de Expansión Térmica	$9.4 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
Densidad	5.22 gr/cm ³
Estructura Cristalina	Cúbica centrada en las caras
Calor de Formación	80750Cal/mol

Fuente: RESTREPO, Elisabeth; ARANGO, Pedro y CASANOVA, Simeón. Algunos conceptos sobre nitruro de titanio y el carburo de titanio. En: Dyna. 2009. Vol. 76, No. 157, p. 213-224.

2.4.2 Carburo de tungsteno. Los carburos de tungsteno en general tienen una estructura cristalina simétrica y estable lo que les confiere gran dureza, muy utilizado como recubrimiento de herramientas de corte de acero rápido⁵⁹.

Tabla 3. Propiedades del carburo de tungsteno.

Propiedad	Carburo de tungsteno
Dureza	89HRC
Resistencia Química	Resistente a ácidos
Módulo de Elasticidad	550GPa
Resistencia a la Temperatura	En aire comienza a oxidar a 550°C
Temperatura de Fusión	2870°C
Conductividad Térmica	80 W/m ² K
Coefficiente de Expansión Térmica	$5.0 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

⁵⁸ RESTREPO, Elisabeth; ARANGO, Pedro y CASANOVA, Simeón. Algunos conceptos sobre nitruro de titanio y el carburo de titanio. En: Dyna. Marzo 2009. Vol. 76, No. 157, p. 213-224.

⁵⁹ RINCÓN, C.; ZAMBRANO, G.; PRIETO, P. Un método in situ para la elaboración de multicapas de carburo de tungsteno WC y carbono amorfo. En: El hombre y la Maquina. Julio-Diciembre 2003. Nos. 20-21. P. 96-103.

Densidad	1560 kr/m^3
Estructura Cristalina	Hexagonal

Fuente: RINCÓN, C.; ZAMBRANO, G.; PRIETO, P. Un método in situ para la elaboración de multicapas de carburo de tungsteno WC y carbono amorfo. En: El hombre y la Maquina. 2003. Nos. 20-21. P. 96-103.

2.4.3 Alúmina (Al₂O₃). Es el nombre con el que antiguamente se conocía al óxido de aluminio. Es un cerámico muy duro en forma de polvo blanco, que gracias a sus propiedades de baja fricción y bajo desgaste lo hacen idóneo para la fabricación de herramientas de corte. Este se emplea en forma de recubrimiento en insertos de torneado para brindar mejores propiedades mecánicas, físicas y químicas de estas herramientas de corte⁶⁰.

Tabla 4. Propiedades de la alúmina.

Propiedad	Al ₂ O ₃
Dureza	1440 kg/mm^2
Resistencia Química	Poco reactivo a ácidos y sales
Módulo de Elasticidad	375 GPa
Temperatura de Fusión	2072°C
Conductividad Térmica	35 $W/m^{\circ}K$
Coefficiente de Expansión Térmica	$8.4 \times 10^{-6} C^{-1}$
Densidad	3961 kr/m^3
Estructura Cristalina	Trigonal

Fuente: AMADOR, Juan Pablo Carrasco. Recubrimientos multicapa micro-estructurados de ZrO₂-Y₂O₃-Al₂O₃ obtenidos por la vía sol-gel para aplicaciones tecnológicas. 2015. Tesis Doctoral. Universidad de Extremadura.

2.4.4 Carburo de Titanio (TiC). Este es un compuesto o cerámico, en forma de polvos grises o de sólido cristalino, extremadamente duro, de gran uso en la fabricación de herramientas de corte debido a sus propiedades refractarias y

⁶⁰ AMADOR, Juan Pablo Carrasco. Recubrimientos multicapa micro-estructurados de ZrO₂-Y₂O₃-Al₂O₃ obtenidos por la vía sol-gel para aplicaciones tecnológicas. 2015. Tesis Doctoral. Universidad de Extremadura.

capacidad de actuar como un lubricante en aplicaciones que producen calor y fricción, como es el mecanizado por remoción de viruta en un proceso de torneado⁶¹.

Tabla 5. Propiedades carburo de titanio.

Propiedad	TiC
Dureza	4000HV
Resistencia Química	Inerte a ácidos, bases y disolventes
Módulo de Elasticidad	550GPa
Resistencia a la Temperatura	En aire comienza a oxidar a 800°C
Temperatura de Fusión	3140°C
Densidad	4.92 gr/cm ³
Estructura Cristalina	Cristalina cubica

Fuente: MAURI, López; PEDRO, Osmany. Obtención de recubrimiento difusivo de titanio en insertos de metal duro. 2006. Tesis Doctoral. Universidad Central" Marta Abreu" de Las Villas.

2.5 TÉCNICAS DE MODIFICACIÓN SUPERFICIAL

En la búsqueda de reducir tiempos y costos de producción, surge la necesidad de prolongar la vida útil de las herramientas de corte o generar nuevas herramientas multipropósito y multi-material³⁷. En esta búsqueda se genera la optimización de las herramientas de corte usando tratamientos superficiales que modifican propiedades como la resistencia al desgaste, coeficiente de fricción, dureza, tenacidad y resistencia a la oxidación⁶².

A continuación se presentan estudios y artículos de modificación superficial, con el fin de dar a conocer algunos de los más importantes avances tecnológicos en la búsqueda de mejorar las propiedades físico-químicas de los materiales.

⁶¹ MAURI, López; PEDRO, Osmany. Obtención de recubrimiento difusivo de titanio en insertos de metal duro. 2006. Tesis Doctoral. Universidad Central" Marta Abreu" de Las Villas.

⁶²CARRERAS, Luis; BUENO, Sandra y MONTALÁ, Francesc. Recubrimientos duros obtenidos por procesos CVD, TRDD, PVD. [Base de datos en línea]. 1998. Revista Anales de ingeniería mecánica, 12(2), 469-475. (Recuperado en 10 febrero 2017). Disponible en: <http://bddoc.csic.es:8080/detalles.html?tabla=docu&bd=ICYT&id=133664>

2.5.1 Deposición Química de Vapor (Chemical Vapor Deposition-CVD). El proceso CVD consiste en la interacción de una mezcla de gases y un sustrato que se encuentra a elevadas temperaturas, provocando la descomposición química de algunas partes del gas y la formación de una capa sólida en la superficie del sustrato. Algunas técnicas de este proceso son:

- Deposición química de vapor de capa atómica (Atomic Layer Chemical Vapor Deposition-ALCVD)^{63,64}.
- Deposición química de vapor asistida por plasma (Plasma Assisted Chemical Vapor Deposition-CVD)^{65,66}.
- Deposición química de vapor por inyección directa de líquido (Injection Direct Liquid Chemical Vapor Deposition–DLICVD)^{67,68}.
- Deposición química de vapor de baja presión (Low Pressure Chemical Vapor Deposition–LPCVD)⁶⁹.
- Deposición química de vapor mejorada por plasma (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition–PECVD)^{70,71}.

⁶³ CHENG, Hsyi-En; LEE, Wen-Jen y HSU, Ching-Ming. The effect of deposition temperature on the properties of TiN diffusion barriers prepared by atomic layer chemical vapor deposition. En: Thin Solid Films. Agosto 2005. Vol. 485, No. 1, p. 59-65.

⁶⁴ POWELL, Ronald y FAIR, James. Copper atomic layer chemical vapor deposition. [Base de datos en línea]. Enero 2001. Novellus Systems, Inc. (Recuperado en 15 febrero 2017). Disponible en: <https://www.google.com/patents/US6464779>

⁶⁵ CHOY, K.L. Chemical vapor deposition of coatings. En: Progress in Materials Science. 2003. Vol. 48, p. 57-170.

⁶⁶ KIM, Duk-Jae, et al. Properties of TiN–TiC multilayer coatings using plasma-assisted chemical vapor deposition. En: Surface and Coatings technology. 1999. Vol. 116, No. 119, p. 906-910.

⁶⁷ MAURY, F., et al. Multilayer chromium based coatings grown by atmospheric pressure direct liquid injection CVD. En: Surface & Coatings Technology. Abril 2009. Vol. 204, p. 983-987.

⁶⁸ DOUARD, A.; BERNARD, C. y MAURY, F. Thermodynamic simulation of atmospheric DLI-CVD processes for the growth of chromium-based hard coatings using bis(benzene)chromium as molecular source. En: Surface & Coatings Technology. Julio 2008. Vol. 203, p. 516-520.

⁶⁹ KWATERA, Andrzej. Carbon-Doped Al₂O₃ films synthesized on cemented carbide tools by the metal organic LPCVD technique. En: Thin Solid Films. Abril 1989, Vol. 200, p. 19-32.

⁷⁰ JIN SON, Myung. Properties of TiBN coating on the tool steels by PECVD and its applications. En: Journal of Materials Processing Technology. Diciembre 2002. Vol. 130-131, p. 266-271.

⁷¹ LIM, Ju-Wan, et al. Mechanical properties of TiN/TiB₂ multilayers deposited by plasma enhanced chemical vapor deposition. En: Surface & Coatings Technology. 2003. Vol. 174-175, p. 720-724.

- Deposición de vapor químico organometálico (Metallic Organic Chemical Vapor Deposition–MOCVD)⁷².

2.5.2 Deposición Física de Vapor (Physical Vapor Deposition-PVD). Proceso en el cual se convierte un material blanco a su fase vapor en una cámara de vacío, el vapor se condensa como una película delgada sobre la superficie del sustrato cambiando sus propiedades superficiales. A continuación, se presentan algunas investigaciones de técnicas de PVD.

- Evaporación al vacío (vacuum evaporation):
 - Deposición mediante haz de electrones (Electron Beam Deposition)⁷³.
 - Deposición mediante evaporación térmica (Thermal Evaporation)⁷⁴.
- Pulverización Catódica (Sputtering):
 - Pulverización catódica por haz de iones (Ion Beam Sputtering)⁷⁵.
 - Pulverización Catódica Reactiva (Reactive sputter Deposition)⁷⁶.
 - Pulverización Catódica Asistida por haz de iones (Ion Assited Deposition)^{77,78}.
 - Pulverización Catódica de alto Objetivo (High Target Sputtering)⁷⁹.
 - Pulverización Catódica por Magnetron (Magnetron sputtering)^{80,23}.

⁷² CHEVALIER, Sebastien; BONNET, G. y LARPIN, J.P. Metal-organic chemical vapor deposition of Cr₂O₃ and Nd₂O₃ coatings. Oxide growth kinetics and characterization. En: Applied Surface Science. Marzo 2000. Vol. 167, p. 125-133.

⁷³ LIN, Yuan; CHEN, Xin. Advanced Nano depositions Methods. Germany: Chemical Industry Press, 2016. p. 33-42.

⁷⁴ MARGARET, Lewis y PARK, Miller. Apparatus for coating articules by thermal evaporation. [Base de datos en línea]. Octubre 1950. Patentes Google. (Recuperado en 27 marzo 2017). Disponible en: <https://www.google.com/patents/US2527747>

⁷⁵ SMIDT, F.A. Use of ion beam assisted deposition to modify the microstructure and properties of thin films. En: International Material Reviews. 1990. Vol. 35, p. 61-128.

⁷⁶ PETROV, L, et al. Microstructure modification of TiN by Ion bombardment during reactive sputter deposition. En: Thin solid films. Septiembre 1988. Vol. 169, p. 299-314.

⁷⁷ KITAGAWA, Teruyuki, et al. Hard DLC film formation by gas cluster ion beam assisted deposition. En: Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Octubre 2002. Vol. 201, p. 405-412.

⁷⁸ FLORY, Francois. Thin Films for optical systems. United States of America: Marcel Dekker Inc, 1995. p. 117-129.

⁷⁹ KOUZNETSOV, Vladimir, et al. A novel pulsed magnetron sputter technique utilizing very high target power densities. En: Surface & Coatings Technology. Mayo 1999. Vol. 122, p. 290-293.

⁸⁰ SWANN, S. Magnetron Sputtering. En: Physics in Technoloy. 1988. Vol. 19, No. 2, p. 67-75.

2.5.3 High-Power Impulse Magnetron Sputtering (HIPIMS). Magnetron Sputtering se ha convertido en el proceso de elección para depositar todo tipo de revestimientos de gran importancia a nivel industrial, debido a su alta pureza, y calidad de revestimiento en comparación de otros procesos PVD⁸¹.

High Power Impulse Magnetron Sputtering (HIPIMS), es presentado como un avance tecnológico en PVD. Con base en la pulverización catódica por magnetron; HIPIMS utiliza una fuente de impulsos de alta tensión y de corta duración, generando un alto grado de ionización del plasma mejorando la calidad de la película de revestimiento.

El HIPIMS genera ráfagas de energía de alto voltaje del orden de los 1-3KW/Cm² y de baja duración, pulverizando una gran cantidad de material blanco, el cual se ioniza en la nube de plasma, sin sobrecalentamiento del sistema, ya que posee un tiempo fuera de servicio de baja potencia y de estabilidad del proceso⁸². Debido a la gran cantidad de material blanco ionizado en el plasma, se produce una deposición más suave y uniforme a lo largo de la superficie del sustrato en comparación de otras películas obtenidas por PVD, por esta razón el método HIPIMS se perfila como un método eficiente y de gran importancia en la industria metalmecánica. A continuación, se exponen algunos artículos de investigación HIPIMS:

- Análisis por “Optical Emission Spectroscopy” entre Ionización por HIPIMS y magnetron DC, Mostro una mejora aproximada del 90% de ionización en los impulsos de alta potencia, usando Ti en el cátodo²⁵.
- Utilizando tecnología “HIPIMS” para un pre-tratamiento, antes de la deposición, mostró una adhesión del material superior en comparación con los pre-tratados

⁸¹ KELLY, P.J. y ARNELL, R.D. Magnetron sputtering: a review of recent developments and applications. En: Vacuum. Septiembre 1999. Vol. 56, p. 159-172.

⁸² WEICHART, J. y ELGHAZZALI, M. PVD Processes in high aspect ratio features by HIPIMS. En: Society of Vacuum Coaters. Mayo 2009. Vol. 52, p. 201-206.

con “Vacuum arc”, proporcionando una microestructura completamente cristalina en la interfaz sustrato-recubrimiento⁸³.

- Realizando un proceso HIPIMS con potencias de hasta 3KW/cm², en donde se alcanza un grado de ionización del plasma para el Cr como blanco del 30%, influenciadas por el pico de potencia aplicado, donde se observa una corriente umbral pasando de un bombardeo típico de magnetrón a un bombardeo ionizado⁸⁴.
- Comparando el recubrimiento HIPIMS con Magnetron Sputterin de corriente directa, en insertos de torneado. Donde se obtuvo una mejor calidad superficial y resistencia en las herramientas recubiertas con HIPIMS, la resistencia al desgaste en HIPIMS mejora en un 38% en comparación del DCMS³¹.
- Estudio del desgaste y adherencia entre un recubrimiento HIPIMS y un DCMS, en donde se obtuvo resultados favorables en el recubrimiento HIPIMS en el mecanizado de acero para herramientas endurecido en frío. Pero en Acero endurecido en caliente, los resultados de resistencia al desgaste fueron inferiores en comparación al método DCMS³².

⁸³ EHIASARIAN, A; WEN, J. y PETROV, I. Interface microstructure engineering by high power impulse magnetron sputtering for the enhancement of adhesion. En: Journal of Applied Physics.2007. Vol. 101, No. 054301.

⁸⁴ [84] EHIASARIAN, A. et al. Influence of high power densities on the composition of pulsed magnetron plasmas. En: Vacuum. 2002. Vol. 65, p. 147-154.

3. HERRAMIENTAS DE CORTE Y EQUIPOS UTILIZADOS EN EL EXPERIMENTO

La descripción de los equipos que fueron utilizados en la modificación superficial y ensayos de evaluación superficial es presentada a continuación.

3.1 SELECCIÓN DE LA HERRAMIENTA DE CORTE

Se elige los insertos de torneado del fabricante Mitsubishi Tools, debido a la calidad de la estructura de la herramienta y disponibilidad de compra.

La modificación superficial por HIPIMS y evaluación del desgaste de los insertos, se garantiza mediante la comparación con el inserto utilizado como referencia (sin ningún tipo de tratamiento superficial). La herramienta de corte se seleccionó con calidad superficial de metal duro sin recubrimiento, geometría adecuada en el proceso de mecanizado por cilindrado de fundición gris y acabado superficial según el catálogo que ofrece Mitsubishi.

3.1.1 Selección de la calidad de la herramienta de corte. El catálogo de Mitsubishi ofrece las siguientes calidades de herramientas de metal duro con y sin recubrimiento para el mecanizado de fundición gris⁸⁵ (ver figura 7).

En la figura 8 se presentan las calidades de metal duro sin recubrimiento utilizadas en fundición gris.

⁸⁵ MITSUBISHI TOOLS, Herramientas de corte de metal duro. Catálogo [online]. Japón: 2014 [Consultado: diciembre, 2016]. Disponible en: http://www.mitsubishicarbide.com/EU/es/product/pdf/c_n_other/c006s.pdf

Figura 7. Grados o calidades de insertos para torneado.

● GRADOS DE LAS PLACAS PARA TORNEADO

ISO	Metal duro recubierto		Cermet	Recubrimiento Cermet	Metal duro	CBN recubierto	CBN (CBN sinterizado)	PCD (Diamante sinterizado)
	CVD	PVD						
Fundición K	K01	ML5005 LC5105 NEW MC5015 LC5115 MY5015		VP25N AP25N	HT105T HT110		MB710 MB730 MB4020	
	K10		VP10RT	VP25N AP25N	HT105T HT110		MB730 MB4020	
	K20		VP10RT VP15TF VP20RT	VP25N AP25N	HT105T HT110		MB730 MB4020	
	K30				HT105T HT110		MB730 MB4020 MB5140	

Fuente: Catálogo de herramientas de corte Mitsubishi.

Figura 8. Calidades de metal duro Mitsubishi

Material	Grado recomendado	Velocidad de corte recomendado (m/min)	ISO	Área de aplicación
P Acero	UTi20T	100 (60 – 130)	P10	
			P20	
			P30	UTi20T
M Acero Inoxidable	UTi20T	100 (60 – 130)	M10	
			M20	UTi20T
			M30	UTi20T
K Fundición	HTi05T	120 (80 – 150)	K01	HTi05T
	HTi10	100 (50 – 150)	K10	HTi10
	UTi20T	100 (50 – 150)	K20	UTi20T
			K30	UTi20T
N			N01	

Fuente. Catálogo general Mitsubishi, placas de torneado.

De la figura 8, se selecciona la calidad superficial UTi20T recomendada para mecanizar aceros y fundición gris. En la figura 9, se describen algunas de las propiedades físicas de la calidad superficial UTi20T.

Figura 9. Propiedades de las calidades de metal duro Mitsubishi.

COMPONENTE PRINCIPAL Y APLICACIÓN						
ISO	Componente principal	Características	Material			
P	WC-TiC-TaC-Co	Resistencia a la deformación por calor.	Acero al carbono, acero aleado, acero inoxidable y fundición			
K	WC-Co	Alta rigidez y resistencia al desgaste.	Fundición y Materiales no ferrosos			
S	WC-Co	Resistencia elevada al calor y al desgaste.	Aleaciones con trat. térmico, Aleación de Titanio			

CARACTERÍSTICAS DE LOS GRADOS						
ISO	Grados	Dureza (HRA)	Conductividad térmica (W/m·K)*	Expansión térmica (x10 ⁻⁶ /K)	Módulo Young (GPa)*	T.R.S(GPa)*
P	M	90.5	38	5.5	520	2.0
	HTI05T	92.5	79	4.5	600	1.5
K	HTI10	92.0	79	4.6	630	2.0
	RT9005	92.2	79	4.5	600	2.0
S	MT9015/RT9010	92.0	79	4.6	630	2.2
	TF15	91.5	71	5.3	580	2.5

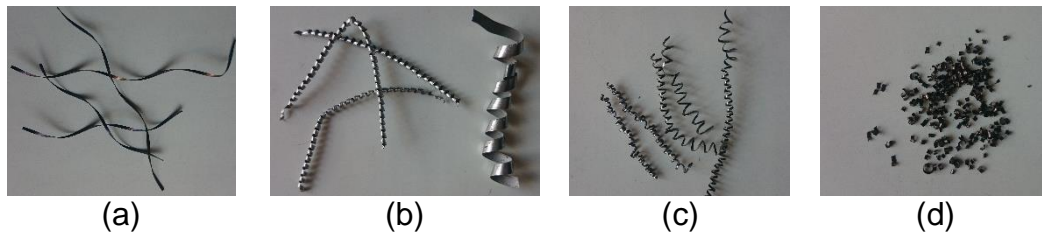
* 1GPa=102kg/mm², 1W/m·K=2.39×10⁻³cal/cm·seg·°C

Fuente. Catálogo general Mitsubishi, placas de torneado.

3.1.2 Selección del rompe-viruta de la herramienta. En el proceso de mecanizado es de gran importancia seleccionar un rompedor de viruta adecuado, el cual permite el libre deslizamiento del material removido, aumentando la transferencia de calor del proceso con el ambiente y evitando que la viruta entorpezca la operación de corte.

En las aplicaciones de remoción de material como hierro gris o fundición nodular, no es necesario el uso de rompedores de virutas, porque por propiedades del material, la viruta se rompe sola, en la operación. En la figura 10, se muestra el estado de la viruta que se produce durante el mecanizado de algunos materiales utilizados en la industria de manufactura.

Figura 10. Viruta de materiales. (a) Bronce, (b) aluminio, (c) acero y (d) fundición gris.



3.1.3 Selección de la geometría de la herramienta de corte. Después de seleccionar la calidad superficial y rompe-viruta de los insertos de metal duro de referencia UTi20T, se procede a elegir la geometría adecuada de la herramienta de corte según norma ISO 1832⁸⁶.

Tabla 6. Referencia de geometría de la herramienta según ISO 1832.

S	P	M	N	12	04	08
1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.

Fuente. Catálogo general Mitsubishi, placas de torneado.

S: Cuadrado (square), se selecciona esta geometría porque el proceso a realizar es un acabado fino a medio longitudinal, es decir, no presenta curvas y es fácil de alcanzar. Esta geometría ofrece cuatro filos de corte útiles.

P: Corresponde al ángulo de incidencia de 11 grados, que fue seleccionado porque el proceso será de acabado superficial y no soportará grandes fuerzas de corte. Un ángulo más grande, estará más alejada la nueva cara de la pieza con respecto a la herramienta de corte, reduciendo la fricción en el corte.

M: Esta letra simboliza las tolerancias del inserto; tolerancia de punta: $\pm 0.08 - \pm 0.18mm$, tolerancia del círculo inscripto $\pm 0.05 - \pm 0.15mm$, y tolerancia del espesor $\pm 0.13mm$.

N: Parámetro que indica el tipo de fijación, sin agujero, que es utilizado cuando el mecanizado no soporta grandes fuerzas de corte (acabado superficial).

12: Concierno a la geometría de la cara útil del inserto, la cual es de $12mm$.

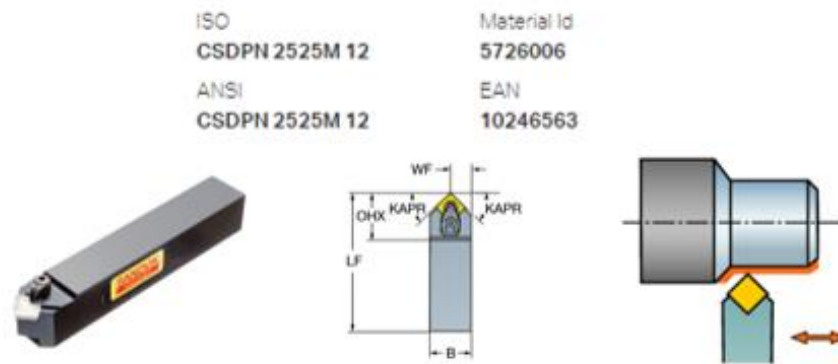
04: Indica que el espesor del inserto es de $4.76mm$.

08: Código que representa un radio de punta de $0.8mm$.

⁸⁶ INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Indexable inserts for cutting tools- Designation. ISO 1832:2004. Suiza: ISO, 2004. 26p.

El proveedor Mitsubishi no ofrece un porta insertos de referencia CSDPN, por tal motivo se realiza la selección con otro fabricante; luego se selecciona el porta insertos de Sandvik con referencia CSDPN 2525M 12, donde la geometría del porta insertos es de sección cuadrada de 25mm y longitud de arista porta herramientas de 12mm⁴⁷.

Figura 12. Selección del porta-insertos Sandvik.



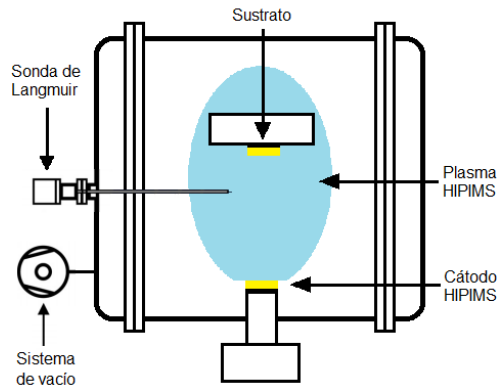
Fuente: Catalogo virtual de Coromant Sandvik. <https://goo.gl/bSk1Jq>

3.3 EQUIPO DE TRATAMIENTO SUPERFICIAL

El recubrimiento de los insertos de torneado de metal duro, se realiza en un equipo con tecnología PVD que se configura con la técnica HIPIMS (High-power impulse magnetron sputtering). En la figura 13 se muestra el esquema básico del sistema de magnetron sputtering.

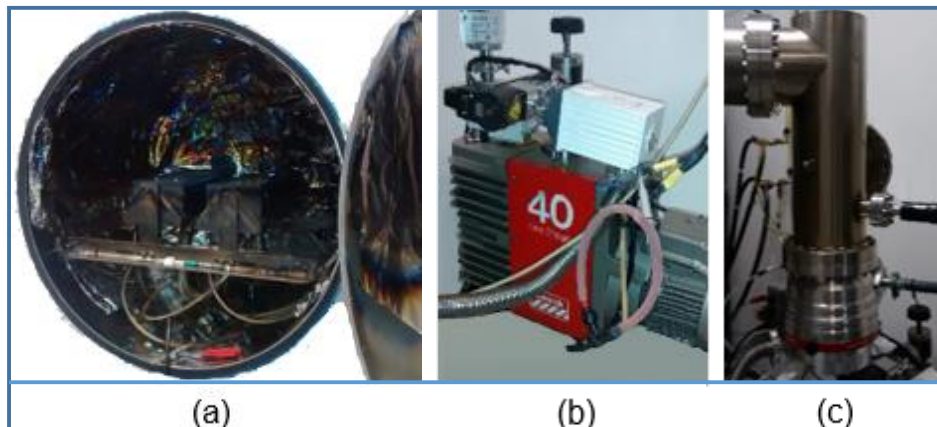
3.3.1 Generalidades. Los revestimientos propuestos en el presente proyecto de investigación se realizaron en el equipo magnetron sputtering de la empresa nano4energy, ubicado en Instituto de Fusión Nuclear de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales (ETSII), de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), en la ciudad de Madrid, España. La empresa nano4energy tienen como misión generar cooperaciones entre las comunidades académicas, científicas e industrial, donde los procesos de laboratorio son adaptados a la producción industrial.

Figura 13. Esquema básico del sistema de magnetron sputtering.



3.3.2 Especificaciones y componentes. El equipo tiene una cámara cilíndrica de 1 metro de diámetro y 1 metro de altura, donde se fabrican los recubrimientos; el interior de la cámara se encuentra forrada con papel de aluminio que evita que se adhieran impurezas y especies corrosivas que puedan ocasionar fallas al material de la cámara (ver figura 14(a)). La cámara se encuentra adaptada a un sistema de bombeo (rotatorio y turbo-molecular) (ver figura 14(b) y (c)), encargado de realizar el vacío requerido en los procesos de deposición, al igual que acoples que permiten la conexión de las líneas de gases, refrigeración por agua de los magnetrones, fuentes de alimentación y de bias (ver figura 15).

Figura 14. Componentes del sistema HIPIMS. Cámara de vacío (a), bomba rotatoria (b), bomba turbo-molecular (c).



El sistema de magnetrones de geometría rectangular y manufacturados por Gecoa Ltda, los cuales confinan el plasma, se encuentra ubicado dentro de la cámara de vacío sobre estructuras rectangulares de $40 \times 10\text{cm}^2$. La estructura completa de los magnetrones puede moverse, si se desean cambiar los factores geométricos del proceso de recubrimiento, controlando la distancia entre el blanco del material a depositar y el sustrato, adicionalmente la orientación de cada uno de los blancos puede ser modificada de manera independiente (ver figura 15).

El sistema de bombeo está conformado principalmente por dos bombas, una bomba rotatoria que baja la presión desde el ambiente hasta 10mbar (ver figura 14(b)) y una turbo-bomba que permite alcanzar el rango de los 10^{-6}mbar (ver figura 14(c)).

Durante todo el proceso de recubrimiento, es necesario usar el sistema de refrigeración por agua, de no ser así, la temperatura podría elevarse y ocasionar posibles daños en los magnetrones y en la turbo-bomba.

Figura 15. Componentes del sistema HIPIMS. Magnetrones rectangulares (a), fuente HIPIMS (b) y control de presión y temperatura (c).



3.4 TORNO CNC

La evaluación del desgaste de los insertos recubiertos y no recubiertos, mediante el torneado de acabado en seco de la fundición gris, se realizó en un torno CNCI.

3.4.1 Generalidades. El torno CNC utilizado en el experimento fue el Emco Turn 342 (ver figura 16), fabricado por la empresa EMCO que desde 1947 desarrolla y construye máquinas y herramienta en Hallein cerca de Salzburgo. El torno se encuentra ubicado en el Centro Industrial de Mantenimiento Integral (CIMI) del SENA (Servicio Nacional de Aprendizaje), en el municipio de San Juan de Girón, Santander, Colombia.

Figura 16. Torno CNC Emco Turn 342.



3.4.2 Especificaciones técnicas. El torno CNC está compuesto por el bastidor, la bancada, torre porta-herramientas, el sistema hidráulico, el sistema de accionamiento y el panel de control (ver figura 17). Sus principales especificaciones técnicas se reportan en la tabla 6.

Figura 17. Torno CNC Emco Turn 342 componentes y panel de control.



Tabla 7. Especificaciones técnicas Emco turn 342.

Torno CNC emco turn 342	
Fabricante	EMCO MAIER GmbH
Modelo	EMCOTURN 342
Año de producción	1988
Control	Siemens Sinumerik 810
Longitud máxima de giro	150 mm
Diámetro máximo de giro sobre la bancada	340 mm
Diámetro máximo de giro sobre el soporte	265 mm
Recorrido en eje x	300 mm
Recorrido en eje y	300 mm
Velocidad del husillo	0 – 6000 rpm/min
Diámetro interior del husillo	42 mm
Tool Magazine	8 herramientas
Consumo de energía máximo	15 Kw
Largo	3.35 m
Ancho	1.95 m
Alto	1.95 m

4. EVALUACIÓN DEL DESGASTE DE LOS INSERTOS

La evaluación de la vida útil en servicio de los insertos recubiertos con nitruro de titanio por HIPIMS, se realizó mediante ensayos repetitivos de mecanizado de desgaste por cilindrado de acabado en seco según la norma ISO 3685. A continuación, se presenta la descripción del desarrollo experimental aplicado.

4.1 MODIFICACIÓN SUPERFICIAL DE LOS INSERTOS POR HIPIMS

El recubrimiento de TiN se realizó ubicando blancos de Ti, de tamaño de $400 \times 100\text{mm}$, sobre el sistema de magnetrones (ver figura 15). Los procesos reactivos fueron controlados con el módulo Speedflo™. Un primero proceso de deposición en modo estático, se efectuó en 4 insertos de la marca Mitsubishi y referencia SPMN 120408 UTi20T. La potencia promedio fue del tratamiento fue de 4KW , con un tiempo de pulso de $50\mu\text{s}$ y 800Hz de frecuencia. El pico de corriente y voltaje se encontraban en el rango de 250A y 850V respectivamente. El proceso de deposición del recubrimiento de TiN en la superficie de los insertos inició con la limpieza superficial, por bombardeo iónico, con gas de argón (Ar) en un voltaje bias (voltaje de polarización) de -600V durante 15min ; el flujo de Ar se mantuvo constante a 50sccm . Posteriormente, se depositó durante 5min una película de Ti y finalmente, con temperatura en el sustrato de 250°C y variando el flujo de nitrógeno (N), con el control de retroalimentación, entre 8 y 10sccm , el recubrimiento de TiN fue depositado en la superficie de los insertos durante 60min . La película de Ti se realizó con el propósito de garantizar una buena adherencia entre la superficie del inserto y el revestimiento de TiN. La presión de la cámara de vacío durante el proceso de deposición se mantuvo en aproximadamente $5.1 \times 10^{-3}\text{mbar}$. En la figura 18 y 19(b) se muestran los insertos antes y después de recubiertos en atmosfera abundante de N.

Figura 18. Insertos dentro de cámara (a) y recubiertos con TiN, retirados del porta sustratos (b).

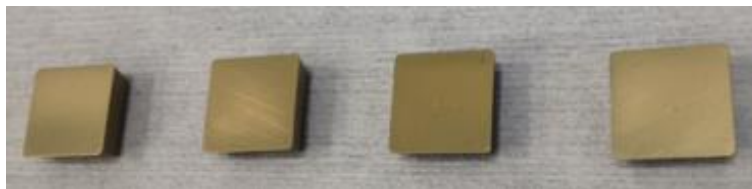


(a)



(b)

Figura 19. Insertos recubiertos con TiN por HIPIMS. (a) En atmosfera abundante de N y (b) en atmosfera abundante de Ti.



(a)



(b)

La deposición del recubrimiento de Ti en la superficie de los insertos se realizó con las siguientes condiciones: potencia promedio de $4kW$, tiempo de pulso de $250\mu s$ y frecuencia de $150Hz$, corriente de $218A$ y voltaje de $700V$. El proceso de fabricación de los revestimientos inició con una limpieza superficial por bombardeo iónico con gas de argón, en un voltaje bias de $-600V$ durante $15min$, manteniendo un flujo constante de $150sccm$, adicionalmente, se realizó una limpieza con Ti durante $5min$. Posteriormente, se depositó una película de Ti durante $15min$ y luego el

recubrimiento de TiN se depositó en la superficie de los sustratos durante 60min variando el flujo de nitrógeno entre 7 y 9sccm . La presión de la cámara de vacío durante el proceso de deposición se mantuvo en aproximadamente $5.1 \times 10^{-3}\text{mbar}$. En la figura 19(b) se muestran los insertos recubiertos con Ti en atmosfera abundante de Ti

4.2 SELECCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE CORTE

En la evaluación del desgaste de los insertos, mediante ensayos repetitivos de torneado de acabado en seco, es necesario seleccionar adecuadamente los parámetros de velocidad de avance, profundidad y velocidad de corte, con el propósito de evitar fallas inesperadas, fracturas, o desgaste prematuro de la herramienta de corte.

4.2.1 Selección de parámetros de corte fijos de mecanizado. Según las recomendaciones que ofrece el fabricante Mitsubishi, para las herramientas de corte con ángulo de incidencia de 11° , geometría tipo S o cuadrada, calidad UTi20T y corte de fundición gris (ver anexo B), se selecciona un avance de corte de 0.1mm/rev y una profundidad de corte de $0,3\text{mm}$ en todos los experimentos⁸⁵, con velocidad de corte variable.

4.2.2 Selección de las velocidades de corte. En la evaluación del desgaste de los insertos se utilizaron tres velocidades de corte, la cuales se describen a continuación⁸⁵.

- La primera velocidad de corte se seleccionó teniendo en cuenta la recomendación del fabricante para los insertos sin recubrimiento cuando son utilizados en el corte de fundición gris FC300 (ver anexo B). La velocidad de corte seleccionada fue de 115m/min , siendo este el límite máximo recomendado por Mitsubishi para un tiempo de vida aproximado de 15 minutos.

- La velocidad de corte recomendada por el fabricante Mitsubishi, en insertos de la misma geometría que los insertos seleccionados, con calidad de metal duro de referencia VP15TF, fue seleccionada con el fin de comparar el recubrimiento realizado por HIPIMS, respecto al recubrimiento por DCMS que ofrece el fabricante (ver anexo B). La velocidad de corte recomendada y seleccionada fue de 160 m/min , la cual corresponde al límite máximo recomendado con el criterio de corto tiempo de mecanizado.
- La tercera y cuarta velocidad de corte, se seleccionaron a partir de las velocidades intermedias obtenidas de los límites máximos utilizados en los insertos con y sin recubrimiento de tipo Mitsubishi (ver anexo B). Las velocidades de corte seleccionadas, que permitieron evaluar el comportamiento de la vida útil en servicio y el efecto de la velocidad de corte en el desgaste de la herramienta de corte, fueron de 130 y 145 m/min .

4.3 GEOMETRÍA Y PROPIEDADES DE LAS PROBETAS A MECANIZAR

El material seleccionado a mecanizar fue una fundición gris de tipo FC300 o ASTM A48 de clase 40, con estructura totalmente perlítica que brinda altas propiedades mecánicas. La microestructura típica presenta grafito de forma laminar, con un máximo de 10% de ferrita, y aproximadamente un 5% de carburos dispersos⁸⁷. Por sus propiedades mecánicas, presenta buen acabado superficial y buena estanqueidad, lo cual es muy adecuada en la fabricación de piezas sujetas al desgaste, tales como, pistones, tapas, válvulas hidráulicas, acoples, entre otras.

4.3.1. Selección de propiedades y material a mecanizar. El material a mecanizar (fundición gris de tipo FC300) fue solicitado a la empresa colombiana Ferrocortes S.A. ubicada en la ciudad de Medellín, quienes garantizaron la uniformidad del

⁸⁷ FERROCORTES. S.A. Fundiciones de hierro gris FC300 perlítico – Versa-Bar. Catálogo [online]. Colombia. [Consultado: febrero, 2017]. Disponible en: <http://www.ferrocortes.com.co/download/FT-04-002-HIERRO-GRIS-FC300-P.pdf>

material en su composición, tamaño de grano y dureza en toda su sección, según los estándares de calidad (Ver anexo C). En la tabla 8 y 9 se reportan las propiedades químicas y físicas certificadas por el fabricante.

Tabla 8. Composición química de la fundición gris de tipo FC300 certificada por el fabricante.

%C	%Si	%Mn	%S	%P	%Mg	%Cu	Otros
3.2-3.45	2.3-2.7	0.55-0.75	0.04-0.07	0.1-0.25	-	-	-

Fuente: Certificado de calidad FERROCORTES.

Tabla 9. Propiedades mecánicas de la fundición gris de tipo FC300 certificada por fabricante.

Sección del material	UTS (N/mm ²)	Rango de dureza (HB)
401mm – 80mm	240	190 – 260

Fuente: Certificado de calidad FERROCORTES.

4.3.2. Alistamiento y geometría de las probetas. La geometría de las probetas a mecanizar fue estandarizada con el propósito de evitar vibraciones mecánicas durante el ensayo, evitar posibles daños de la herramienta con la máquina y disminuir factores externos de error en los experimentos. Las probetas se fabricaron con una longitud total de 25cm, donde la longitud efectiva de corte utilizada en la evaluación del desgaste de los insertos fue de 20cm y la longitud de seguridad de 2cm, con un diámetro de 80mm; en un extremo, se manufacturó la sección de sujeción de las probetas en la máquina con diámetro de 70mm en una longitud de 30mm (ver figura 20 y 21).

Figura 20. Estandarización de las probetas a maquinar.

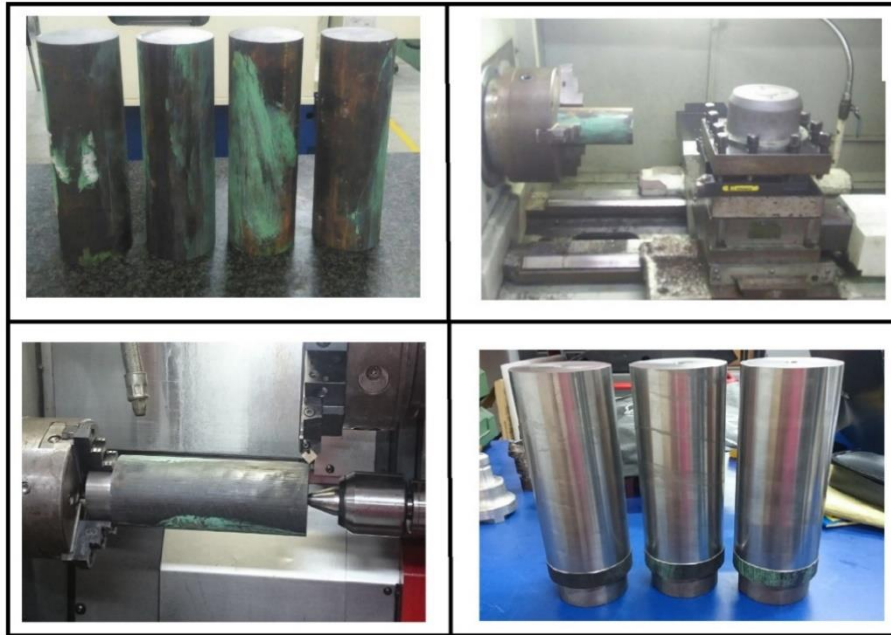


Figura 21. Probetas en fundición gris de tipo FC300.

	Dimensiones de las probetas	Imágenes de las Probetas
Probeta Inicial		
Probeta Final		

4.4 ALISTAMIENTO DE EXPERIMENTO Y CONDICIONES DE CORTE

El desgaste de los insertos utilizados como herramienta de corte, fue medido en función del volumen de remoción de material mecanizado de las probetas de

fundición gris FC300 (ver figura 21), donde la longitud total del cilindrado varió en función del número de pasada o profundidad de corte total del mecanizado, con un ángulo de seguridad de 60° , el cual evita un posible choque de la herramienta con un ángulo de 45° formada entre la vertical y la cara de corte sobre el material.

En la figura 22 se muestra el montaje realizado en los ensayos de mecanizado en seco, sin ningún tipo de lubricante de corte, siguiendo el procedimiento establecido por la norma ISO 3685⁸⁸ (ver anexo D).

Figura 22. Mecanizado sin lubricante de las probetas en fundición gris.



En la tabla 10, se reportan los parámetros de corte seleccionados en los ensayos de torneado en seco.

Tabla 10. Parámetros de corte para pruebas de mecanizado.

Parámetros de corte	Valor parámetros
Velocidad de avance	0.1 mm/rev
Profundidad de corte	0.3 mm
Velocidad de corte 1	115 m/min
Velocidad de corte 2	130 m/min
Velocidad de corte 3	145 m/min
Velocidad de corte 4	160 m/min

⁸⁸ INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION Tool-life testing with single-point turning tools. ISO 3685 second edition: 1993. Suiza: ISO, 1993. 56p.

El torno CNC, utilizado en los ensayos de mecanizado, tiene una computadora de interfaz Fanuc serie O-T que está programada directa en la máquina. En el anexo E se muestra el programa completo usado en el experimento.

4.5 CRITERIO Y MEDICIÓN DEL DESGASTE Y VIDA DE LA HERRAMIENTA

En situaciones prácticas en la industria, se determina la vida útil en servicio de la herramienta de corte cuando la herramienta es incapaz de seguir cortando o deja de producir piezas de trabajo del tamaño y calidad superficial deseada, sin embargo, las razones por las que se puede considerar que las herramientas de corte han llegado a su fin de la vida útil, depende de las condiciones de corte, geometría, material a mecanizar, entre otros.

La comparación de los resultados en las pruebas de mecanizado, se garantizan definiendo la vida útil en servicio como el tiempo de corte efectivo cuando la herramienta alcanza un valor específico de desgaste, que depende de la superficie donde se produce el daño de la herramienta⁸⁸. La norma ISO 3685, establece criterios comunes en el desgaste de las herramientas de corte de carburo sinterizado (ver anexo D). El valor del criterio de desgaste de la herramienta de corte se especifica como la ruptura del cráter, causando un pobre acabado en la superficie del material mecanizado, el cual es considerado como un desgaste real, y de gran uso en la industria metalmeccánica.

El criterio de medición del desgaste de la herramienta de corte se estableció con el incremento en el factor de potencia en la máquina, este incremento se observa en el panel de control del torno CNC (ver figura 23), el cual indica un incremento de 10% de potencia en los primeros cortes realizados por la herramienta, y es llevado hasta un incremento del 20% de potencia, donde se obtiene un cambio de la calidad superficial del material mecanizado y desgaste total de la herramienta de corte (ver figura 24).

El medidor de incremento de potencia es completamente gráfico, y no reporta un valor numérico real, motivo por el cual una muestra de la potencia consumida por el motor del husillo del torno se tiene como referencia. El valor numérico del límite de potencia consumida por el motor, estándar para cada velocidad del husillo, se adquiere midiendo el valor de la corriente consumida por el motor, la cual varía de acuerdo a la velocidad del husillo del experimento e incrementa a medida que la herramienta de corte se desgasta.

Figura 23. Panel de control del torno CNC.

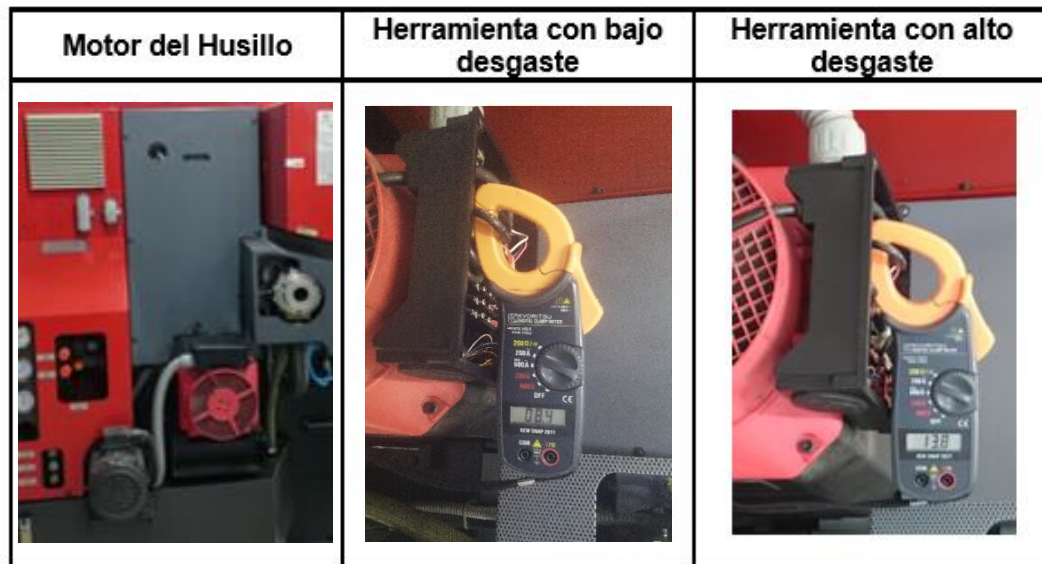


Figura 24. Factor de potencia en el panel CNC y cambio de calidad superficial.

Incremento factor de potencia inicial	Incremento factor de potencia final

En cada pasada que realiza el inserto según la velocidad de corte establecida en el ensayo de mecanizado, se registra el valor de la corriente consumida por el motor, hasta que el panel de control reporta un incremento de potencia del 20% y se observa un cambio de la calidad superficial de mecanizado, provocado por la ruptura del cráter de la punta de la herramienta de corte. En consecuencia, se registra indirectamente la fuerza de corte en el proceso de remoción de material, que es directamente proporcional al desgaste que la herramienta posee, donde con un mismo valor de parámetros de corte, a un amperaje específico, se puede estimar el valor de la fuerza de corte máxima producida por el husillo, determinando el desgaste estándar y fin de la vida efectiva de los insertos. En el proyecto de investigación, el mecanizado realizado con los insertos sin recubrimiento fue establecido como referencia.

Figura 25. Incremento de corriente del husillo según desgaste de herramienta.



4.6 ADQUISICIÓN DE RESULTADOS

Los datos obtenidos en las pruebas experimentales repetitivas de mecanizado por torneado de acabado en seco de una barra cilíndrica de fundición gris de tipo FC300, realizado por las diferentes puntas de los insertos no recubiertos y

recubiertos por HIPIMS con TiN en atmosferas abundantes de Ti y N, son reportados en las tablas 11, 12, 13, 14, 15, 16 y 17 al igual que en el anexo G. El desgaste en cada punta del inserto, fue generado variando la velocidad de corte.

En las tablas 11 y 12 se reportan los resultados obtenidos en el mecanizado realizado con los insertos sin recubrimiento.

Tabla 11. Resultados obtenidos del mecanizado realizado con el inserto sin recubrimiento, número 1.

Experimentos para Inserto sin Recubrir de Base 1					
Profundidad de corte		0,3 mm	Velocidad de Avance		0,1 mm/rev
Probeta	Velocidad de corte	Numero Pasada	Amperios	¿Termino el corte?	
Probeta 1 Nueva	115,00 [m/min]	1	10,90 [A]	si	Longitud Extra Mecanizada 40,71 [mm]
		2	11,40 [A]		
		3	11,60 [A]		
		4	12,30 [A]		
		5	12,56 [A]		
		6	13,30 [A]		
		7	13,70 [A]		
Probeta 2 Nueva	130,00 [m/min]	1	09,40 [A]	si	Longitud Extra Mecanizada 110,20 [mm]
		2	11,17 [A]		
		3	11,71 [A]		
		4	12,38 [A]		
		5	13,80 [A]		
Probeta 3 Nueva	145,00 [m/min]	1	11,01 [A]	si	Longitud Extra Mecanizada 168,20 [mm]
		2	11,79 [A]		
		3	12,70 [A]		
		4	14,20 [A]		
		5			
Probeta 4 Nueva	160,00 [m/min]	1	12,30 [A]	si	Longitud Extra Mecanizada 107,70 [mm]
		2	13,60 [A]		
		3	15,10 [A]		
		4			
		5			

Tabla 12. Resultados obtenidos del mecanizado realizado con el inserto sin recubrimiento, número 2.

Experimentos para Inserto sin Recubrir de Base 2					
Probeta	Velocidad de corte	Numero Pasada	Amperios	¿Termino el corte?	
Probeta 5 Nueva	115,00 [m/min]	1	10,01 [A]	si	Longitud Extra Mecanizada 192,00 [mm]
		2	10,63 [A]		
		3	11,38 [A]		
		4	11,85 [A]		
		5	12,33 [A]		
		6	13,50 [A]		
		7	13,70 [A]		
Probeta 6 Nueva	130,00 [m/min]	1	09,90 [A]	si	Longitud Extra Mecanizada 80,10 [mm]
		2	11,57 [A]		
		3	12,14 [A]		
		4	13,40 [A]		
		5	13,90 [A]		
Probeta 1 Diametro 75,2mm	145,00 [m/min]	1	11,20 [A]	si	Longitud Extra Mecanizada 189,60 [mm]
		2	12,00 [A]		
		3	12,70 [A]		
		4	14,00 [A]		
		5			
Probeta 2 Diametro 77mm	160,00 [m/min]	1	12,00 [A]	si	Longitud Extra Mecanizada 176,60 [mm]
		2	12,70 [A]		
		3	14,90 [A]		
		4			

En las tablas 13 y 14 se reportan los resultados obtenidos en el mecanizado realizado con los insertos recubiertos, por HIPIMS, con TiN en atmosfera abundante de Ti.

Tabla 13. Resultados obtenidos del mecanizado realizado con el inserto recubierto con TiN en abundante atmosfera de Ti, número 1.

Experimentos para Inserto Recubierto +Ti 1					
Probeta	Velocidad de corte	Numero Pasada	Amperios	¿Termino el corte?	
Probeta 3 77,6mm	115,00 [m/min]	1	11,01 [A]	Nota: Repetir prueba	Longitud Extra Mecanizada 168,20 [mm]
		2	11,40 [A]		
		3	11,74 [A]		
		4	12,14 [A]		
		5	12,72 [A]		
		6	13,12 [A]		
		7	13,60 [A]		
		8	14,00 [A]			si
Probeta 4 78,2mm	130,00 [m/min]	1	10,88 [A]	si	Longitud Extra Mecanizada 30,10 [mm]
		2	11,30 [A]		
		3	11,70 [A]		
		4	12,18 [A]		
		5	12,85 [A]		
		6	13,50 [A]		
Probeta 6 77mm	145,00 [m/min]	1	11,08 [A]	si	Longitud Extra Mecanizada 168,30 [mm]
		2	11,90 [A]		
		3	12,70 [A]		
		4	13,34 [A]		
		5	14,10 [A]		
Probeta 5 76,4mm	160,00 [m/min]	1	12,10 [A]	si	Longitud Extra Mecanizada 82,20 [mm]
		2	12,70 [A]		
		3	13,60 [A]		
		4	15,10 [A]		

Los resultados obtenidos con el inserto número “1”, ensayado a una velocidad de corte de 115 m/min (ver tablas 13), aunque estuvo trabajando hasta una potencia adecuada, fue repetido con una tercera prueba porque se presentaron chispas inusuales durante el proceso de mecanizado, que muy posiblemente fueron causadas por las imperfecciones de la superficie de la probeta de fundición gris o a la no homogeneidad del recubrimiento, lo que generó el sobrecalentamiento y aumento en las dimensiones en la marca de desgaste del inserto, motivo por el cual el ensayo se repitió con los mismos parámetros de corte establecido (ver tabla 15).

Tabla 14. Resultados obtenidos del mecanizado realizado con el inserto recubierto con TiN en abundante atmosfera de Ti, número 2.

Experimentos para Inserto Recubierto +Ti 2						
Probeta	Velocidad de corte	Numero Pasada	Amperios	¿Termino el corte?		
Probeta 1 Diametro 72,8mm	115,00 [m/min]	1	10,41 [A]		si	Longitud Extra Mecanizada 175,70 [mm]
		2	10,87 [A]			
		3	11,05 [A]			
		4	11,24 [A]			
		5	11,50 [A]			
		6	11,90 [A]			
		7	12,15 [A]			
		8	12,70 [A]			
		9	13,30 [A]			
Probeta 2 Diametro 75,2mm	130,00 [m/min]	1	10,80 [A]		Nota: Repetir prueba si	Longitud Extra Mecanizada 183,70 [mm]
		2	11,90 [A]			
		3	12,36 [A]			
		4	13,70 [A]			
		5				
		6				
Probeta 3 Diametro 72,8mm	145,00 [m/min]	1	11,40 [A]		si	Longitud Extra Mecanizada 99,60 [mm]
		2	11,85 [A]			
		3	12,13 [A]			
		4	12,42 [A]			
		5	12,90 [A]			
		6	13,90 [A]			
Probeta 4 Diametro 74,6mm	160,00 [m/min]	1	11,90 [A]		si	Longitud Extra Mecanizada 176,20 [mm]
		2	12,30 [A]			
		3	13,10 [A]			
		4	14,70 [A]			
		5				

Los resultados obtenidos con el inserto número “2”, ensayado a una velocidad de corte de 130 m/min (ver tabla 14), reportaron datos distantes a los esperados; presentando un desgaste prematuro, con una vida útil en servicio inferior a los resultados previamente conseguidos. El desgaste prematuro es debido a las posibles imperfecciones en la superficie de la probeta de la fundición gris o a la no homogeneidad del recubrimiento, lo que generó el sobrecalentamiento y aumento en las dimensiones en la marca de desgaste del inserto, motivo por el cual el ensayo se repitió con los mismos parámetros de corte establecido (ver tabla 15).

Tabla 15. Resultados obtenidos del mecanizado realizado con el inserto recubierto con TiN en abundante atmosfera de Ti, repetición de pruebas.

Experimentos para Inserto Recubierto +Ti Repetición					
Probeta	Velocidad de corte	Numero Pasada	Amperios	¿Termino el corte?	
Probeta 5 Diametro 74mm	115,00 [m/min]	1	10,35 [A]	si	Longitud Extra Mecanizada 158,40 [mm]
		2	10,90 [A]		
		3	11,15 [A]		
		4	11,35 [A]		
		5	11,60 [A]		
		6	11,90 [A]		
		7	12,20 [A]		
		8	12,60 [A]		
		9	13,40 [A]		
Probeta 6 Diametro 74mm	130,00 [m/min]	1	11,10 [A]	si	Longitud Extra Mecanizada 93,10 [mm]
		2	11,32 [A]		
		3	11,90 [A]		
		4	12,25 [A]		
		5	12,90 [A]		
		6	13,50 [A]		

En las tablas 16 y 17 se reportan los resultados obtenidos en el mecanizado realizado con los insertos recubiertos, por HIPIMS, con TiN en atmosfera abundante de N.

Tabla 16. Resultados obtenidos del mecanizado realizado con el inserto recubierto con TiN en abundante atmosfera de N, número 1.

Experimentos para Inserto Recubierto +N 1					
Probeta	Velocidad de corte	Numero Pasada	Amperios	¿Termino el corte?	
Probeta 1 Diámetro 66,8mm	115,00 [m/min]	1	09,80 [A]	si	Longitud Extra Mecanizada 0,00 [mm]
		2	10,66 [A]		
		3	10,94 [A]		
		4	11,12 [A]		
		5	11,36 [A]		
		6	11,65 [A]		
		7	11,95 [A]		
		8	12,10 [A]		
		9	12,44 [A]		
		10	12,89 [A]		
		11	13,20 [A]		
Probeta 2 Diámetro 72,8mm	130,00 [m/min]	1	10,96 [A]	si	Longitud Extra Mecanizada 158,70 [mm]
		2	11,58 [A]		
		3	11,85 [A]		
		4	12,20 [A]		
		5	12,58 [A]		
		6	12,94 [A]		
		7	13,40 [A]		
Probeta 3 Diámetro 69,2mm	145,00 [m/min]	1	11,68 [A]	si	Longitud Extra Mecanizada 91,90 [mm]
		2	11,78 [A]		
		3	12,08 [A]		
		4	12,50 [A]		
		5	13,12 [A]		
		6	13,80 [A]		
		7	14,00 [A]		
Probeta 4 Diámetro 72,2mm	160,00 [m/min]	1	11,40 [A]	si	Longitud Extra Mecanizada 150,10 [mm]
		2	12,12 [A]		
		3	12,82 [A]		
		4	13,38 [A]		
		5	14,60 [A]		

Tabla 17. Resultados obtenidos del mecanizado realizado con el inserto recubierto con TiN en abundante atmosfera de N, número 2.

Experimentos para Inserto Recubierto +N 2					
Probeta	Velocidad de corte	Numero Pasada	Amperios	¿Termino el corte?	
Probeta 5 Diametro 68,6mm	115,00 [m/min]	1	09,82 [A]		Longitud Extra Mecanizada 181,70 [mm]
		2	10,56 [A]		
		3	10,85 [A]		
		4	11,18 [A]		
		5	11,40 [A]		
		6	11,64 [A]		
		7	11,83 [A]		
		8	12,13 [A]		
		9	12,47 [A]		
		10	12,78 [A]		
		11	13,20 [A]	si	
Probeta 5 Diametro 62mm	130,00 [m/min]	1	10,98 [A]		Longitud Extra Mecanizada 52,00 [mm]
		2	11,48 [A]		
		3	11,82 [A]		
		4	12,18 [A]		
		5	12,48 [A]		
		6	12,75 [A]		
		7	12,97 [A]		
		8	13,20 [A]		
		9	13,50 [A]	si	
Probeta 2 Diametro 68,6mm	145,00 [m/min]	1	11,52 [A]		Longitud Extra Mecanizada 125,00 [mm]
		2	11,73 [A]		
		3	12,10 [A]		
		4	12,52 [A]		
		5	13,15 [A]		
		6	13,82 [A]		
		7	14,10 [A]	si	
Probeta 4 Diametro 69,2mm	160,00 [m/min]	1	11,70 [A]		Longitud Extra Mecanizada 55,10 [mm]
		2	12,24 [A]		
		3	12,91 [A]		
		4	13,45 [A]		
		5	13,92 [A]		
		6	14,70 [A]	si	

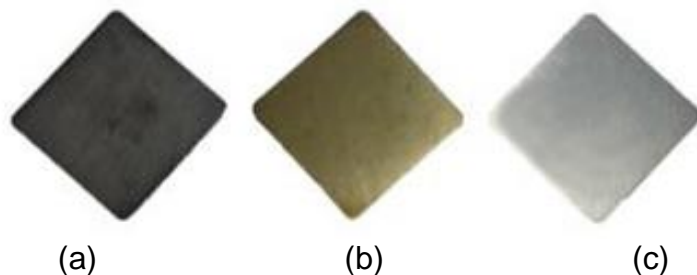
5. CARACTERIZACIÓN SUPERFICIAL

La caracterización superficial de los insertos no recubiertos y recubiertos con la técnica HIPIMS, se realizó mediante inspección visual, microscopía electrónica de barrido (MEB) y espectroscopia de energía dispersiva (EDX).

5.1 INSPECCIÓN VISUAL

En cualquier campo de estudio donde se requiera examinar una superficie, lo primero es realizar una revisión visual, la cual permitió distinguir cambios en el color y la reflectividad en la superficie de los insertos. En el proceso de recubrimiento, cuando la atmosfera de titanio es mayor que la de nitrógeno, tenemos un nitruro de titanio donde predomina el titanio, de ahí el cambio de color a gris-plateado, mientras que en el proceso donde predomina la atmosfera de N, se obtiene un nitruro de titanio donde prevalece el nitrógeno, de ahí el color dorado (ver figura 26). Otros aspectos observables tales como la geometría, permanecen iguales a simple vista después del recubrimiento, aunque en el orden de los micrómetros sus dimensiones se están alterando.

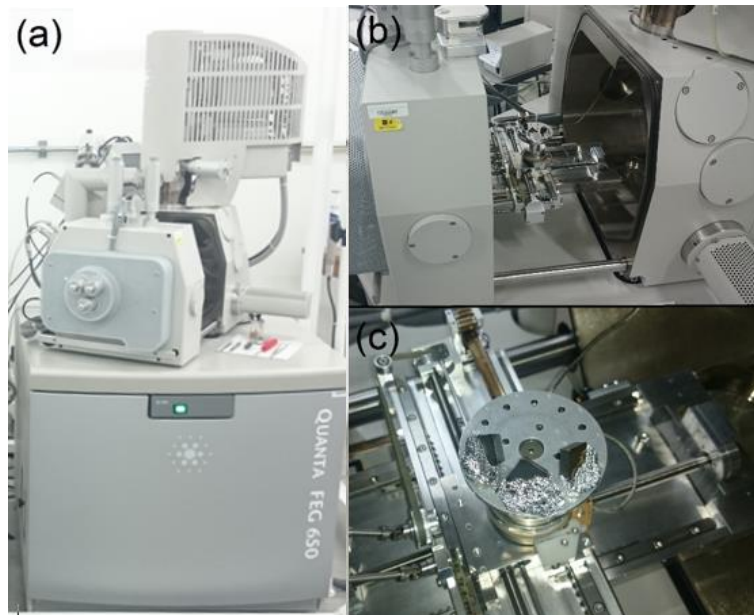
Figura 26. Insertos no modificados y modificados superficialmente. (a) Inserto de referencia (sin tratamiento superficial), (b) inserto recubierto con TiN en atmosfera abundante de N y (c) inserto recubierto con TiN en atmosfera abundante de Ti.



5.2 MICROSCOPIA MEB Y ESPECTROSCOPIA EDX

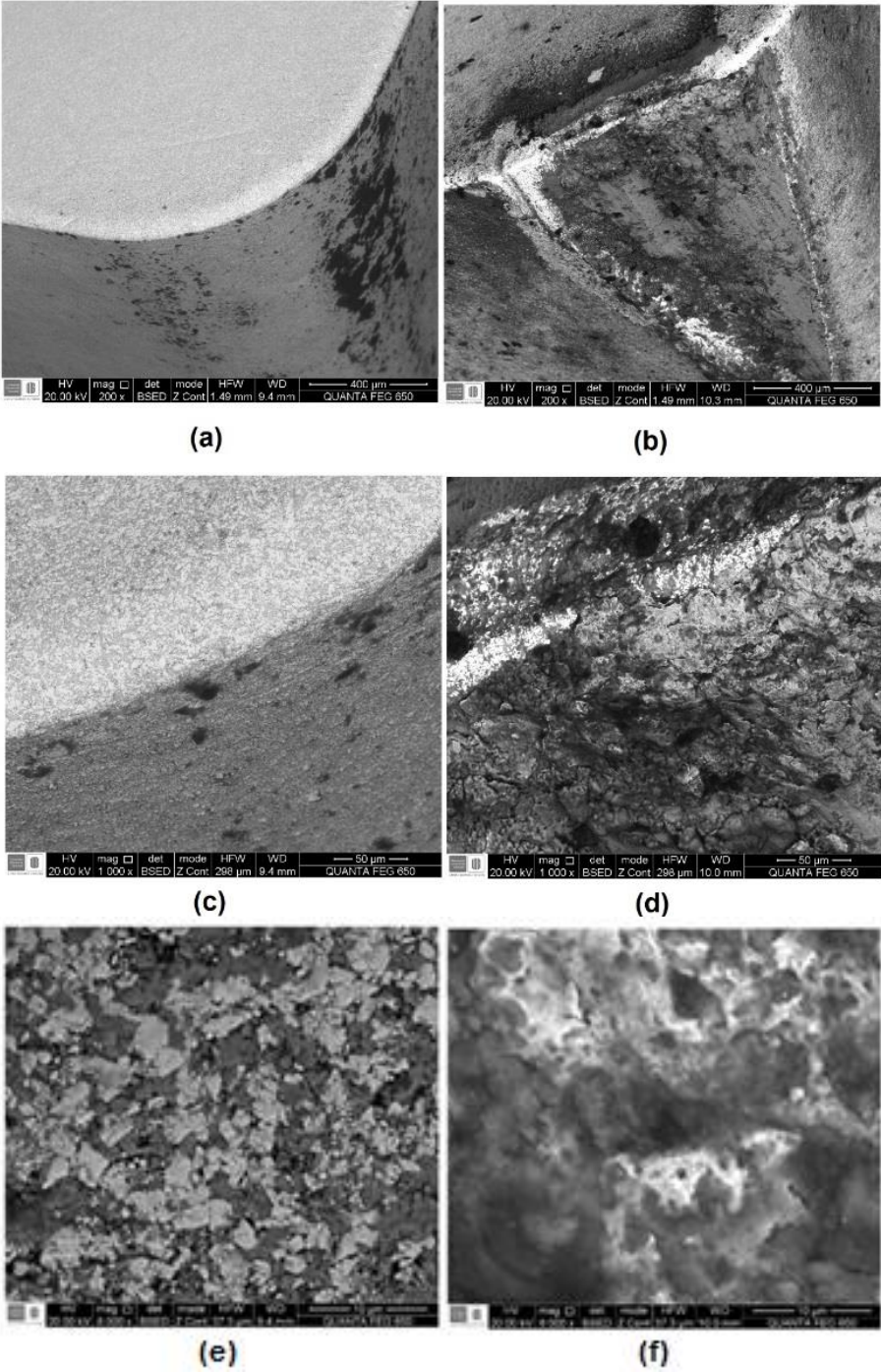
Las superficies de los insertos se analizaron, mediante microscopía electrónica de barrido y espectroscopia de energía dispersiva de rayos x, en el microscopio electrónico de barrido de marca FEI, modelo QUANTA FEG 650 (ver figura 27), ubicado en el Laboratorio de Microscopia del Parque Tecnológico Guatiguará de la Universidad Industrial de Santander (UIS).

Figura 27. Microscopio electrónico de barrido QUANTA FEG 650, equipo en general (a), cámara de vacío (b) y montaje dentro de la cámara (c).



En las figuras 28, 30 y 32, se presentan las micrografías obtenidas por MEB en la superficie de los insertos modificados y no modificados superficialmente con nitruro de titanio, donde la superficie de corte se compara antes y después del desgaste realizado en los ensayos repetitivos de mecanizado por torneado de acabado en seco.

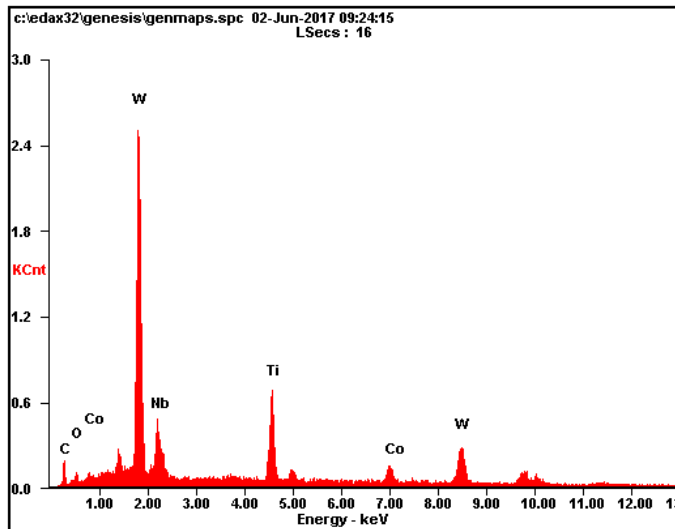
Figura 28. Micrografías en la punta de un inserto sin recubrir. Superficie sin desgastar (a), (c) y (e), y desgastada (b), (d) y (f). A una magnificación de 200X (a) y (b), de 1000X (c) y (d), y 8000X (e) y (f).



En las micrografías de la figura 28(a) y (b) se aprecia que el desgaste del inserto en la sección de corte es crítico, debido a que la marca de desgaste supera las 600 micras. En la micrografía de la figura 28(d), se observa que el material mecanizado (fundición gris), por efectos termodinámicos, se depositó en la cara superior del inserto durante el proceso de maquinado. En la micrografía de la figura 28(e) se percibe la partícula dura (región blanca) y el aglutinante (zona más oscura) del metal duro, luego debido al fenómeno termodinámico, se percibe en la sección desgastada de la herramienta de corte que partículas de material de la fundición gris se añadió a la superficie del inserto.

En la figura 29, se muestra el espectro de composición de los elementos presentes, en porcentaje de masa (Wt%) y porcentaje atómico (At%), en la superficie no desgastada del inserto de metal duro sin recubrir. Como es de esperarse, en la superficie de los insertos se identificó un alto contenido (en porcentaje atómico) de carbono, wolframio y titanio del 32.88%, 22.54% y 18.63% respectivamente.

Figura 29. Espectro de composición elemental en la superficie del inserto de metal duro sin recubrimiento y sin desgastar.



<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	05.80	32.88
<i>OK</i>	02.46	10.48
<i>NbL</i>	11.99	08.79
<i>TiK</i>	13.11	18.63
<i>CoK</i>	05.78	06.68
<i>WL</i>	60.86	22.54
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

En la figura 30(a), se aprecia que el recubrimiento no se adhirió muy bien en algunas zonas de la sección de corte del inserto; con la apariencia de haberse desprendido. Adicionalmente, se observa que el desgaste fue crítico porque la marca de desgaste supera las 600 micras. En la figura 30(c), se observa la diferencia entre la rugosidad del recubrimiento depositado en la superficie superior y la lateral del inserto, donde la menor rugosidad se percibe en el revestimiento depositado en la superficie superior del inserto. La figura 30(d) muestra que, debido a la termodinámica del proceso, una mínima cantidad de partículas del material maquinado (fundición gris) es depositado en la cara superior del inserto. En la figura 30(e) se distingue fácilmente la textura del recubrimiento en la sección de corte, mientras que en la figura 30(f) el recubrimiento en la sección de corte se desgastó durante los ensayos repetitivos de torneado de acabado en seco.

En la figura 31, se muestra el espectro de composición química de los elementos presentes, en porcentaje de masa (Wt%) y porcentaje atómico (At%), en la superficie no desgastada del inserto de metal duro recubierto con nitruro de titanio en atmosfera abundante de Ti. De acuerdo a lo anterior, en la superficie de los insertos se detectó un porcentaje atómico de titanio del 59.53% y nitrógeno del 29.25%, además del carbono que proviene del material del inserto.

Figura 30. Micrografías en la punta de un inserto recubierto con TiN en atmosfera abundante de Ti. Superficie sin desgastar (a), (c) y (e), y desgastada (b), (d) y (f). A una magnificación de 200X (a) y (b), de 1000X (c) y (d), y 8000X (e) y (f).

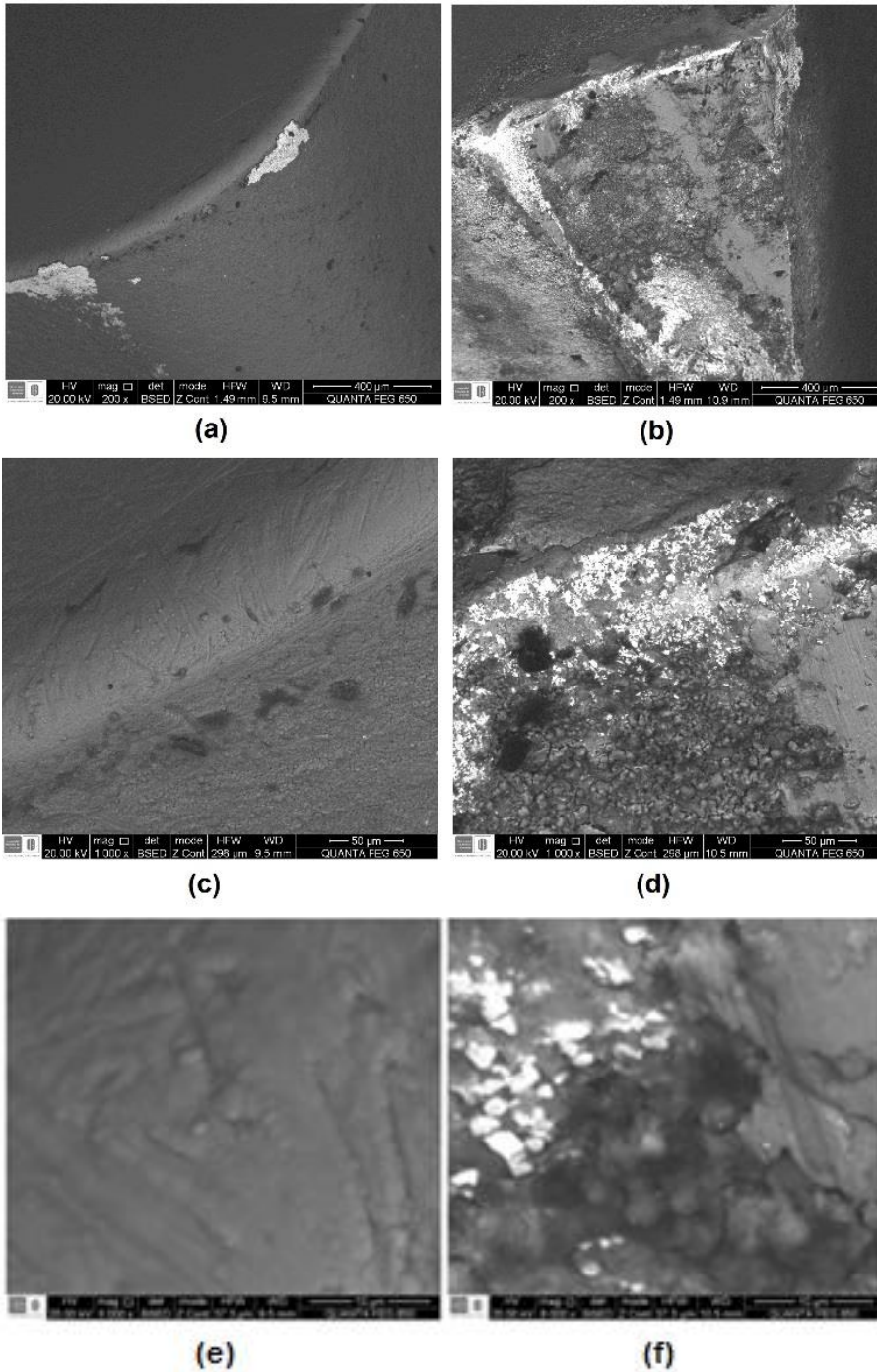
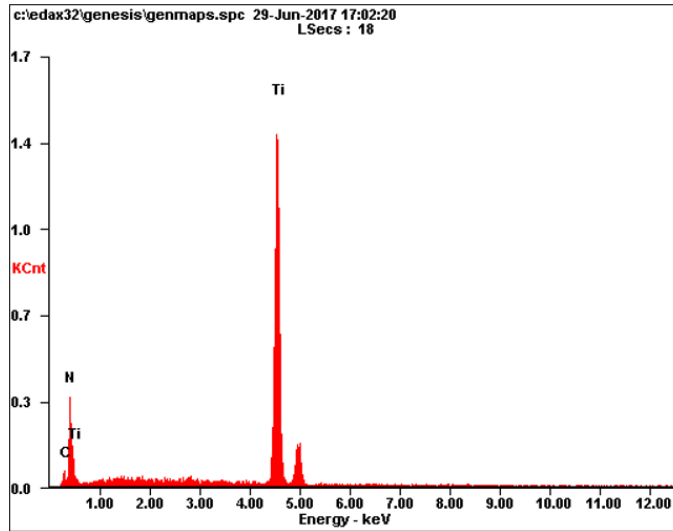


Figura 31. Espectro de composición elemental en la superficie del inserto de metal duro recubierto con nitruro de titanio en atmosfera abundante de Ti y sin desgastar.



<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	03.81	10.82
<i>NK</i>	12.01	29.25
<i>TiK</i>	84.18	59.93
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

En la figura 32(a) se aprecia que el recubrimiento no se adhirió muy bien en algunas regiones de la sección de corte del inserto; con la apariencia de haberse desprendido como ocurrió en la figura 30(a). En la figura 32(b) se observa que el desgaste del recubrimiento en la superficie de corte del inserto fue crítico, dado que la marca del desgaste generado durante los ensayos repetitivos de torneado de acabado en seco supera las 600 micras. La figura 32(c) muestra que el recubrimiento depositado en la superficie superior presenta una menor rugosidad que el depositado en la superficie de corte del inserto, tal como se reportó en la figura 30(c). En la figura 32(e), se identifica una mínima cantidad de fundición gris adherida al recubrimiento depositado en la cara superior del inserto.

El espectro de composición química elemental, en porcentaje de masa (Wt%) y porcentaje atómico (At%), en la superficie superior no desgastada del inserto de metal duro recubierto con nitruro de titanio en atmosfera abundante de N se presenta en la figura 33, donde los porcentajes atómicos de titanio, nitrógeno y carbono detectados fueron del 46.56%, 46.11% y 07.3% respectivamente; no obstante, el carbono corresponde a uno de los elementos del material del inserto.

Figura 32. Micrográficas en la punta de un inserto recubierto con TiN en atmosfera abundante de N. Superficie sin desgastar (a), (c) y (e), y desgastada (b), (d) y (f). A una magnificación de 200X (a) y (b), de 1000X (c) y (d), y 8000X (e) y (f).

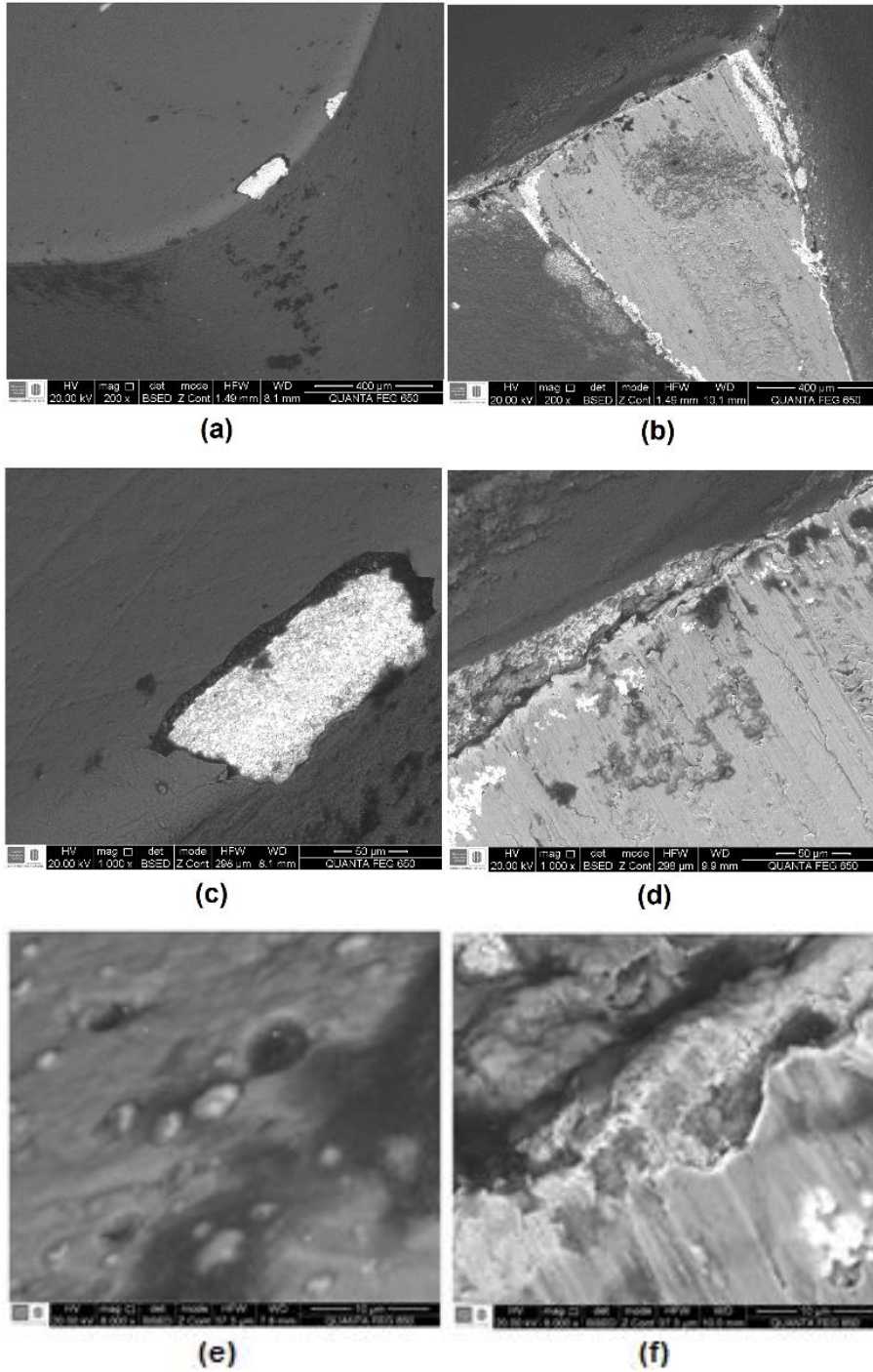
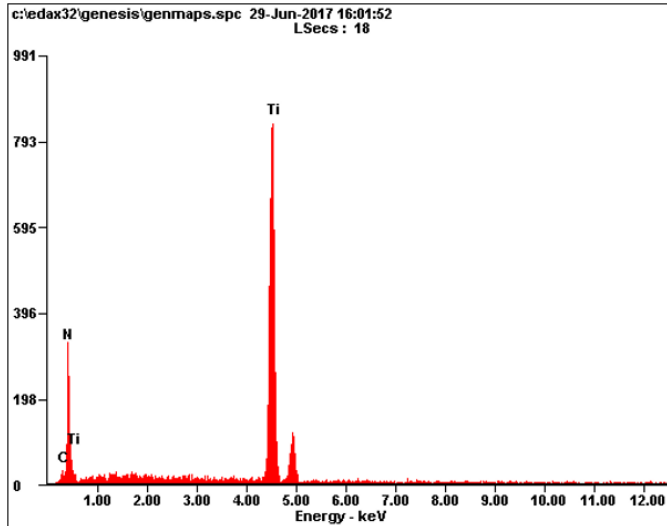


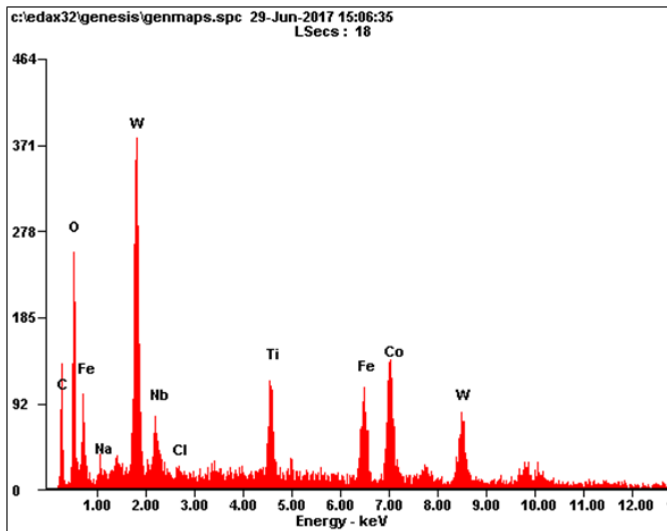
Figura 33. Espectro de composición elemental en la superficie del inserto de metal duro recubierto con nitruro de titanio en atmosfera abundante de N y sin desgastar.



<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	02.97	07.34
<i>NK</i>	21.79	46.11
<i>TiK</i>	75.24	46.56
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

Los espectros de composición química elemental obtenidos por EDX en la zona desgastada de los insertos no recubiertos y recubiertos con TiN por HIPIMS son presentados en las figuras 34, 35 y 36.

Figura 34. Espectro de composición elemental en la superficie desgastada de un inserto de metal duro sin recubrimiento

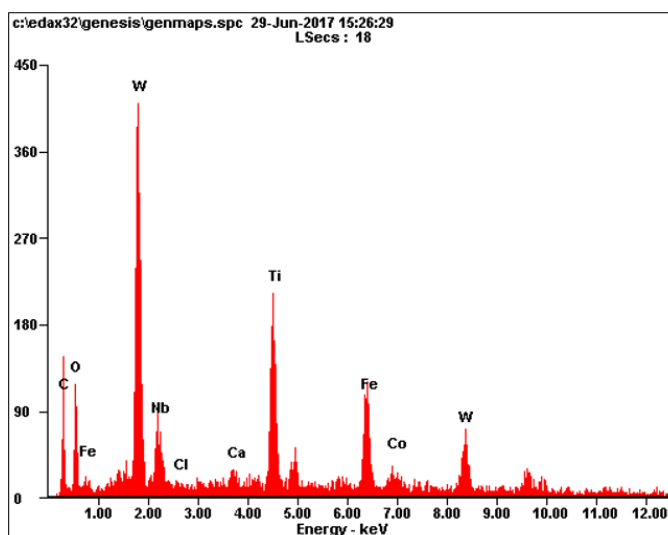


<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	10.00	31.30
<i>OK</i>	15.81	37.15
<i>NaK</i>	00.83	01.36
<i>NbL</i>	04.53	01.83
<i>ClK</i>	00.29	00.31
<i>TiK</i>	05.73	04.50
<i>FeK</i>	08.75	05.89
<i>CoK</i>	15.22	09.71
<i>WL</i>	38.84	07.94
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

En la figura 34 se evidencia la contribución de elementos, de Fe y O, constituyentes del material mecanizado adheridos a la superficie del inserto debido al desgaste generado por la difusión térmica, la abrasión y la erosión; y el excedente asociado al C, W, Nb y Co son los provenientes del inserto de metal duro de calidad UTi20T de la empresa Mitsubishi.

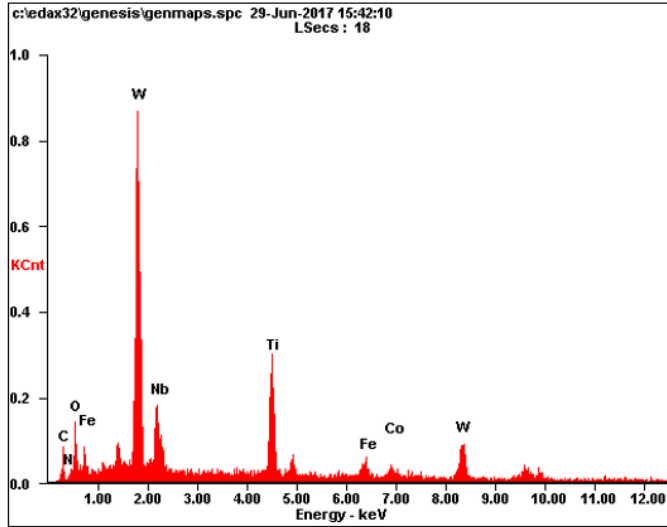
En la figura 35 y 36 se evidencia la contribución de los elementos constituyentes del recubrimiento depositado por HIPIMS en atmosferas abundantes de titanio y nitrógeno respectivamente. La presencia de Ti y N detectado, en porcentajes atómicos, en la superficie desgastada recubierta con TiN en abundante Ti es del 10.73% y 0%, mientras que en la superficie desgastada recubierta con TiN en abundante N es del 14.80% y 3.06% respectivamente. Los porcentajes atómicos de los elementos excedentes asociados al C, W, Nb y Co son los provenientes del inserto mientras que el Fe y el O son los correspondientes al material adherido debido al desgaste por abrasión, difusión térmica y erosión generado durante el mecanizado de la fundición gris.

Figura 35. Espectro de composición elemental en la superficie desgastada de un inserto de metal duro recubierto con nitruro de titanio en atmosfera abundante de titanio.



<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	13.15	42.38
<i>OK</i>	10.03	24.28
<i>NbL</i>	05.19	02.16
<i>ClK</i>	00.14	00.15
<i>CaK</i>	00.79	00.76
<i>TiK</i>	13.28	10.73
<i>FeK</i>	13.21	09.15
<i>CoK</i>	02.41	01.59
<i>WL</i>	41.82	08.81
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

Figura 36. Espectro de composición elemental en la superficie desgastada de un inserto de metal duro recubierto con nitruro de titanio en atmosfera abundante de nitrógeno.



<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	07.38	28.14
<i>NK</i>	00.94	03.06
<i>OK</i>	10.79	30.88
<i>NbL</i>	12.81	06.31
<i>TiK</i>	15.48	14.80
<i>FeK</i>	04.33	03.55
<i>CoK</i>	02.35	01.83
<i>WL</i>	45.91	11.43
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

6. ANÁLISIS EXPERIMENTALES Y ESTADÍSTICOS PARA LA MEDICIÓN DE LOS INSERTOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos durante las pruebas de desgaste de los insertos no recubiertos y recubiertos con TiN por HIPIMS y analizados mediante herramientas estadísticas y matemáticas.

6.1 ADQUISICIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES

Los datos experimentales obtenidos y cálculo de volumen total removido de los insertos con y sin recubrimiento se reportan en la tabla 18.

Tabla 18. Datos experimentales y cálculo de material removido.

		Avance Profundidad Longitud Probeta	0.1mm/rev 0.3 200					
Numero Punta	Tipo Recubrimiento	Velocidad de Corte	N° de Probeta	Diametro inicial mayor	Diametro inicial menor	Pasadas Completoas	Diametro mayor Final	Diametro menor Final
1	Sin Recubrimiento Superficial	115 [m/min]	Probeta 1	80.00 [mm]	80.00 [mm]	6	76.40 [mm]	75.80 [mm]
2		130 [m/min]	Probeta 2	80.00 [mm]	80.00 [mm]	4	77.60 [mm]	77.00 [mm]
3		145 [m/min]	Probeta 3	80.00 [mm]	80.00 [mm]	3	78.20 [mm]	77.60 [mm]
4		160 [m/min]	Probeta 4	80.00 [mm]	80.00 [mm]	2	78.80 [mm]	78.20 [mm]
1	Sin Recubrimiento Superficial	115 [m/min]	Probeta 5	80.00 [mm]	80.00 [mm]	5	77.00 [mm]	76.40 [mm]
2		130 [m/min]	Probeta 6	80.00 [mm]	80.00 [mm]	4	77.60 [mm]	77.00 [mm]
3		145 [m/min]	Probeta 1	75.20 [mm]	75.20 [mm]	3	73.40 [mm]	72.80 [mm]
4		160 [m/min]	Probeta 2	77.00 [mm]	77.00 [mm]	2	75.80 [mm]	75.20 [mm]
1	Recubrimiento de TiN Rico en Titanio	115 [m/min]	Probeta 3	77.60 [mm]	77.60 [mm]	7	73.40 [mm]	72.80 [mm]
2		130 [m/min]	Probeta 4	78.20 [mm]	78.20 [mm]	5	75.20 [mm]	74.60 [mm]
3		145 [m/min]	Probeta 6	77.00 [mm]	77.00 [mm]	4	74.60 [mm]	74.00 [mm]
4		160 [m/min]	Probeta 5	76.40 [mm]	76.40 [mm]	3	74.60 [mm]	74.00 [mm]
1	Recubrimiento de TiN Rico en Titanio	115 [m/min]	Probeta 1	72.80 [mm]	72.80 [mm]	8	68.00 [mm]	67.40 [mm]
2		130 [m/min]	Probeta 2	75.20 [mm]	75.20 [mm]	3	73.40 [mm]	72.80 [mm]
3		145 [m/min]	Probeta 3	72.80 [mm]	72.80 [mm]	5	69.80 [mm]	69.20 [mm]
4		160 [m/min]	Probeta 4	74.60 [mm]	74.60 [mm]	3	72.80 [mm]	72.20 [mm]
1	Repetición Pruebas de TiN Rico en Titanio	115 [m/min]	Probeta 5	74.00 [mm]	74.00 [mm]	8	69.20 [mm]	68.60 [mm]
2		130 [m/min]	Probeta 6	74.00 [mm]	74.00 [mm]	5	71.00 [mm]	70.40 [mm]
1	Recubrimiento de TiN Rico en Nitrogeno	115 [m/min]	Probeta 1	66.80 [mm]	66.80 [mm]	11	60.20 [mm]	60.20 [mm]
2		130 [m/min]	Probeta 2	72.80 [mm]	72.80 [mm]	6	69.20 [mm]	68.60 [mm]
3		145 [m/min]	Probeta 3	69.20 [mm]	69.20 [mm]	6	65.60 [mm]	65.00 [mm]
4		160 [m/min]	Probeta 4	72.20 [mm]	72.20 [mm]	4	69.80 [mm]	69.20 [mm]
1	Recubrimiento de TiN Rico en Nitrogeno	115 [m/min]	Probeta 5	68.60 [mm]	68.60 [mm]	10	62.60 [mm]	62.00 [mm]
2		130 [m/min]	Probeta 5	62.00 [mm]	62.00 [mm]	8	57.20 [mm]	56.60 [mm]
3		145 [m/min]	Probeta 2	68.60 [mm]	68.60 [mm]	6	65.00 [mm]	64.40 [mm]
4		160 [m/min]	Probeta 4	69.20 [mm]	69.20 [mm]	5	66.20 [mm]	65.60 [mm]

Avance 0,1mm/rev
 Profundidad 0.3
 Longitud Probeta 200

Numero Punta	Tipo Recubrimiento	Longitud Final Ultima Pasada	Volumen Total Removido	Corriente	Volumen no mecanizado	Volumen total corregido
1	Sin Recubrimiento Superficial	40.71 [mm]	91362.155 [mm³]	13,70 [A]	687.907 [mm³]	90674.248 [mm³]
2		110.20 [mm]	67442.417 [mm³]	13,80 [A]	308.987 [mm³]	67133.430 [mm³]
3		168.20 [mm]	57079.209 [mm³]	14,20 [A]	174.747 [mm³]	56904.462 [mm³]
4		107.70 [mm]	37901.315 [mm³]	15,10 [A]	78.110 [mm³]	37823.205 [mm³]
1	Sin Recubrimiento Superficial	192.00 [mm]	87864.017 [mm³]	13,70 [A]	687.900 [mm³]	87176.117 [mm³]
2		80.10 [mm]	65249.521 [mm³]	13,90 [A]	308.987 [mm³]	64940.534 [mm³]
3		189.60 [mm]	55078.305 [mm³]	14,00 [A]	1041.743 [mm³]	54036.562 [mm³]
4		176.60 [mm]	41368.557 [mm³]	14,90 [A]	451.170 [mm³]	40917.388 [mm³]
1	Recubrimiento de TiN Rico en Titanio	168.20 [mm]	111208.323 [mm³]	14,00 [A]	1942.901 [mm³]	109265.422 [mm³]
2		30.10 [mm]	74413.028 [mm³]	13,50 [A]	1035.397 [mm³]	73377.631 [mm³]
3		168.30 [mm]	68937.407 [mm³]	14,10 [A]	1043.295 [mm³]	67894.112 [mm³]
4		82.20 [mm]	48450.503 [mm³]	15,10 [A]	835.625 [mm³]	47614.878 [mm³]
1	Recubrimiento de TiN Rico en Titanio	175.70 [mm]	117371.643 [mm³]	13,30 [A]	4422.986 [mm³]	112948.658 [mm³]
2		183.70 [mm]	54671.823 [mm³]	13,70 [A]	1041.743 [mm³]	53630.080 [mm³]
3		79.60 [mm]	72412.812 [mm³]	13,90 [A]	2541.417 [mm³]	71181.443 [mm³]
4		176.20 [mm]	53716.176 [mm³]	14,70 [A]	1142.144 [mm³]	52574.032 [mm³]
1	Repetición Pruebas de TiN Rico en Titanio	158.40 [mm]	118256.509 [mm³]	13,40 [A]	3934.761 [mm³]	114321.749 [mm³]
2		93.10 [mm]	74533.364 [mm³]	13,50 [A]	2227.417 [mm³]	72305.947 [mm³]
1	Recubrimiento de TiN Rico en Nitrogeno	0.00 [mm]	131664.456 [mm³]	13,20 [A]	9421.900 [mm³]	122242.556 [mm³]
2		158.70 [mm]	90604.778 [mm³]	13,40 [A]	3140.061 [mm³]	87464.717 [mm³]
3		91.90 [mm]	81883.671 [mm³]	14,00 [A]	4174.782 [mm³]	77708.889 [mm³]
4		150.10 [mm]	63364.768 [mm³]	14,60 [A]	2095.340 [mm³]	61269.428 [mm³]
1	Recubrimiento de TiN Rico en Nitrogeno	181.70 [mm]	134322.165 [mm³]	13,20 [A]	8325.367 [mm³]	125996.797 [mm³]
2		52.00 [mm]	92663.503 [mm³]	13,50 [A]	7966.530 [mm³]	84696.973 [mm³]
3		125.00 [mm]	83171.504 [mm³]	14,10 [A]	4334.832 [mm³]	78836.672 [mm³]
4		55.10 [mm]	67228.126 [mm³]	14,70 [A]	3412.543 [mm³]	63815.583 [mm³]

6.2 APLICACIÓN DE TAYLOR PARA LA VIDA ÚTIL DE LOS INSERTOS

En esta sección se confirma la influencia de la velocidad de corte en la vida útil en servicio de las herramientas de corte, y la adecuación del experimento a la ecuación de Taylor en los insertos no recubiertos y recubiertos por HIPIMS.

6.2.1 Análisis de los datos experimentales. La ecuación de Taylor permite estimar la vida útil en servicio de la herramienta de corte, por tal motivo (ver ecuación 17), la variable dependiente medida en el experimento, se convierte mediante la ecuación 18 en la tasa de remoción de material (MRR) en función de la vida útil de la herramienta en minutos y no en volumen de material removido.

$$V_c * T^{\frac{1}{k}} = C \quad (17)$$

$$MRR = a_p * f * V_c \quad (18)$$

Donde, MRR está en función de la velocidad de corte de cada experimento. En la tabla 19 se muestran los valores de la tasa de remoción de material, obtenidos de la

ecuación 17 teniendo en cuenta los parámetros establecidos en los ensayos de mecanizado por cilindrado de acabado en seco de la fundición gris, realizado con insertos no recubiertos y recubiertos con TiN, a velocidades de corte de 115 m/min , 130 m/min , 145 m/min y 160 m/min .

Tabla 19. Valores de rata de remoción de material en función de las velocidades de corte.

Variable		$MRR(\text{mm}^3/\text{min})$			
$a_p(\text{mm})$	$f(\text{mm}/\text{rev})$	115 m/min	130 m/min	145 m/min	160 m/min
0.1	0.10	3450.00	3900.00	4350.00	4800.00

En la tabla 20 se registran los valores experimentales obtenidos de la vida útil en servicio de la herramienta de corte en función de la velocidad de corte y calidad superficial del inserto.

Tabla 20. Vida útil en de los insertos en función de la velocidad de corte.

Velocidad	Tiempo de vida útil en servicio de los insertos (minutos)		
	Sin recubrimiento	Recubrimiento de TiN en atmosfera de Ti	Recubrimiento de TiN en atmosfera de N
115 m/min	26.28239	32.73874	35.43263
	25.26844	33.13674	36.52081
130 m/min	17.21370	18.81478	22.42685
	16.65142	18.53999	21.71717
145 m/min	13.08149	15.60784	17.86411
	12.42220	16.36355	18.12337
160 m/min	7.879834	9.91975	12.76446
	8.524456	10.95292	13.29491

6.2.1. Cálculo de la ecuación de Taylor. Estableciendo una marca de desgaste crítico aproximado a 1.2mm y mediante el análisis de regresión lineal simple ajustado por el método de mínimos cuadrados especificado en la norma ISO 3685⁸⁸, se calcula la ecuación experimental de Taylor correspondiente a la vida útil en servicio de las herramientas de corte (ver ecuación 17).

Las ecuaciones presentadas ofrecen precisión, en las pruebas de mecanizado de acabado superficial, con un avance de 0.1 mm/rev , profundidad de corte de 0.3 mm , y como criterio de desgaste la ruptura del cráter de la herramienta de corte; condiciones que determinan un pobre acabado superficial en el mecanizado.

6.2.1.1 Ecuación de Taylor del inserto sin recubrimiento. En la tabla 21, se reporta el análisis de mínimos cuadrados recomendada según la norma ISO 3685⁸⁸ en el cálculo de la ecuación de Taylor de los insertos de calidad superficial de metal duro sin recubrimiento.

Tabla 21. Análisis de mínimos cuadrados de los resultados experimentales obtenidos con el inserto sin recubrimiento.

Inserto sin Recubrimiento							
Observacion N°	V_c [m/min]	T_c [minutos]	$X = \text{Log } V_c$	$Y = \text{Log } T_c$	XY	X^2	Y^2
1	115	26,2824	2,06069784	1,419665021	2,925500642	4,246475589	2,015448771
2	115	25,2684	2,06069784	1,402577743	2,890288926	4,246475589	1,967224326
3	130	17,2137	2,113943352	1,23587423	2,612568112	4,468756497	1,527385112
4	130	16,6514	2,113943352	1,221450754	2,582077701	4,468756497	1,491941943
5	145	13,0815	2,161368002	1,116657546	2,413507888	4,671511641	1,246924074
6	145	12,4222	2,161368002	1,094198517	2,364965663	4,671511641	1,197270395
7	160	7,8798	2,204119983	0,896515195	1,976027055	4,858144898	0,803739494
8	160	8,5245	2,204119983	0,930668915	2,051305953	4,858144898	0,86614463
			$\sum X =$	$\sum Y =$	$\sum XY =$	$\sum X^2 =$	$\sum Y^2 =$
			17,08025836	9,31760792	19,81624194	36,48977725	11,11607874
			$(\sum X)^2 =$	$\sum X * \sum Y =$			
			291,7352255	159,1471505			
Observaciones total			$\frac{1}{N}(\sum X)^2 =$	$\frac{1}{N} * \sum X * \sum Y =$			
N=	8		36,46690318	19,89339382			

El desarrollo matemático, utilizado para calcular las constantes n y C de la ecuación de Taylor se describe a continuación:

$$\bar{X} = \frac{\sum X}{N} = 2,1350 \quad (19)$$

$$a = \bar{Y} = \frac{\sum Y}{N} = 1,1647 \quad (20)$$

$$k = \frac{\sum XY - \frac{\sum X * \sum Y}{N}}{\sum X^2 - \frac{(\sum X)^2}{N}} = -3,3729 \quad (21)$$

$$n = -1/k = 0,2965 \quad (22)$$

$$\text{Log}(C) = \bar{X} - \frac{\bar{Y}}{k} = 2,4803 \quad (23)$$

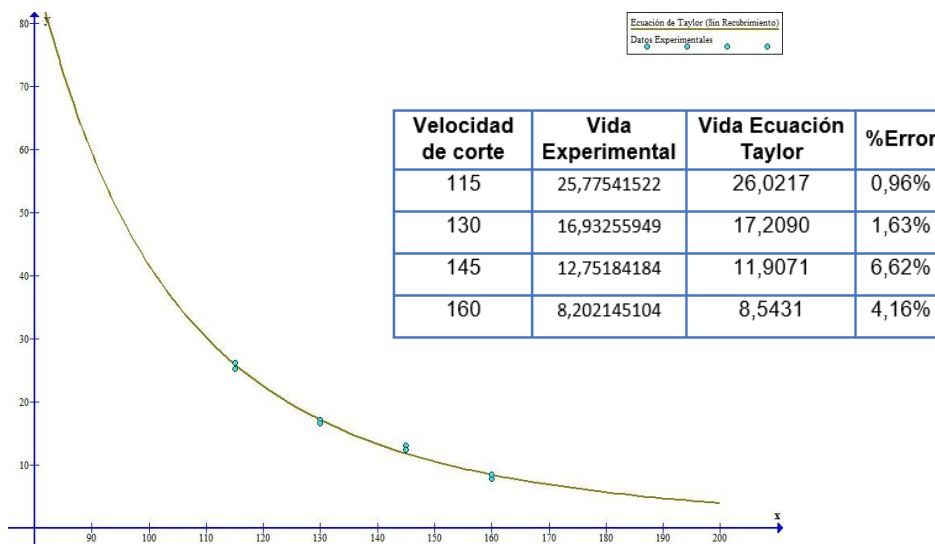
$$C = 302,235 \quad (24)$$

$$V_c * T^{\frac{1}{k}} = C \quad (25)$$

$$V_c * T^{0,2965} = 302,235 \quad (26)$$

De acuerdo a la información reportada en la tabla 21 y al desarrollo matemático descrito anteriormente, se presenta en la figura 37 el comportamiento de la ecuación de Taylor (ver ecuación 26) encontrada para las herramientas de corte SPMN 120408 con calidad superficial de metal duro sin recubrimiento.

Figura 37. Comportamiento de la ecuación de Taylor del inserto sin recubrimiento.



En la figura 37 se aprecia que la ecuación de Taylor se ajusta de manera conveniente a los valores experimentales reales de la vida efectiva, con bajos errores de aproximación y error puntual máximo de 4,16%, la cual puede considerarse como la ecuación adecuada que permite estimar la vida efectiva de la herramienta de corte en función de la velocidad de corte.

6.2.1.2 Ecuación de Taylor del inserto con recubrimiento de nitruro de titanio en atmosfera abundante de titanio. El análisis de mínimos cuadrados utilizado en el cálculo de la ecuación de Taylor a partir de los datos experimentales adquiridos en el mecanizado de la fundición gris con los insertos recubiertos con TiN en atmosfera abundante de Ti son presentados en la tabla 22.

Tabla 22. Análisis de mínimos cuadrados de los resultados experimentales obtenidos con el inserto recubierto con TiN en abundante Ti.

Inserto con Recubrimiento de TiN rico en Titanio							
Observacion N°	V_c [m/min]	T_c [minutos]	$X = \text{Log } V_c$	$Y = \text{Log } T_c$	XY	X^2	Y^2
1	115	32,7387	2,06069784	1,51506143	3,122083817	4,246475589	2,295411138
2	115	33,1367	2,06069784	1,520309256	3,132898	4,246475589	2,311340234
3	130	18,8148	2,113943352	1,274499606	2,69421997	4,468756497	1,624349246
4	130	18,54	2,113943352	1,26810973	2,680712133	4,468756497	1,608102287
5	145	15,6078	2,161368002	1,193341691	2,579250547	4,671511641	1,424064392
6	145	16,3635	2,161368002	1,213876201	2,623633179	4,671511641	1,473495431
7	160	9,9197	2,204119983	0,996498538	2,19640234	4,858144898	0,993009336
8	160	10,9529	2,204119983	1,039529123	2,291246912	4,858144898	1,080620797
			$\sum X =$	$\sum Y =$	$\sum XY =$	$\sum X^2 =$	$\sum Y^2 =$
			17,08025836	10,02122557	21,3204469	36,48977725	12,81039286
			$(\sum X)^2 =$	$\sum X * \sum Y =$			
			291,7352255	171,1651219			
Observaciones total			$\frac{1}{N}(\sum X)^2 =$	$\frac{1}{N} * \sum X * \sum Y =$			
N=	8		36,46690318	21,39564023			

El desarrollo matemático, utilizado para calcular las constantes n y C de la ecuación de Taylor de los insertos recubiertos con TiN en abundante Ti, se describe a continuación:

$$\bar{X} = \frac{\sum X}{N} = 2,1350 \quad (27)$$

$$a = \bar{Y} = \frac{\sum Y}{N} = 1,2526 \quad (28)$$

$$k = \frac{\sum XY - \frac{\sum X * \sum Y}{N}}{\sum X^2 - \frac{(\sum X)^2}{N}} = -3,2873 \quad (29)$$

$$n = -1/k = 0,3042 \quad (30)$$

$$\text{Log}(C) = \bar{X} - \frac{\bar{Y}}{k} = 2,5161 \quad (31)$$

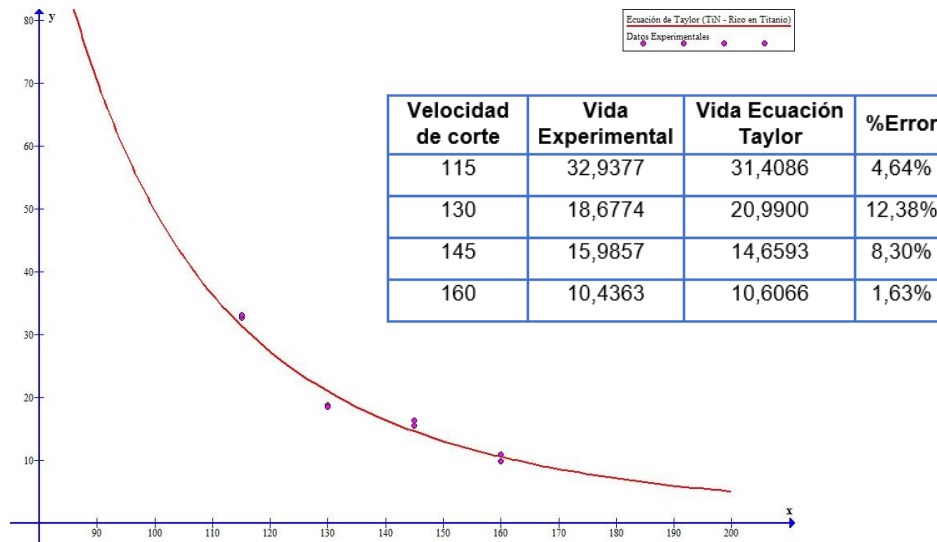
$$C = 328,1708 \quad (32)$$

$$V_c * T^{-\frac{1}{k}} = C \quad (33)$$

$$V_c * T^{0,3042} = 328,1708 \quad (34)$$

Teniendo en cuenta los valores reportados en la tabla 22 y al desarrollo matemático descrito anteriormente, se presenta en la figura 38 el comportamiento de la ecuación de Taylor (ver ecuación 34) encontrada para las herramientas de corte SPMN 120408 con calidad superficial de metal duro recubiertas con TiN en atmosfera abundante de Ti.

Figura 38. Comportamiento de la ecuación de Taylor del inserto recubierto con TiN en abundante Ti.



El comportamiento de la ecuación de Taylor presentado en la figura 38, se ajusta muy bien a los valores experimentales reales de la vida efectiva, con bajos errores de aproximación, aunque a una velocidad de 130 m/min , la curva se aleja con un error aproximado del 12,38%, lo que puede considerarse como la ecuación conveniente que permite estimar la vida efectiva del inserto recubierto con TiN en abundante Ti en función de la velocidad de corte.

6.2.1.3 Ecuación de Taylor del inserto con recubrimiento de nitruro de titanio en atmosfera abundante de nitrógeno. El análisis de mínimos cuadrados de los datos experimentales adquiridos en el maquinado de la fundición gris con los insertos recubiertos con TiN en atmosfera abundante de N, son reportados en la tabla 23.

Tabla 23. Análisis de mínimos cuadrados de los resultados experimentales obtenidos con el inserto recubierto con TiN en abundante N.

Inserto con Recubrimiento de TiN rico en Nitrogeno							
Observacion N°	V_c [m/min]	T_c [minutos]	$X = \text{Log } V_c$	$Y = \text{Log } T_c$	XY	X^2	Y^2
1	115	35,4326	2,06069784	1,549403021	3,19285146	4,246475589	2,400649723
2	115	36,5208	2,06069784	1,562540282	3,219923385	4,246475589	2,441532134
3	130	22,4268	2,113943352	1,35076731	2,855445576	4,468756497	1,824572326
4	130	21,7172	2,113943352	1,336803831	2,825927572	4,468756497	1,787044482
5	145	17,8641	2,161368002	1,251981141	2,705991978	4,671511641	1,567456778
6	145	18,1234	2,161368002	1,258239676	2,719518974	4,671511641	1,583167082
7	160	12,7645	2,204119983	1,106003808	2,437765093	4,858144898	1,223244423
8	160	13,2949	2,204119983	1,123685075	2,476736728	4,858144898	1,262668148
			$\sum X =$	$\sum Y =$	$\sum XY =$	$\sum X^2 =$	$\sum Y^2 =$
			17,08025836	10,53942414	22,43416077	36,48977725	14,0903351
			$(\sum X)^2 =$	$\sum X * \sum Y =$			
			291,7352255	180,0160873			
Observaciones total			$\frac{1}{N}(\sum X)^2 =$	$\frac{1}{N} * \sum X * \sum Y =$			
N= 8			36,46690318	22,50201091			

El desarrollo matemático, utilizado en el cálculo de las constantes n y C de la ecuación de Taylor de los insertos recubiertos con nitruro de titanio en atmosfera abundante de nitrógeno, se describe a continuación:

$$\bar{X} = \frac{\sum X}{N} = 2,1350 \quad (35)$$

$$a = \bar{Y} = \frac{\sum Y}{N} = 1,3174 \quad (36)$$

$$k = \frac{\sum XY - \frac{\sum X * \sum Y}{N}}{\sum X^2 - \frac{(\sum X)^2}{N}} = -2,9662 \quad (37)$$

$$n = -1/k = 0,3371 \quad (38)$$

$$\text{Log } (C) = \bar{X} - \frac{\bar{Y}}{k} = 2,5792 \quad (39)$$

$$C = 379,4644 \quad (40)$$

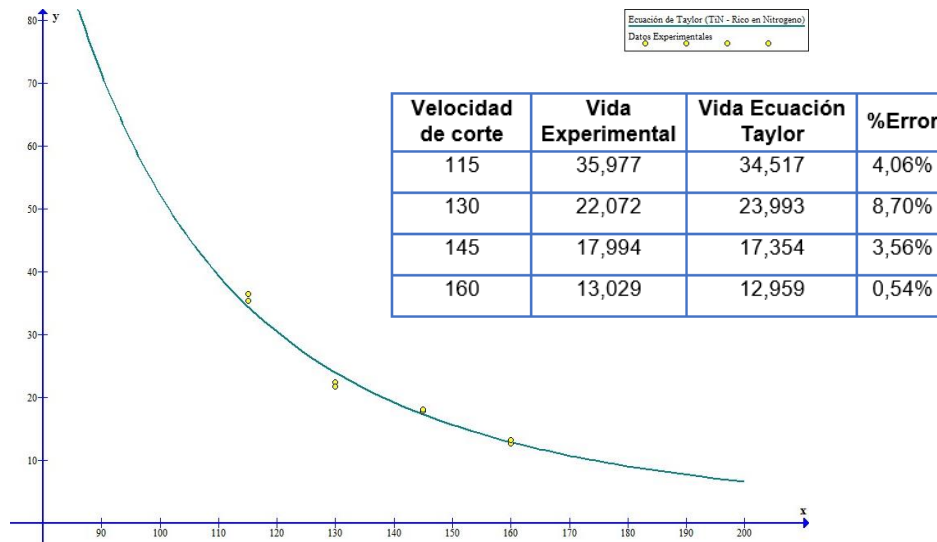
$$V_c * T^{-\frac{1}{k}} = C \quad (41)$$

$$V_c * T^{0,3371} = 379,4644$$

(42)

De acuerdo a los valores reportados en la tabla 23 y al desarrollo matemático descrito anteriormente, se presenta en la figura 39 el comportamiento de la ecuación de Taylor (ver ecuación 42) encontrada para las herramientas de corte SPMN 120408 con calidad superficial de metal duro recubiertas con nitruro de titanio en atmosfera abundante de nitrógeno.

Figura 39. Comportamiento de la ecuación de Taylor del inserto recubierto con TiN en abundante N.



En la figura 39 se muestra el comportamiento de la ecuación de Taylor, la cual se ajusta muy bien a los valores experimentales reales de la vida efectiva, con un error máximo de aproximación de 8,7%, lo que puede considerarse como la ecuación favorable que permite estimar la vida efectiva del inserto recubierto con TiN en abundante atmosfera de nitrógeno en función de la velocidad de corte.

El desarrollo matemático y estadístico completo de Taylor se encuentra registrado en el anexo H.

6.3 ANÁLISIS DE VARIANZA ANOVA

La influencia de la calidad superficial del inserto, en la vida útil en servicio en función del volumen removido, fue analizado mediante la estadística ANOVA, Tukey, y modelos matemáticos.

6.3.1 Planteamiento del problema. El análisis de varianza factorial fue realizado a los valores de desgaste obtenidos de los insertos en función del volumen de material removido, en los ensayos repetitivos de mecanizado por torneado de acabado en seco de la fundición gris, distribuidos en 24 experimentos aleatorios, con variables controladas, tales como la calidad superficial o tipo de recubrimiento y velocidades de corte. La influencia de los parámetros establecidos en el ensayo, en la vida útil en servicio de la herramienta de corte fue analizada a un desgaste estándar, donde un cambio en la calidad superficial de la pieza a mecanizar fue observado.

- Factor A: Influencia de la calidad superficial o tipo de recubrimiento de los insertos en la vida de la herramienta. La descripción de las características superficiales de los insertos evaluados en el ensayo repetitivo de mecanizado por torneado de acabado en seco de la fundición gris son presentadas en la tabla 24.

Tabla 24. Descripción de calidades superficiales de los insertos.

Calidad Superficial	Descripción
Sin recubrimiento	Insertos de metal duro sin modificación superficial.
Recubrimiento 1	Inserto de metal duro modificado superficial, mediante la técnica HIPIMS, con Nitruro de titanio en una atmosfera abundante de titanio.
Recubrimiento 2	Inserto de metal duro modificado superficial, mediante la técnica HIPIMS, con Nitruro de titanio en una atmosfera abundante de nitrógeno.

- Factor B: Influencia de la velocidad de corte en la vida útil en servicio de la herramienta de corte. La descripción respecto a la velocidad de corte

establecida en los insertos evaluados en el ensayo repetitivo de mecanizado por torneado de acabado en seco de la fundición gris es presenta en la tabla 25.

Tabla 25. Descripción de las velocidades de corte establecidas en el experimento.

Tipo de Velocidad	Descripción
Velocidad 1	Prueba de torneado con una velocidad de corte de 115 m/min
Velocidad 2	Prueba de torneado con una velocidad de corte de 130 m/min
Velocidad 3	Prueba de torneado con una velocidad de corte de 145 m/min
Velocidad 4	Prueba de torneado con una velocidad de corte de 160 m/min

6.3.2 Desgaste de los insertos en función del material removido. De las pruebas de mecanizado, es de interés para el análisis de varianza factorial el volumen total removido, durante la vida efectiva de los insertos, llevados a su desgaste estándar registrados en la tabla 26.

Tabla 26. Experimentos de medición de desgaste en función del material removido.

Velocidad	Volumen total removido en los insertos (mm^3)		
	Sin recubrimiento	Recubrimiento 1	Recubrimiento 2
115 m/min	90674.248	112948.658	122242.556
	87176.117	114321.750	125996.800
130 m/min	67133.430	73377.631	87464.717
	64940.534	72305.947	84696.973
145 m/min	56904.462	67894.112	77708.889
	50036.562	71181.443	78836.672
160 m/min	37823.205	47614.818	61269.428
	40917.388	52574.032	63815.583

6.3.3 Planteamiento de hipótesis. Las hipótesis del experimento factorial se establecen con el propósito de determinar la varianza de los resultados de interés,

comparando las calidades superficiales y los parámetros de corte usados en el ensayo de maquinado por torneado en seco de la fundición gris.

Hipótesis factoriales:

Factor A

H₀: Con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$, todas las calidades superficiales de los insertos proporcionan el mismo resultado en la resistencia al desgaste y vida útil en servicio de la herramienta de corte.

H₁: Con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$, por lo menos una calidad superficial de los insertos, proporciona un resultado diferente en la resistencia al desgaste y vida útil en servicio de los insertos.

Factor B

H₀: Con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$, todas las velocidades de corte proporcionan el mismo resultado en la resistencia al desgaste y vida útil en servicio de la herramienta de corte.

H₁: Con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$, por lo menos una velocidad de corte proporciona un resultado diferente en la resistencia al desgaste y en la vida útil en servicio de los insertos.

Interacción

H₀: Con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$, no hay interacción entre los factores.

H₁: Con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$, existe interacción entre los factores.

6.3.4 Análisis varianza factorial de dos factores. En el diseño factorial en cada réplica del experimento, fue estudiado en todas las posibles combinaciones entre los niveles de los factores que le involucran. En caso normal, sea y_{ijk} la respuesta observada cuando el factor A tiene el nivel i -ésimo ($i = 1, 2, 3, \dots, a$) y el factor B

tiene el nivel j -ésimo ($j = 1, 2, 3, \dots, b$) en la réplica k -ésima ($k = 1, 2, 3, \dots, n$). En general, el experimento factorial de dos factores aparecerá como se reporta en la tabla 27.

Tabla 27. Arreglo general de un diseño factorial de dos factores.

		Factor B				Total
		1	2	...	b	
Factor A	1	$y_{111}, y_{112}, \dots, y_{11n}$	$y_{121}, y_{122}, \dots, y_{12n}$	...	$y_{1b1}, y_{1b2}, \dots, y_{1bn}$	$y_{1\cdot\cdot}$
	2	$y_{211}, y_{212}, \dots, y_{21n}$	$y_{221}, y_{222}, \dots, y_{22n}$	...	$y_{2b1}, y_{2b2}, \dots, y_{2bn}$	$y_{2\cdot\cdot}$
	⋮					
	a	$y_{a11}, y_{a12}, \dots, y_{a1n}$	$y_{a21}, y_{a22}, \dots, y_{a2n}$	...	$y_{ab1}, y_{ab2}, \dots, y_{abn}$	$y_{a\cdot\cdot}$
Total	$y_{\cdot 1\cdot}$	$y_{\cdot 2\cdot}$	...	$y_{\cdot b\cdot}$	$y_{\cdot\cdot\cdot}$	

En la tabla 27, el orden de las abn observaciones se realiza al azar, por lo que este diseño es un diseño completamente aleatorizado, luego el modelo de los efectos de un experimento factorial es como se define en la ecuación (43):

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad \left\{ \begin{array}{l} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, b \\ k = 1, 2, \dots, n \end{array} \right. \quad (43)$$

Donde, μ es el efecto promedio global, τ_i es el efecto del nivel i -ésimo del factor A de los renglones, β_j es el efecto del nivel j -ésimo del factor B de las columnas, $(\tau\beta)_{ij}$ es el efecto de la interacción entre τ_i y β_j , y ε_{ijk} es un componente aleatorio del error.

De acuerdo a lo anterior, se supone que ambos factores son fijos, y los efectos de los tratamientos se definen como las desviaciones de la medida global, luego si $y_{i \dots}$ denota el total de las observaciones bajo el nivel i -ésimo del factor A, $y_{j \dots}$ el total de observaciones bajo el nivel j -ésimo del factor B, $y_{ij \dots}$ el total de observaciones de la celda ij -ésima, y y_{\dots} el gran total de todas las observaciones, entonces matemáticamente las podemos expresar como:

$$y_{i \dots} = \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk} \quad (44)$$

$$y_{j \dots} = \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^n y_{ijk} \quad (45)$$

$$y_{ij \dots} = \sum_{k=1}^n y_{ijk} \quad (46)$$

$$y_{\dots} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk} \quad (47)$$

La ecuación 48 describe simbólicamente la suma de cuadrados total como la suma de los cuadrados debido a las filas o factor A, de las columnas o factor B, de las interacciones entre A y B y de la suma de cuadrados debido al error.

$$SS_T = SS_A + SS_B + SS_{AB} + SS_{Error} \quad (48)$$

En la tabla 28, se reporta el número de grados de libertad asociado con cada suma de cuadrados.

Tabla 28. Grados de libertad, experimento factorial.

Efecto	Grados de libertad
A	$a - 1$
B	$b - 1$
Interacción AB	$(a - 1)(b - 1)$
Error	$ab(n - 1)$
Total	$abn - 1$

La suma de cuadrados total se calcula con la siguiente ecuación:

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn} \quad (49)$$

Donde las sumas de cuadrados de los efectos principales son determinados por las siguientes expresiones:

$$SS_A = \frac{1}{bn} \sum_{i=1}^a y_{i...}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn} \quad (50)$$

$$SS_B = \frac{1}{an} \sum_{j=1}^b y_{j...}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn} \quad (51)$$

Y la suma de cuadrados de la interacción está dada por la ecuación (52):

$$SS_{AB} = SS_{Subtotales} - SS_A - SS_B \quad (52)$$

Donde:

$$SS_{Subtotales} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b y_{ij}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn} \quad (53)$$

No obstante, la suma de cuadrados del error puede calcularse por sustracción por medio de la siguiente expresión:

$$SS_E = SS_T - SS_{AB} - SS_A - SS_B \quad (54)$$

O por la ecuación:

$$SS_E = SS_T - SS_{Subtotales} \quad (55)$$

En la tabla 29 se observa la disposición general de los datos en un análisis de varianza factorial de dos factores, que tiene como propósito calcular el valor de los coeficientes de cuadrados F_0 para cada factor y la interacción de los mismo, con el fin de poder compararlos con los valores F_t que ofrece la tabla estadística ANOVA, con significancia de $\alpha = 0.05$, la cual valida o rechaza las hipótesis planteadas.

Tabla 29. Modelo factorial ANOVA para dos factores.

Variables	Suma Cuadrado	Grados de Libertad	Cuadrado Medio	F_0
Factor A	SS_A	$a - 1$	$MS_A = \frac{SS_A}{a - 1}$	$\frac{MS_A}{MS_E}$
Factor B	SS_B	$b - 1$	$MS_B = \frac{SS_B}{b - 1}$	$\frac{MS_B}{MS_E}$
Interacción	SS_{AB}	$(a - 1)(b - 1)$	$MS_{AB} = \frac{SS_{AB}}{(a - 1)(b - 1)}$	$\frac{MS_{AB}}{MS_E}$
Error	SS_E	$ab(n - 1)$		
Total	SS_T	$abn - 1$	$MS_E = \frac{SS_E}{ab(n - 1)}$	

A continuación, se realiza el análisis estadístico y arreglo general del experimento factorial de los datos obtenidos en los ensayos de mecanizado, por torneado de acabado en seco de la fundición gris, con los insertos no recubiertos y recubiertos con TiN, donde:

- **Las variables independientes son:** Calidad superficial (Factor A) y Velocidad de corte (Factor B).
- **La variable dependiente es:** El volumen total de material removido, durante la vida útil en servicio de los insertos. En la tabla 30 se reporta los valores correspondientes a las cantidades de volumen removido durante el mecanizado realizado con los insertos no recubiertos y recubiertos a diferentes velocidades.

Tabla 30. Datos de vida de la herramienta en volumen de material removido.

Calidad Superficial	VOLUMEN DE MATERIAL REMOVIDO (mm ³)												
	Velocidad de Corte (m/min)												
	V1=115			V2=130			V3=145			V4=160			
		Total		Total		Total		Total		Total	Yi..		
Sin recubrimiento	90674,248	87176,12	177850,37	67133,43	64940,53	132073,96	56904,46	54036,56	110941,02	37823,21	40917,39	78740,593	499605,946
Recubrimiento 1	112948,66	114321,7	227270,41	73377,63	72305,95	145683,58	67894,11	71181,44	139075,56	47614,82	52574,03	100188,85	612218,39
Recubrimiento 2	122242,56	125996,8	248239,35	87464,72	84696,97	172161,69	77708,89	78836,67	156545,56	61269,43	63815,58	125085,01	702031,615
Yj..		653360,13		449919,23		406562,14		304014,45	1813855,9510		Y...=		

La disposición de los datos y análisis de varianza del experimento factorial mediante la suma de cuadrados se presenta en la tabla 31.

Tabla 31. ANOVA, experimento factorial.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados medios	F_0
Calidad superficial	257838724.9438	2	1285919362.472	300.2488141
Velocidad	10750996240.2091	3	3583665413.403	836.7486499
Interacción	217188448.9413	6	36198074.824	8.4518745
Error	51394149.2068	12	4282845.767	
Total	13591417563.3011	23		

Encontrados los valores de F_0 (ver tabla 31), se comparan con los valores F_t de las tablas de estadística para un nivel de significancia $\alpha = 0.05$ (ver tabla 32), donde los grados de libertad del numerador son los de la calidad superficial, velocidad de corte, e interacción, y los grados de libertad del error son el denominador.

Tabla 32. Selección de F_t para nivel de significancia de 0.05.

ν_2	ν_1	Degrees of freedom for the numerator (ν_1)											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15
10		4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98	2.91	2.85
11		4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90	2.85	2.79	2.72
12		4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80	2.75	2.69	2.62
13		4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67	2.60	2.53

En la tabla 33 se presentan los valores de F_0 (ver tabla 31) y F_t (ver tabla 32) obtenidos del análisis de varianza.

Tabla 33. Valores de F_0 y F_t para análisis de varianza.

Fuente de Variación	F_0	F_t
Calidad superficial	300.2488	3.89
Velocidad de corte	836.7486	3.49
Interacción	8.4519	3.00

Como se observa en la tabla 33, los valores de F_0 del experimento son mayores a los valores estadísticos de las tablas (F_t), lo que significa que la hipótesis nula, H_0 , se rechaza y se acepta la hipótesis H_1 en cada uno de los factores independientes y la interacción entre ellos.

El tratamiento completo de datos, usando la metodología ANOVA se encuentra registrado en el anexo H.

6.3.5 Hipótesis ganadora. Teniendo en cuenta, según el análisis estadístico de varianza, que la hipótesis que se acepta es la H_1 , el comportamiento del volumen removido en función de la velocidad de corte se presenta en las figuras 40, 41, 42 y 43, donde:

- **La H_1 del Factor A:** Con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$, por lo menos una calidad superficial de los insertos, proporcionará un resultado diferente en la resistencia al desgaste y vida de la herramienta.

- **La H1 del Factor B:** Con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$, por lo menos una velocidad de corte proporcionará un resultado diferente en la resistencia al desgaste y vida de la herramienta.
- **La H1 de la Interacción:** Con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$, existe interacción entre los factores.

Figura 40 Grafica de volumen removido a velocidad de 115 *m/min*.

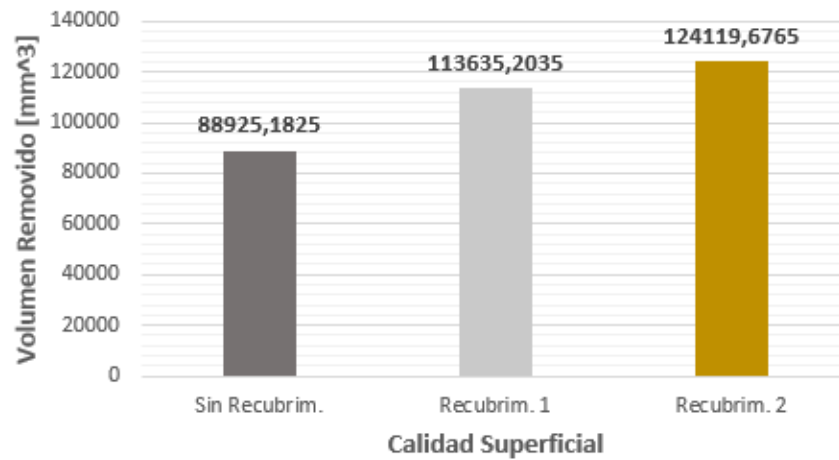


Figura 41. Grafica de volumen removido a velocidad de 130 *m/min*.

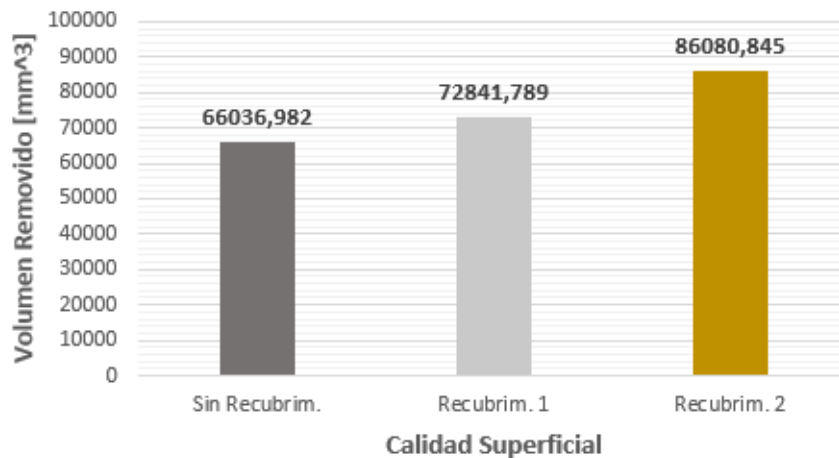


Figura 42. Grafica de volumen removido a velocidad de 145 *m/min*.

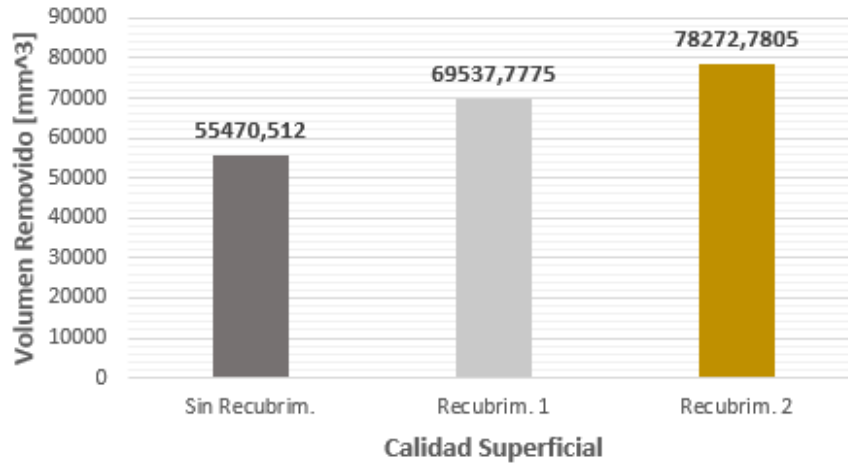
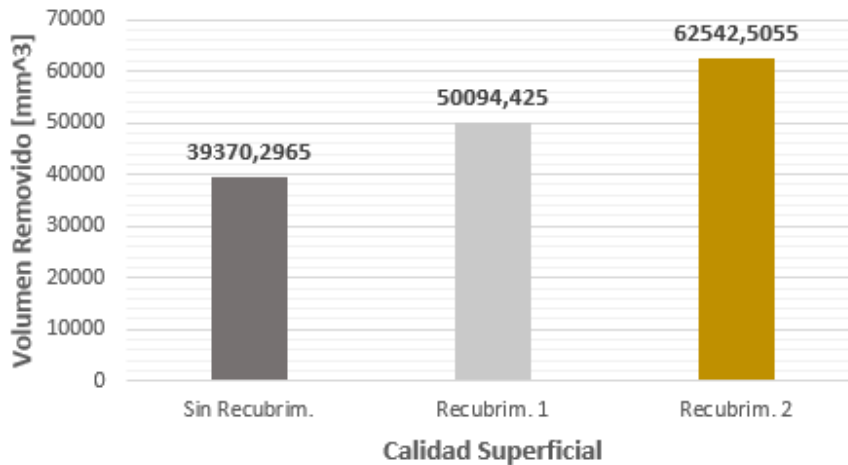


Figura 43. Grafica de volumen removido a velocidad de 160 *m/min*.

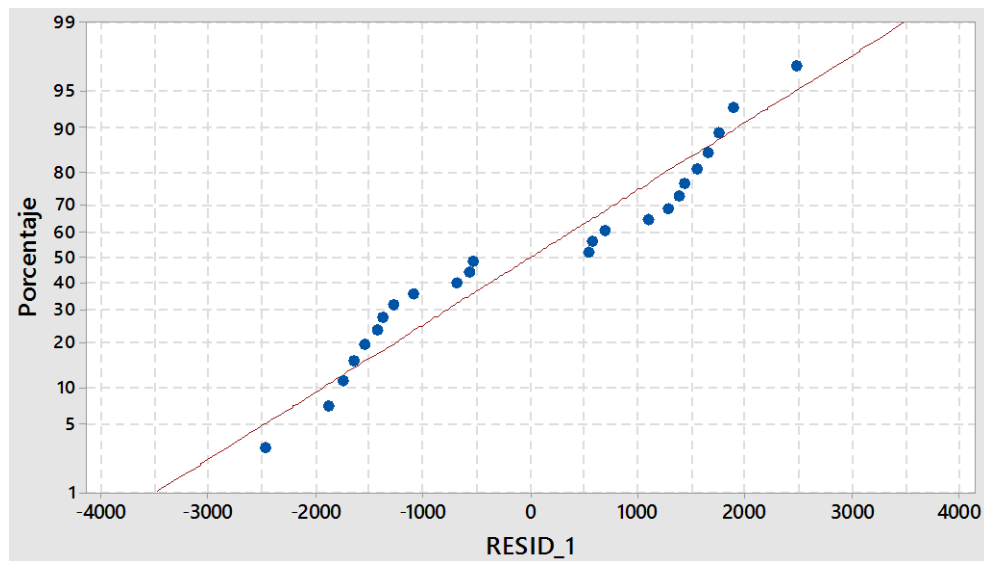


En las figuras 40, 41, 42 y 43 se observa que los insertos recubiertos con TiN en atmosfera abundante de titanio (Recubrim. 1), mejoraron respecto al no recubierto en un 27.8%, 10.3%, 25.4% y 27.2% según las velocidades de corte establecidas de 115 *m/min*, 130 *m/min*, 145 *m/min* y 160 *m/min*. Mientras que los recubiertos con TiN en atmosfera abundante de N (Recubrim. 2) presentaron un incremento en la vida útil en servicio en comparación con el no recubierto del 39.6%, 30.3%, 41.1% y 58.9% en las velocidades de corte de 115 *m/min*, 130 *m/min*, 145 *m/min* y 160 *m/min* respectivamente. De acuerdo a lo anterior, encontramos que los insertos

recubiertos con nitruro de titanio mediante la técnica de HIPIMS exhiben un eficiente comportamiento durante el maquinado por torneado de acabado en seco de la fundación gris.

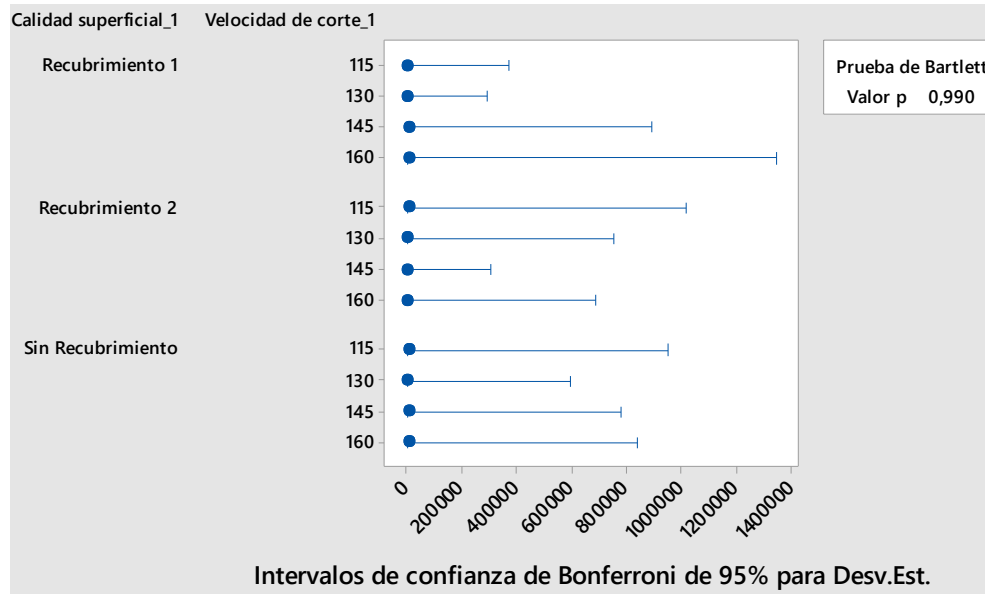
6.3.6 Verificación de la adecuación del modelo. En la figura 44 se aprecia que todos los valores del experimento se posicionan cerca de la línea de tendencia, lo que significa que el comportamiento corresponde a una distribución normal de los residuales.

Figura 44. Probabilidad normal del experimento.



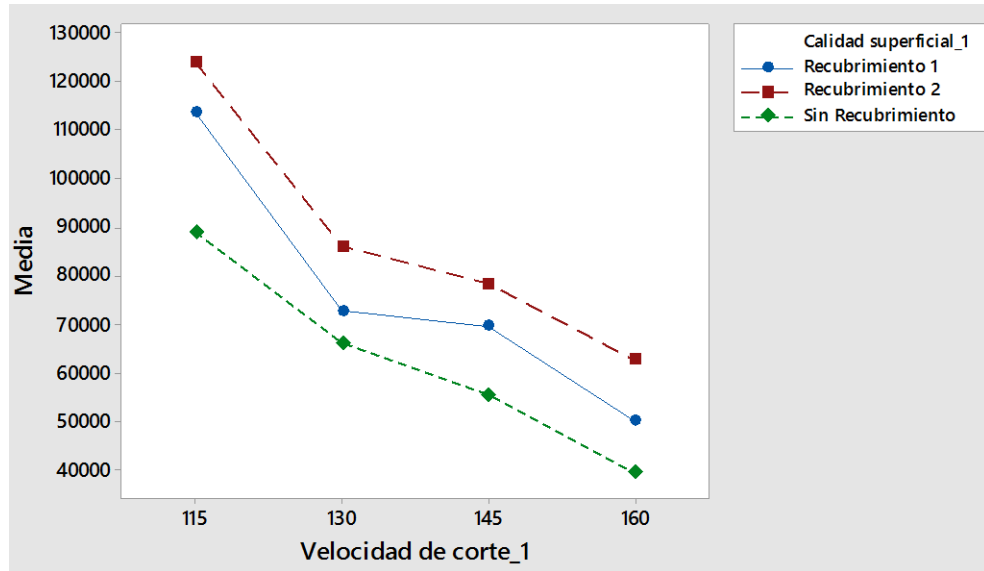
La prueba estadística de Bartlett, utilizada para probar la homogeneidad de varianza con un valor $p = 0.99 > \alpha = 0.05$, se presenta en la figura 45 y demuestra que las varianzas son homogéneas con un nivel de significancia del 5%

Figura 45. Prueba de igualdad de varianzas Bartlett.



La influencia en la interacción entre la variación de la calidad superficial y velocidad de corte, causan un cambio significativo en la vida útil en servicio de la herramienta de corte, como se puede apreciar en la figura 46 correspondiente a la interacción de respuesta, donde los factores presentan una interacción negativa, provocando un aumento en la vida útil de los insertos, con la variación de la calidad superficial, pero el aumento es neutralizado con la influencia de la velocidad de corte, la cual afecta negativamente la vida efectiva de la herramienta de corte.

Figura 46. Gráfica de interacción de respuesta.

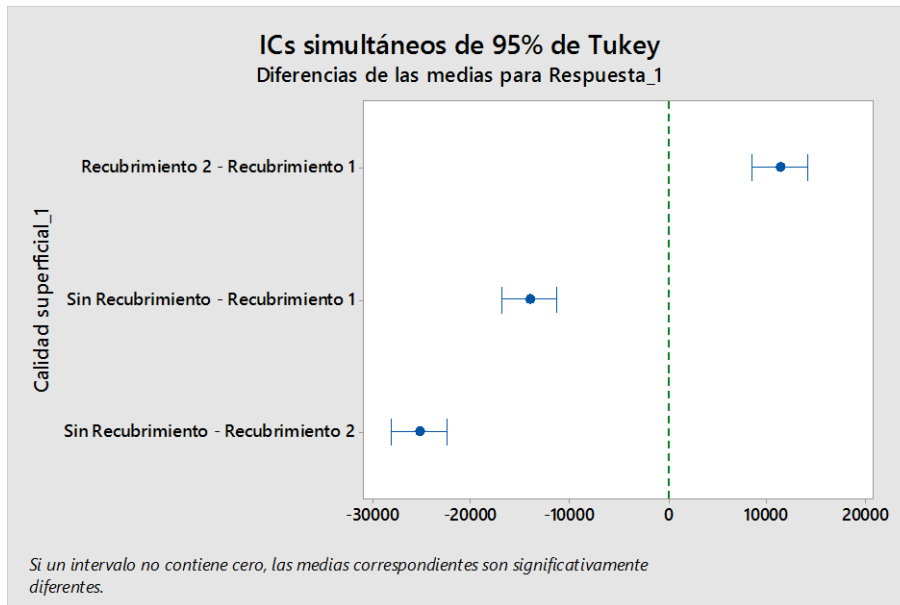


6.4 COMPARACIONES MÚLTIPLES O ANÁLISIS DE TUKEY

El análisis de varianza indica que los factores difieren significativamente, motivo por el cual es de interés comparar las medidas individuales de los factores para describir diferencias específicas. De acuerdo a lo anterior, el análisis se centra en intervalos de confianza en las diferencias de todos los pares de medias mediante un análisis TUKEY, realizado en el software minitab, en cada uno de los factores e interacción que difieren significativamente.

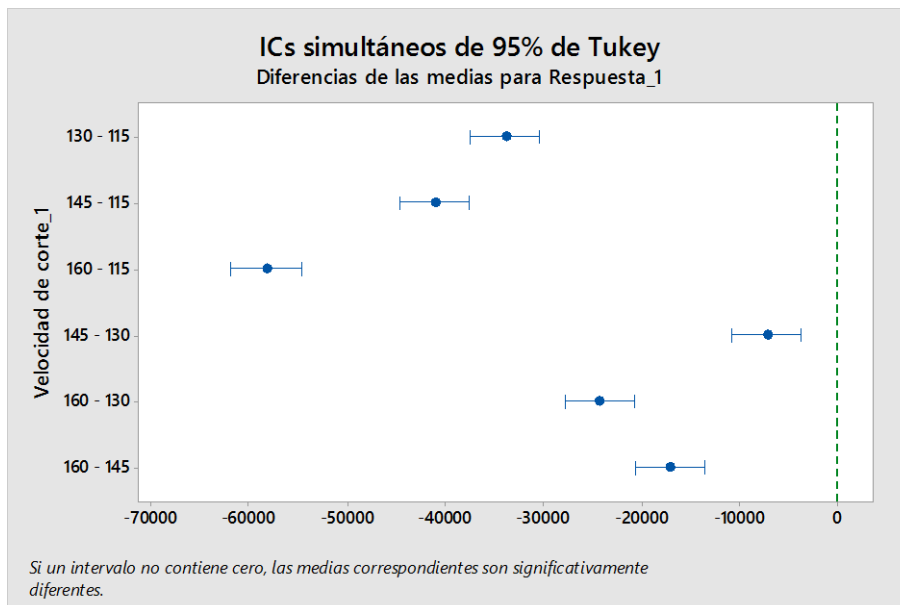
En la figura 47 se muestra la representación de los intervalos de las diferencias en las medias entre los recubrimientos, los cuales se apartan del eje 0, por lo que los niveles de las calidades superficiales afectan significativamente la vida útil en servicio de los insertos con resultados que difieren entre ellos.

Figura 47. Análisis de Tukey de las calidades superficiales de los insertos.



Las diferencias de las medias entre las velocidades de corte, presentadas en la figura 48, también difieren del eje 0 y en consecuencia tienen una diferencia significativa en la vida útil de las herramientas de corte, en función de las velocidades de corte.

Figura 48. Análisis de Tukey de las velocidades de corte.



El análisis Tukey confirma la influencia negativa en la vida útil en servicio de los insertos al aumentar la velocidad de corte, así como se apreció en la teoría de Taylor (ver sección 6.2), con una vida útil en servicio de la herramienta corte significativamente alta a una velocidad de corte de 115 m/min , y una vida reducida a velocidad de 160 m/min . Adicionalmente, la interacción negativa presente entre los factores comprueba que la vida en servicio del inserto aumenta, mejorando la calidad superficial, pero es neutralizada significativamente al producirse un aumento en la velocidad de corte (ver figura 46).

En las figuras 47 y 48 se observa que las medias en el análisis de Tukey presentan un nivel de confianza del 95%, por esta razón se determina que el recubrimiento 2 (nitruro de titanio en atmosfera abundante de nitrógeno) influye significativamente en la vida útil en servicio de los insertos, convirtiéndose en la calidad superficial más eficiente durante el mecanizado por torneado de acabado en seco de la fundación gris.

Los resultados adquiridos del software minitab sobre el análisis de Tukey realizado a las medidas obtenidas de los ensayos de mecanizado, por torneado de acabado en seco, de la fundación gris en función de la calidad superficial y velocidad de corte de los insertos, son presentados en las figuras 49 y 50 respectivamente.

Figura 49. Resultados análisis Tukey de la calidad superficial obtenidos en el software minitab.

Comparaciones para Respuesta_1

Comparaciones por parejas de Tukey: Respuesta = Respuesta_1, Término = Calidad superficial_1

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Calidad superficial_1	N	Media	Agrupación
Recubrimiento 2	8	87754,0	A
Recubrimiento 1	8	76527,3	B
Sin Recubrimiento	8	62450,7	C

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

ICs simultáneos de 95% de Tukey

Figura 50. Resultados análisis Tukey de la velocidad de corte obtenidos en el software minitab.

Comparaciones para Respuesta_1

Comparaciones por parejas de Tukey: Respuesta = Respuesta_1, Término = Velocidad de corte_1

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Velocidad de corte_1	N	Media	Agrupación
115	6	108893	A
130	6	74987	B
145	6	67760	C
160	6	50669	D

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Teniendo en cuenta que la interacción entre los factores es significativa sobre la vida útil en servicio de la herramienta de corte en la remoción de material, se realiza el análisis Tukey de comparaciones múltiples (ver figura 51). El análisis indica que la vida media útil en servicio de la herramienta de corte es significativamente alta, en el recubrimiento de nitruro de titanio con abundante nitrógeno a velocidades bajas de 115 m/min , donde la calidad superficial menos eficiente fue la del inserto de metal duro sin recubrimiento a una alta velocidad de corte de 160 m/min . Sin embargo, las combinaciones de las calidades superficiales medias y velocidades de corte intermedias, producen cambios no significativos en la vida efectiva en servicio de la herramienta de corte, para algunos niveles de los factores.

Figura 51. Resultados del análisis Tukey de la interacción de factores obtenidos en el software minitab.

Comparaciones por parejas de Tukey: Respuesta = Respuesta_1, Término = Calidad superficial_1*

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Calidad superficial_1*Velocidad de corte_1	N	Media	Agrupación
Recubrimiento 2 115	2	124120	A
Recubrimiento 1 115	2	113635	B
Sin Recubrimiento 115	2	88925	C
Recubrimiento 2 130	2	86081	C D
Recubrimiento 2 145	2	78273	D E
Recubrimiento 1 130	2	72842	E F
Recubrimiento 1 145	2	69538	F G
Sin Recubrimiento 130	2	66037	F G
Recubrimiento 2 160	2	62543	G H
Sin Recubrimiento 145	2	55471	H I
Recubrimiento 1 160	2	50094	I
Sin Recubrimiento 160	2	39370	J

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

6.5 AJUSTE DE MODELO DE REGRESIÓN EXPERIMENTAL

Las medidas obtenidas en el experimento de la estimación de la vida útil en servicio de los insertos no recubiertos y recubiertos con nitruro de titanio por HIPIMS se ajustan a un modelo lineal múltiple según la siguiente ecuación:

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \varepsilon \tag{56}$$

Donde la variable independiente "y" corresponde al volumen removido, y las variables dependientes "x₁" y "x₂" son la calidad superficial y la velocidad de corte, respectivamente. En la tabla 34 se reportan los datos experimentales del modelo de regresión lineal y las matrices definidas para "X" y "Y".

Tabla 34. Datos experimentales del modelo de regresión y matriz X y Y.

	x_1	x_2	y
Observaciones	Calidad Superficial	Velocidad de Corte	Volumen Removido
1	1	115	90674,248
2	1	130	67133,43
3	1	145	56904,46
4	1	160	37823,205
5	1	115	87176,117
6	1	130	64940,534
7	1	145	54036,56
8	1	160	40917,388
9	2	115	112948,658
10	2	130	73377,631
11	2	145	67894,11
12	2	160	47614,818
13	2	115	114321,749
14	2	130	72305,947
15	2	145	71181,44
16	2	160	52574,032
17	3	115	122242,556
18	3	130	87464,717
19	3	145	77708,89
20	3	160	61269,428
21	3	115	125996,797
22	3	130	84696,973
23	3	145	78836,67
24	3	160	63815,583

$$X = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 115 \\ 1 & 1 & 130 \\ 1 & 1 & 145 \\ 1 & 1 & 160 \\ 1 & 1 & 115 \\ 1 & 1 & 130 \\ 1 & 1 & 145 \\ 1 & 1 & 160 \\ 1 & 2 & 115 \\ 1 & 2 & 130 \\ 1 & 2 & 145 \\ 1 & 2 & 160 \\ 1 & 2 & 115 \\ 1 & 2 & 130 \\ 1 & 2 & 145 \\ 1 & 2 & 160 \\ 1 & 3 & 115 \\ 1 & 3 & 130 \\ 1 & 3 & 145 \\ 1 & 3 & 160 \\ 1 & 3 & 115 \\ 1 & 3 & 130 \\ 1 & 3 & 145 \\ 1 & 3 & 160 \end{pmatrix} \quad Y = \begin{pmatrix} 11334281 \\ 125 \\ 6713343 \\ 100 \\ 2845223 \\ 50 \\ 7564641 \\ 200 \\ 87176117 \\ 1000 \\ 32470267 \\ 500 \\ 1330914 \\ 25 \\ 10229347 \\ 250 \\ 56474329 \\ 500 \\ 73377631 \\ 1000 \\ 6789411 \\ 100 \\ 23807409 \\ 500 \\ 114321749 \\ 1000 \\ 72305947 \\ 1000 \\ 1779536 \\ 25 \\ 6571754 \\ 125 \\ 30560639 \\ 250 \\ 87464717 \\ 1000 \\ 7770889 \\ 100 \\ 15317357 \\ 250 \\ 125996797 \\ 1000 \\ 84696973 \\ 1000 \\ 7883667 \\ 100 \\ 63815583 \\ 1000 \end{pmatrix}$$

El modelo de regresión se consigue efectuando el siguiente desarrollo matemático con los datos reportados en la tabla 34, donde:

$$n = 24 \tag{57}$$

$$\sum x_1 i = 48 \tag{58}$$

$$\sum x_2 i = 3300 \tag{59}$$

$$\sum y_i = 1813855,941 \tag{60}$$

$$\sum x_1 i^2 = 112 \tag{61}$$

$$\sum x_2 i^2 = 460500 \quad (62)$$

$$\sum x_2 i * x_1 i = 6600 \quad (63)$$

$$\sum y_i * x_1 i = 3830137,554 \quad (64)$$

$$\sum y_i * x_2 i = 241219736,03 \quad (65)$$

$$X^T X = \begin{pmatrix} 24 & 48 & 3300 \\ 48 & 112 & 6600 \\ 3300 & 6600 & 460500 \end{pmatrix} \quad (66)$$

$$X^T y = \begin{pmatrix} 1813855,941 \\ 3830137,554 \\ 241219736,03 \end{pmatrix} \quad (67)$$

$$\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} \cdot X^T y \quad (68)$$

$$\hat{\beta} = \begin{pmatrix} 3,0926 & -0,125 & -0,02037 \\ -0,125 & 0,0625 & 0 \\ -0,02037 & 0 & 0,00014815 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1813855,941 \\ 3830137,554 \\ 241219736,03 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 217014,89 \\ 12651,604 \\ -1212,660 \end{pmatrix} \quad (69)$$

En consecuencia, el modelo de regresión que se obtiene es:

Volumen Removido

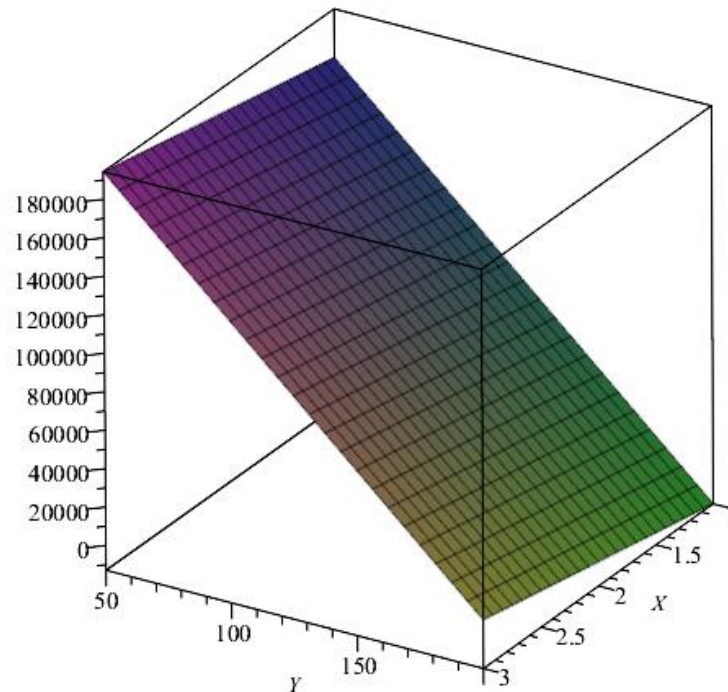
$$= 217014,889 + (12651,6045 * \text{Cali. Superficial}) - (1212,6601 * \text{Vel. de corte}) + \text{error} \quad (70)$$

Donde, la calidad superficial sin recubrimiento es 1, recubrimiento de TiN rn una atmosfera rica en Ti es 2 y recubrimiento de TiN rn una atmosfera rica en N es 3.

En la figura 52 se representa el comportamiento de la ecuación 70, correspondiente al modelo de regresión lineal ajustado al experimento, y la estimación del volumen

del material removido por los insertos en función de la calidad superficial y velocidad de corte de mecanizado.

Figura 52. Comportamiento del modelo de regresión experimental.



Los valores de la estimación del volumen removido mediante la ecuación 70 y los errores de ajuste con el experimento, son presentados en la tabla 35. La ecuación muestra desviaciones hasta un 16% respecto al modelo experimental.

Tabla 35. Predicciones, residuos y error de regresión.

Calidad Superficial	Velocidad de Corte	Promedio Experimental	Prediccion	Residuos	% Error
1	115	88925,1825	90210,582	-1285,3995	-1,45%
1	130	66036,982	72020,6805	-5983,6985	-9,06%
1	145	55470,51	53830,779	1639,731	2,96%
1	160	39370,2965	35640,8775	3729,419	9,47%
2	115	113635,2035	102862,1865	10773,017	9,48%
2	130	72841,789	84672,285	-11830,496	-16,24%
2	145	69537,775	66482,3835	3055,3915	4,39%
2	160	50094,425	48292,482	1801,943	3,60%
3	115	124119,6765	115513,791	8605,8855	6,93%
3	130	86080,845	97323,8895	-11243,0445	-13,06%
3	145	78272,78	79133,988	-861,208	-1,10%
3	160	62542,5055	60944,0865	1598,419	2,56%

6.6 AJUSTE DE CURVA Y SUPERFICIE DE RESPUESTA DEL EXPERIMENTO

El experimento presenta una buena linealidad múltiple con una adecuación alta de la regresión lineal en la estimación de volumen removido en función de la calidad superficial y velocidad de corte de los insertos. De acuerdo a lo anterior, con el uso de una superficie de respuesta de un grado mayor y mediante la ecuación (71), se busca un modelo más ajustado del experimento donde intervengan tanto los factores independientes como la interacción entre ellos.

$$y = \beta_0 + x_1\beta_1 + x_2\beta_2 + \dots + x_1^2\beta_n + x_1x_2\beta_m + \dots + x_n^t x_m^t \quad (71)$$

Donde la superficie de respuesta y modelo que más se ajuste al experimento son encontrados con el software minitab. Inicialmente el modelo se ajusta a una superficie de respuesta cuadrática completa, en función de la influencia de cada uno de sus factores de primer y segundo orden y su interacción (ver figura 53).

Figura 53. Superficie de respuesta cuadrática completa en el software minitab.

Coeficientes de regresión estimados de Volumen Removido				
Término	Coef	EE del coef.	T	P
Constante	71272	2546	27,993	0,000
Calidad Superficial	12652	1460	8,666	0,000
Velocidad de Corte	-27285	1599	-17,062	0,000
Calidad Superficial* | Calidad Superficial	-1425	2529	-0,564	0,580
Velocidad de Corte* Velocidad de Corte	9459	2682	3,527	0,002
Calidad Superficial* Velocidad de Corte	-2498	1959	-1,275	0,218

Fuente	CM Ajust.	F	P
Regresión	2595526154	76,12	0,000
Lineal	6243592747	183,10	0,000
Calidad Superficial	2561009543	75,10	0,000
Velocidad de Corte	9926175952	291,10	0,000
Cuadrado	217486319	6,38	0,008
Calidad Superficial*Calidad Superficial	10829253	0,32	0,580
Velocidad de Corte*Velocidad de Corte	424143385	12,44	0,002
interacción	55472635	1,63	0,218
Calidad Superficial*Velocidad de Corte	55472635	1,63	0,218
Error residual	34099278		
Falta de ajuste	93732144	21,89	0,000
Error puro	4282845		
Total			

En la figura 53 se muestra que la interacción entre los factores no es significativa, donde $p = 0.218 > \alpha = 0.05$, y la influencia del segundo orden de la calidad superficial tampoco es significativa, con $p = 0.58 > \alpha = 0.05$ (ver figura 54). Por tal motivo, como no son significativos, se replantea la superficie de respuesta del experimento sin estos factores.

Figura 54. Superficie de respuesta ajustada en el software minitab.

Regresión de superficie de respuesta: Volumen Remo vs. Calidad Supe; Velocidad

El análisis se realizó utilizando unidades codificadas.

Coefficientes de regresión estimados de Volumen Removido

Término	Coef	EE del coef.	T	P
Constante	70322	1905	36,906	0,000
Calidad Superficial	12652	1458	8,678	0,000
Velocidad de Corte	-27285	1597	-17,085	0,000
Velocidad de Corte*	9459	2678	3,532	0,002
Velocidad de Corte				

En la figura 54, la superficie de respuesta, presenta un ajuste adecuado al modelo experimental, con la influencia de los factores significativos $p < 0.05$, donde los valores de los coeficientes de regresión β de la ecuación de superficie de respuesta son los presentados en la figura 55.

Figura 55. Coeficientes de regresión estimados en el software minitab.

Coefficientes de regresión estimados de Volumen Removido utilizando datos en unidades no codificadas

Término	Coef
Constante	565003
Calidad Superficial	12651,6
Velocidad de Corte	-6350,74
Velocidad de Corte*	18,6839
Velocidad de Corte	

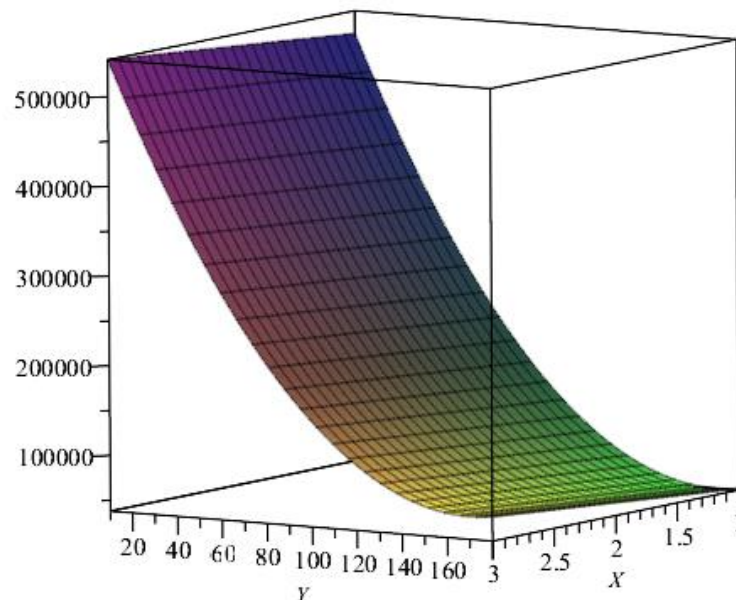
En consecuencia, la ecuación de la superficie de respuesta de regresión estimada es:

$$\begin{aligned} \text{Vol. de remoción: } & 565003 + (12651,6 * \text{Calidad superficial}) \\ & - (6350,74 * \text{Vel. de corte}) + (18,6839 * \text{Vel. de corte}^2) \end{aligned} \quad (72)$$

Donde, la calidad superficial sin recubrimiento es 1, recubrimiento de TiN rn una atmosfera rica en Ti es 2 y recubrimiento de TiN rn una atmosfera rica en N es 3

En la figura 56 se puede apreciar el comportamiento de la ecuación 72, correspondiente a la superficie de respuesta en la estimación del volumen removido en función de la calidad superficial de los insertos recubiertos con nitruro de titanio por HIPIMS, la velocidad de corte establecida durante el mecanizado de la fundición gris de tipo FC300 y parámetros de corte establecidos en el proyecto.

Figura 56. Comportamiento de la superficie de respuesta experimental.



En la tabla 36, se presentan los valores de la estimación de la superficie de respuesta, los cuales exhiben un mejor ajuste de los resultados experimentales que el modelo de regresión lineal, con una desviación máxima aproximada del 10%.

Tabla 36. Predicciones, residuos y errores de superficie de respuesta.

Ecuacion Superficie de Respuesta					
Calidad Superficial	Velocidad de Corte	Promedio Experimental	Prediccion	Residuos	% Error
1	115	88925,1825	94415,4	-5490,2175	-6,17%
1	130	66036,982	67818	-1781,018	-2,70%
1	145	55470,51	49628,4	5842,11	10,53%
1	160	39370,2965	39846,6	-476,3035	-1,21%
2	115	113635,2035	107067	6568,2035	5,78%
2	130	72841,789	80469,6	-7627,811	-10,47%
2	145	69537,775	62280	7257,775	10,44%
2	160	50094,425	52498,2	-2403,775	-4,80%
3	115	124119,6765	119718,6	4401,0765	3,55%
3	130	86080,845	93121,2	-7040,355	-8,18%
3	145	78272,78	74931,6	3341,18	4,27%
3	160	62542,5055	65149,8	-2607,2945	-4,17%

Los programas y cálculos realizados con apoyo del software minitab para el análisis de varianza, prueba Tukey, regresión lineal y superficie de respuesta, se pueden observar a detalle en el anexo I.

7. CONCLUSIONES

El presente proyecto de investigación muestra la importancia de los recubrimientos en las herramientas de corte usadas en el proceso de mecanizado, los recubrimientos de nitruro de titanio en atmosferas a diferentes composiciones realizados mediante la técnica HIPIMS (High power-impulse magnetron sputtering), presentaron un aumento significativo en la vida útil en servicio de los insertos en comparación a las herramientas sin modificación superficial. Adicionalmente, del análisis de microscopia electrónica de barrido (MEB), se observa que los recubrimientos presentan una película de textura homogénea en toda la superficie del inserto, y una menor rugosidad en comparación a los insertos sin recubrir. Las anteriores consideraciones proporcionan un aporte valioso al uso de esta tecnología en la industria metalmecánica.

Se evaluó el desgaste de los insertos de metal duro de calidad UTi20T de la empresa Mitsubishi modificados y no modificados superficialmente mediante la técnica HIPIMS, con el uso de un torno CNC, EMCO Turn 342, empleando como material de corte probetas de fundición gris FC300 en operaciones de cilindrado externo sin refrigerante, con una profundidad de corte de 0.3mm , un avance de 0.1mm/rev , y velocidades de corte de 115m/min , 130m/min , 145m/min y 160m/min , de acuerdo a las normas internacionales ISO 1835, ISO 3685 y ASME B94.55M usadas durante las pruebas de caracterización, dando como resultado que las herramientas de corte modificadas superficialmente con TiN mediante la técnica HIPIMS presentan una mayor duración del filo de corte, y por tal motivo un aumento en la vida efectiva en servicio del inserto.

En la metodología del experimento se realizó una comprobación rigurosa de la composición elemental del material de los insertos, mediante el análisis de

espectroscopia de energía dispersa (EDX), donde se determinó que los valores de concentración en porcentaje de peso atómico de los elementos presentes en los recubrimientos de nitruro de titanio depositados en una atmosfera de abundante nitrógeno son del 75.24% de titanio, 21.79% nitrógeno y 2.97% de carbono, y del 84.18% de titanio, 12.01% nitrógeno y 3.81% de carbono los depositados en una atmosfera con abundante titanio, asimismo en la superficie de los insertos de metal duro de calidad UTi20T de Mitsubishi se identificaron las cantidades de wolframio del 60.86%, cobalto 5.78%, titanio 13.11%, niobio 11.99% entre otras aleaciones pertenecientes al tipo de material del sustrato. Adicionalmente, se constató la influencia del mecanismo de desgaste por difusión y abrasión en las herramientas de mecanizado al verificar la morfología y composición de la superficie de los insertos después del maquinado, que, debido a las altas temperaturas de corte durante el proceso de mecanizado, presentan especies adheridas con alto contenido de hierro y oxígeno, propios de la fundición gris.

El análisis estadístico, validó la eficacia y eficiencia de la tecnología HIPIMS, mejorando la resistencia al desgaste de los insertos de torneado, en consecuencia, se obtuvo que el tratamiento de nitruro de titanio depositado en atmosfera con abundante nitrógeno presenta un mayor rendimiento en la vida efectiva de las herramientas de corte respecto a los revestimientos fabricados en ambientes de abundante titanio y las superficies de los insertos sin recubrimiento. No obstante, el incremento del material removido por los insertos recubiertos con TiN en abundante Ti y N en función de las velocidades de corte fue del 27.8% y 39.6% a 115 *m/min*, 10.3% y 30.35% a 130 *m/min*, 25.4% y 41.1% a 155 *m/min*, y 27.2% y 58.86% a 160 *m/min* respectivamente.

Se comprobó la influencia decreciente de la velocidad de corte en la vida útil en servicio de las herramientas de corte y con el buen ajuste de la ecuación reducida

de Taylor se obtuvo la ecuación de la vida efectiva en servicio de los insertos, de marca Mitsubishi SPMN 120408, en operación de cilindrado exterior con velocidad de avance de 0.1 mm/rev y profundidad de corte de 0.3 mm , en el mecanizado de la fundición gris, teniendo presente el criterio de fractura del cráter. Las ecuaciones del inserto no recubierto, recubierto con TiN en abundante titanio y nitrógeno fueron $V_c * T^{0,2965} = 302,235$, $V_c * T^{0,3042} = 328,170$ y $V_c * T^{0,3371} = 379,4644$ respectivamente.

Los buenos resultados obtenidos de los ensayos de evaluación superficial de los recubrimientos de nitruro de titanio depositados en los insertos mediante la tecnología HIPIMS, manifiestan que son eficientes en un proceso de mecanizado. Sin embargo, las fotomicrografías obtenidas por microscopía MEB detectaron cambios significativos del revestimiento en las caras laterales del inserto, donde en algunas zonas se percibió la no homogeneidad o no muy buena adherencia del recubrimiento, dado por el desprendimiento (o cráteres) observado en las aristas con ángulo de incidencia de 11° , lo que puede causar durante el maquinado un aumento de la marca y un desgaste prematuro, reduciendo un poco la efectividad del recubrimiento.

Las metodologías de diseño de experimentos y de análisis de varianza, demostraron que con el uso de técnicas matemáticas y estadísticas se puede estimar la vida efectiva en servicio de los insertos durante el mecanizado de la fundición gris influenciado por la velocidad de corte y la calidad superficial (tipo de recubrimiento). No obstante, la regresión lineal generó errores de hasta 16% pese a ajustarse correctamente al experimento; mientras que el uso de una técnica de mayor grado, como superficies de respuesta, presentó un mejor ajuste a los valores experimentales generando un error menor al 10%, motivo por el cual se considera adecuada en la estimación de respuesta, pero si se requiere una superficie de

respuesta de mejor ajuste es necesario tener en cuenta otros factores que influyen en el desgaste de la herramienta, tales como temperatura, dureza superficial de la sección a mecanizar, entre otros.

Adicionalmente, es muy importante resaltar que el presente proyecto de investigación aplicada y de desarrollo tecnológico fue realizado en cooperación entre personal de la Fundación of Researches in Science and Technology of Materials, la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia y la empresa Nano4energy ubicada en el Instituto de Fusión Nuclear de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales (ETSII) de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), en la ciudad de Madrid, España; quienes con el propósito de mejorar la vida útil en servicio de las herramientas de corte en un proceso de mecanizado de acabado en seco de la fundición gris, aplicaron una tecnología reciente de modificación superficial de materiales conocida como HIPIMS (High power-impulse magnetron sputtering). Esta tecnología está siendo ampliamente aplicada, por encima de las técnicas de CVD, PVD, sputtering, entre otras, con magníficos resultados en países de Europa y Asia. Así que, como valor agregado del presente proyecto de investigación, los parámetros de temperatura de los sustratos, tiempos de deposición y concentraciones de la atmosfera de titanio y nitrógeno fueron muy bien establecidos, contribuyendo así con la estandarización y optimización de los experimentos científicos y de desarrollo tecnológico que realiza continuamente Nano4energy.

8. RECOMENDACIONES

Implementar durante el proceso de modificación superficial de las herramientas de corte por HIPIMS, el uso de sistemas rotatorios que ayuden a recubrir toda la geometría de interés, donde se pueda garantizar que los iones de titanio y nitrógeno sean depositados uniformemente sobre toda la superficie de trabajo de la herramienta, con el propósito de obtener una calidad superficial libre de cráteres o rugosidades indeseadas, que muy posiblemente contribuyen con el desgaste prematuro y reducción de la vida útil en servicio de las herramientas de corte.

Teniendo en cuenta que durante el ensayo de la evaluación del desgaste de los insertos no recubiertos y recubierto se presentó un error de programación que generó la colisión de la pieza de trabajo con la herramienta de corte, provocando la ruptura de uno de los insertos de estudio, se aconseja que, antes de iniciar las pruebas de mecanizado, se verifique la programación de la maquina en vacío, donde se minimicen o se eviten errores y posibles fallas prematuras durante el ensayo.

Se propone evaluar otros tipos de recubrimientos y herramientas de cortes.

Implementar un sistema de modificación superficial de deposición física a vapor (PVD) mediante la técnica de magnetrón sputtering de pulsos de alta potencia (HIPIMS) en Colombia, el cual permita fortalecer la investigación básica, aplicada y el desarrollo tecnológico.

BIBLIOGRAFÍA

AMADOR, Juan Pablo Carrasco. Recubrimientos multicapa micro-estructurados de ZrO₂-Y₂O₃-Al₂O₃ obtenidos por la vía sol-gel para aplicaciones tecnológicas. 2015. Tesis Doctoral. Universidad de Extremadura.

AUGER, M.; SANCHEZ, O. y ALBELLA, J. Depósito de TiN sobre herramientas de corte para uso industrial. En: Boletín de la sociedad española de cerámica y vidrio. 2004. Vol. 43, No. 2, p. 488-490.

BEHRISCH, Rainer; WITTMAACK, K. Sputtering by particle bombardment. Berlin: Springer, 1981. p. 9-67.

BHATT, Abhay, et al. Wear mechanisms of WC coated and uncoated tools in finish turning of Inconel 718. En: Tribology International. 2010. Vol. 43, p. 1113-1121.

BOHLMARK, Johan, et al. Ionization of sputtered metals in high power pulsed magnetron sputtering. En: Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces and Films. 2005. Vol. 23, No 1, p. 18-22.

BOUZAKIS, K. et al. Ambient and elevated temperature properties of TiN, TiAlN and TiSiN PVD films and their impact on the cutting performance of coated carbide tools. En: Surface & Coating Technology. 2009. Vol 204. P. 1061-1065.

BOUZAKIS, K.-D., et al. Adaption of graded Cr/CrN-interlayer thickness to cemented carbide substrates' roughness for improving the adhesion of HPPMS PVD films and the cutting performance. En: Surface and Coatings Technology. 2010. Vol. 205, No. 5, p. 1564-1570.

BOUZAKIS, Konstantinos-Dionysios, et al. Cutting with coated tools: Coating technologies, characterization methods and performance optimization. En: CIRP Annals-Manufacturing Technology. 2012. Vol. 61, No. 2, p. 703-723.

BROSTOW, Witold, et al. Tribología con énfasis en polímeros: fricción, resistencia al rayado y al desgaste. En: Journal of Materials Education, 2003, vol. 25, no 4-6, p. 119.

CARRERAS, Luis; BUENO, Sandra y MONTALÁ, Francesc. Recubrimientos duros obtenidos por procesos CVD, TRDD, PVD. [Base de datos en línea]. 1998. Revista Anales de ingeniería mecánica, 12(2), 469-475. (Recuperado en 10 febrero 2017).

Disponible en:

<http://bddoc.csic.es:8080/detalles.html?tabla=docu&bd=ICYT&id=133664>

CASSIER, Z. et al. Predicción del acabado superficial de piezas de acero torneadas en función de las propiedades mecánicas del material y de las condiciones de corte. En: Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales. 1997. Vol. 17, No. 1, p. 13-18.

CHENG, Hsyi-En; LEE, Wen-Jen y HSU, Ching-Ming. The effect of deposition temperature on the properties of TiN diffusion barriers prepared by atomic layer chemical vapor deposition. En: Thin Solid Films. Agosto 2005. Vol. 485, No. 1, p. 59-65.

CHEVALIER, Sebastien; BONNET, G. y LARPIN, J.P. Metal-organic chemical vapor deposition of Cr₂O₃ and Nd₂O₃ coatings. Oxide growth kinetics and characterization. En: Applied Surface Science. Marzo 2000. Vol. 167, p. 125-133.

CHOY, K.L. Chemical vapor deposition of coatings. En: Progress in Materials Science. 2003. Vol. 48, p. 57-170.

COBURN, J. W.; KAY, Eric. Positive-ion bombardment of substrates in RF diode glow discharge sputtering. En: Journal of Applied Physics. 1972. Vol. 43, No. 12, p. 4965-4971.

CORREA, M, et al. Factores que afectan el acabado superficial en los procesos de mecanizado: Técnicas de análisis y modelos. En: Comité Español de Automática CEA. 2004. Vol. 25, No 75.

DA SILVA, Rosemar. Tool life and wear mechanisms in high speed machining of Ti-6Al-4V alloy with PCD tools under various coolant pressures. En: Journal of materials processing technology. 2013. Vol. 213, p. 1459-1464.

DAS, Santanu, et al. Neural-Networks-Based tool wear monitoring in turning medium carbon steel using a coated carbide tool. En: Journal of Materials Processing Technology. 1997. Vol. 63, p. 187-192.

DEARNLEY, P. y TRENT, E. Wear mechanisms of coated carbide tools. En: The Metals Technology. Febrero 1982. Vol. 9, p. 60-75.

DEVILLEZ, A. et al. Cutting forces and wear in dry machining of Inconel 718 with coated carbide tools. En: Wear. 2007. Vol. 262, p. 931-942.

DHAR, N. y KAMRUZZAMAN, M. Cutting temperature, tool wear, Surface roughness and dimensional deviation in turning AISI 4037 steel under cryogenic condition. En: Machine tools & Manufacture. 2007. Vol. 47, p. 754-759.

DIAZ, Fernando. Recomendaciones para el buen uso de taladras. [Base de datos en línea]. Agosto 19 de 2013. Revista Interempresas.net Metalmecánica. (Recuperado en 20 abril 2017). Disponible en:
<http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/112720-Recomendaciones-para-el-buen-uso-de-taladras.html>

DOUARD, A.; BERNARD, C. y MAURY, F. Thermodynamic simulation of atmospheric DLI-CVD processes for the growth of chromium-based hard coatings using bis (benzene) chromium as molecular source. En: Surface & Coatings Technology. Julio 2008. Vol. 203, p. 516-520.

DUCROS, C.; BENEVENT, V. y SANCHETTE, F. Deposition, characterization and machining performance of multilayer PVD coatings on cemented carbide cutting tools. En: Surface & Coatings Technology. 2003. Vol. 163-164, p. 681-688.

EHIASARIAN, A. et al. Influence of high power densities on the composition of pulsed magnetron plasmas. En: Vacuum. 2002. Vol. 65, p. 147-154.

EHIASARIAN, A. P., et al. High power pulsed magnetron sputtered CrN x films. En: Surface and coatings technology. 2003. Vol. 163, p. 267-272.

EHIASARIAN, A; WEN, J. y PETROV, I. Interface microstructure engineering by high power impulse magnetron sputtering for the enhancement of adhesion. En: Journal of Applied Physics. 2007. Vol. 101, No. 054301.

EZUGWU, E. et al. Evaluation of the performance of CBN tools when turning Ti-6Al-4V alloy with high pressure coolant supplies. En: Machine Tools & Manufacture, 2005, Vol. 42, p. 1009-1014.

EZUGWU, E. y BORNNEY J. Effect of high-pressure coolant supply when machining nicker-base, Inconel 718, alloy with coated carbide tools. En: Materials processing Technology. 2004. Vol. 153-154, p. 1045-1050.

EZUGWU, E.; WANG, Z. y MACHADO, A. Wear of coated carbide tools when machining nickel (inconel 718) and titanium base (Ti-6 Al-4V) alloys. En: Tribology Transactions. 2000. Vol. 43, No. 2, p. 263-268.

FLAMM, D. L.; HERB, G. K. Plasma Etching Technology-An Overview. En: Plasma Etching an Introduction, DM Manos. and DL Flamm eds. 1989. p. 2-87.

FLORY, Francois. Thin Films for optical systems. United States of America: Marcel Dekker Inc, 1995. p. 117-129.

FUKUI, Haruyo, et al. Cutting performance of DLC coated tools in dry machining aluminum alloys. En: Surface & Coatings Technology. 2004. Vol. 187, p. 70-76.

GAMA, José E. Estudio comparativo de acabados superficiales de probetas de aluminio 6061-T6, cobre UNS C11000 y acero AISI 1020 a través del análisis de virutas obtenidas en el proceso de torneado, utilizando diferentes parámetros de corte y diferentes insertos SANDVIK. Trabajo de Grado Ingeniero Mecánico. México:

Universidad de las Américas Puebla. Escuela de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Mecánica, 2005. p. 77-103.

GARCÉS, O., et al. Utilización del criterio de desgaste de flanco y la ecuación de Taylor para simular el tiempo de vida de una herramienta de corte mediante el proceso de torneado en CNC para un material AISI 1018. Trabajo de Grado-FIMCP. Ecuador: Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2011. p. 104.

GERLING, Heinrich. Alrededor de las máquinas-herramienta 3ra Edición. Barcelona, España: Verté, S.A. 2006. p. 273.

GROOVER, Mikell. P. Fundamentals of modern manufacturing materials, processes and systems 4th Edition. United States of America: John Wiley & Sons. Inc, 2010. p. 2 - 180; 543 - 605; 821-840.

GUTIERREZ, Yesid y LOPEZ, Kevin. Estudio de rugosidad en maquinado por el proceso de torneado en CLIMET LTDA. Basado en las normas ISO de rugosidad. Trabajo de Grado Ingeniero Mecánico. Barranquilla: Universidad Autónoma del Caribe. Facultad de Ingenierías. Programa de Ingeniería Mecánica, 2014. p. 6-35.

HARON, Che; GINTING, A. y ARSHAD, H. Performance of alloyed uncoated and CVD-coated carbide tools in dry milling of titanium alloy Ti-6242S. En: Materials Processing Technology. 2007. Vol. 185, p. 77-82.

HARON, Che; GINTING, A. y GOH, J. Wear of coated and uncoated carbides in turning tool steel. En: Materials Processing Technology. 2001. Vol. 116, p. 49-54.

HERNÁNDEZ, Luis y QUESADA, Ana. Fluidos de corte, consecuencias y perspectivas. En: Revista trimestral Ciencias Holguín. Julio-Septiembre 2002. Vol. 8, p. 1-11.

HOLLAND, Leslie. Vacuum deposition of thin films. London: Chapman & Hall, 1970. vol. 1.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Indexable inserts for cutting tools-Designation. ISO 1832:2004. Suiza: ISO, 2004. 26p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Tool-life testing with single-point turning tools. ISO 3685 second edition: 1993. Suiza: ISO, 1993. 56p.

ISCAR, Complete machining solutions turning tools. Catálogo [online]. Argentina: 2015 [consultado: diciembre, 2016]. Disponible en:
<http://www.iscar.com/catalogs.aspx/CountryId/27>

JIN SON, Myung. Properties of TiBN coating on the tool steels by PECVD and its applications. En: Journal of Materials Processing Technology. Diciembre 2002. Vol. 130-131, p. 266-271.

KELLY, P.J. y ARNELL, R.D. Magnetron sputtering: a review of recent developments and applications. En: Vacuum. Septiembre 1999. Vol. 56, p. 159-172.

KENNAMETAL, Herramientas de corte. Catálogo [online]. Brasil: 2013 [consultado: diciembre, 2016]. Disponible en:
https://www.kennametal.com/content/dam/kennametal/kennametal/es/Resources/Catalogs-Literature/Metalworking/A-15-04370_KMT_Master_ES.pdf

KIM, Duk-Jae, et al. Properties of TiN–TiC multilayer coatings using plasma-assisted chemical vapor deposition. En: Surface and Coatings technology. 1999. Vol. 116, No. 119, p. 906-910.

KITAGAWA, Teruyuki, et al. Hard DLC film formation by gas cluster ion beam assisted deposition. En: Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Octubre 2002. Vol. 201, p. 405-412.

KOUZNETSOV, Vladimir, et al. A novel pulsed magnetron sputter technique utilizing very high target power densities. En: Surface & Coatings Technology. Mayo 1999. Vol. 122, p. 290-293.

KWATERA, Andrzej. Carbon.Doped Al₂O₃ films synthesized on cemented carbide tools by the metal organic LPCVD technique. En: Thin Solid Films. Abril 1989, Vol. 200, p. 19-32.

LABORATORIO DE PRODUCCION. Torno protocolo, curso de procesos de manufactura. Bogotá D.C.: Escuela colombiana de ingeniería, 2007. p. 29.

LIM, Ju-Wan, et al. Mechanical properties of TiN/TiB₂ multilayers deposited by plasma enhanced chemical vapor deposition. En: Surface & Coatings Technology. 2003. Vol. 174-175, p. 720-724.

LIN, Jianliang, et al. High rate deposition of thick CrN and Cr₂N coatings using modulated pulse power (MPP) magnetron sputtering. En: Surface and Coatings Technology. 2011. Vol. 205, No. 10, p. 3226-3234.

LIN, Yuan; CHEN, Xin. Advanced Nano depositions Methods. Germany: Chemical Industry Press, 2016. p. 33-42.

LUO, X, et al. Modeling flank wear of carbide tool insert in metal cutting. En: International Conference on wear of materials. Julio-Agosto 2005. Vol. 259, p. 1235-1240.

MARGARET, Lewis y PARK, Miller. Apparatus for coating articles by thermal evaporation. [Base de datos en línea]. Octubre 1950. Patentes Google. (Recuperado en 27 marzo 2017). Disponible en:
<https://www.google.com/patents/US2527747>

MARIN, Nacarí. Análisis termo-mecánico de la influencia del desgaste geométrico de las herramientas en procesos de corte ortogonal de aceros inoxidables austeníticos. Tesis Doctoral. Leganés: Universidad Carlos III de Madrid. Área de ingeniería Mecánica, 2010. p. 320.

MAURI, López; PEDRO, Osmany. Obtención de recubrimiento difusivo de titanio en insertos de metal duro. Tesis Doctoral. Cuba: Universidad Central Marta Abreu de Las Villas. Facultad de Ingeniería Mecánica, 2006. p. 34.

MAURY, F., et al. Multilayer chromium based coatings grown by atmospheric pressure direct liquid injection CVD. En: Surface & Coatings Technology. Abril 2009. Vol. 204, p. 983-987.

MAYRHOFER, Paul, et al. A comparative study on reactive and non-reactive unbalanced magnetron sputters deposition of TiN coatings. En: Thin solid films. Agosto 2001. Vol. 415, p. 151-159.

MAZINI, N.E, et al. Relación entre la rugosidad y las variables de mecanizado en una operación de torneado con insertos. En: Coloquio Latinoamericano de fractura y Fatiga. Agosto 2000. Vol. 4, p. 475-482.

MITSUBISHI TOOLS, Herramientas de corte de metal duro. Catálogo [online]. Japón: 2014 [Consultado: diciembre, 2016]. Disponible en: http://www.mitsubishicarbide.com/EU/es/product/pdf/c_n_other/c006s.pdf

MONTGOMERY, Douglas C. Diseño y análisis de experimentos 2da edición. Mexico: Editorial Limusa, S.A, 2004. p. 170 – 276; 392 – 500.

MONTILLA, Carlos A. y RIOS, Luis C. Caracterización de regímenes de corte del torno spectralight 0400 de la facultad de ingeniería mecánica universidad tecnológica de Pereira. En: Scientia et Technica. Mayo 2006. Vol. 12, No. 30, p. 209-214.

PEREIRA, Juan C. y RUIZ, Rubén G. Influencia de los parámetros de corte y geometría de la herramienta en la rugosidad superficial obtenida en operaciones de torneado del bronce SAE 40. En: Revista Ingeniería UC. 2007. Vol. 14, No. 3, p. 77-85.

PEREIRA, O., et al. Lubricar o no lubricar, esa es la cuestión. [Base de datos en línea]. Abril 27 de 2017. Revista Interempresas. Net Metalmecánica. (Recuperado en 05 mayo 2017). Disponible en: <http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/185246-Lubricar-o-no-lubricar-esa-es-la-cuestion.html>

PETROV, L, et al. Microstructure modification of TiN by Ion bombardment during reactive sputter deposition. En: Thin solid films. Septiembre 1988. Vol. 169, p. 299-314.

POWELL, Ronald y FAIR, James. Copper atomic layer chemical vapor deposition. [Base de datos en línea]. Enero 2001. Novellus Systems, Inc. (Recuperado en 15 febrero 2017). Disponible en: <https://www.google.com/patents/US6464779>

RESTREPO, Elisabeth; ARANGO, Pedro y CASANOVA, Simeón. Algunos conceptos sobre nitruro de titanio y el carburo de titanio. En: Dyna. Marzo 2009. Vol. 76, No. 157, p. 213-224.

RINCÓN, C.; ZAMBRANO, G.; PRIETO, P. Un método in situ para la elaboración de multicapas de carburo de tungsteno WC y carbono amorfo. En: El hombre y la Maquina. Julio-Diciembre 2003. Nos. 20-21. P. 96-103.

RUSKE, F., et al. Reactive deposition of aluminium-doped zinc oxide thin films using high power pulsed magnetron sputtering. En: Thin Solid Films. 2008. Vol. 516, No. 14, p. 4472-4477.

SAMPÉN, Luis. Pautas para el Diseño de Partes Metálicas Resistentes al Desgaste. En: Industrial Data. Diciembre 2003. Vol. 6, No. 2, p. 66-73.

SANCHEZ, M, et al. Evaluación de la calidad superficial de piezas mecanizadas a partir de la fuerza de corte. En: Centro Nacional de Investigaciones metalúrgicas. Mayo 1998. Vol. 34, p. 27-31.

SANDVIK COROMANT, Herramientas de torneado. Catálogo [online]. Brasil: 2015 [consultado: septiembre, 2016]. Disponible en: http://sandvik.ecbook.se/se/es/turning_tools_2015/

SARAKINOS, Kostas, et al. Process stabilization and enhancement of deposition rate during reactive high power pulsed magnetron sputtering of zirconium oxide. En: Surface and Coatings Technology. 2008. Vol. 202, No. 20, p. 5033-5035.

SCHVAB, Luis. Máquinas y herramientas. República de Argentina: Instituto Nacional de Educación Tecnológica, 2011. p. 23.

SHIMIZU, Tetsuhide, et al. HIPIMS deposition of TiAlN films on inner wall of micro-dies and its applicability in micro-sheet metal forming. En: Surface and Coatings Technology. 2014. Vol. 250, p. 44-51.

SKORDARIS, G., et al. Film thickness effect on mechanical properties and milling performance of nano-structured multilayer PVD coated tools. En: Surface and Coatings Technology. 2016. Vol. 307, p. 452-460.

SMIDT, F.A. Use of ion beam assisted deposition to modify the microstructure and properties of thin films. En: International Material Reviews. 1990. Vol. 35, p. 61-128.

SWANN, S. Magnetron Sputtering. En: Physics in Technology. 1988. Vol. 19, No. 2, p. 67-75.

UHLMANN, E. et al. HIPIMS coated carbides with high adhesive strength for hard machining. En: MM Science Journal. December 2014. Vol. 4, p. 516-520.

UHLMANN, E., et al. Hard Turning of Hot Work and Cold Work Steels with HiPIMS and DCMS TiAlN Coated Carbide Inserts. En: Procedia CIRP. 2016. Vol. 46, p. 591-594.

VALLE, David; ALFONSO, Ricardo y GONZALEZ, Raide. Calzos pentagonales cementados: influencia de la velocidad de corte en la productividad y los costos. En: Ingenieria Mecanica. Septiembre-Diciembre 2013. Vol. 16, No. 3, p. 210-218.

WEHNER, Gottfried K. Sputtering by ion bombardment. En: Advances in electronics and electron physics. 1955. Vol. 7, p. 239-298.

WEICHART, J. y ELGHAZZALI, M. PVD Processes in high aspect ratio features by HIPIMS. En: Society of Vacuum Coaters. Mayo 2009. Vol. 52, p. 201-206.

WEST, G. T.; KELLY, P. J.; BRADLEY, J. W. A comparison of thin silver films grown onto zinc oxide via conventional magnetron sputtering and HiPIMS deposition. En: IEEE Transactions on Plasma Science. 2010. Vol. 38, No. 11, p. 3057-3061.

WINDOW, B. y SAVVIDES, N. Charge particle fluxes from planar magnetron sputtering sources. En: Journal of Vacuum Science & Technology A. 1986. Vol 4, No. 2, p. 196-202.