

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE LA VIDA ÚTIL DE LA  
HERRAMIENTA DE CORTE BASADO EN LA NORMA ISO 8688-1**

**Autor:**

**JOSÉ HUMBERTO ARÉVALO RUEDAS**



**PROGRAMA DE MAESTRÍA EN INGENIERÍA INDUSTRIAL  
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA  
UNIVERSIDAD DE PAMPLONA**

PAMPLONA

17 de Agosto 2018

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE LA VIDA ÚTIL DE LA  
HERRAMIENTA DE CORTE BASADO EN LA NORMA ISO 8688-1**

**Autor:**

**JOSÉ HUMBERTO ARÉVALO RUEDAS**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de  
MAGISTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**Directora: LUZ KARIME HERNADEZ GEGEN**

Dra. Ing.- Mecánica

**Codirector: EDISON MARTINEZ OVIEDO**

M.Sc. Controles Industriales

**PROGRAMA DE MAESTRÍA EN INGENIERÍA INDUSTRIAL  
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA  
UNIVERSIDAD DE PAMPLONA**

PAMPLONA

30 de Agosto 2018

## TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
2.	JUSTIFICACIÓN.....	2
3.	OBJETIVOS.....	3
3.1.	OBJETIVO GENERAL.....	3
3.1.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	3
4.	MARCO TEÓRICO Y ESTADO ACTUAL .....	4
4.1.	MARCO TEÓRICO. ....	4
4.2.	ESTADO ACTUAL .....	18
5.	CONDICIONES, MÉTODOS Y ENSAYOS .....	23
5.1.	MÁQUINA-HERRAMIENTA.....	23
5.2.	EQUIPOS.....	24
5.2.1.	Rugosímetro .....	24
5.2.2.	Electro-microscopio .....	25
5.2.3.	Cámara UHCCD marca Sony .....	26
5.2.4.	Durómetro .....	27
5.2.5.	Refractómetro.....	28
5.2.6.	Renishaw OMI-2T .....	28
5.2.7.	Indicador de caratula.....	29
5.2.8.	Base-magnética .....	30
5.3.	MATERIALES .....	30
5.3.1.	Pieza de trabajo .....	30
5.3.2.	Dureza de la pieza .....	31

5.3.3.	Composición química del material .....	32
5.3.4.	Dimensiones de la pieza.....	32
5.4.	HERRAMIENTA DE CORTE.....	33
5.4.1.	Montaje de la herramienta.....	33
5.4.2.	Geometría de la herramienta .....	34
5.4.3.	Material de la Herramienta .....	36
5.5.	FLUIDO DE CORTE .....	36
5.5.1.	Tipos de fluidos para corte.....	36
5.5.2.	Efectos de los fluidos de corte. ....	37
5.5.3.	Tipo de fluido de corte a utilizar.....	38
5.5.4.	Tasa de flujo de corte.....	39
5.5.5.	Velocidad de flujo.....	39
5.6.	CONDICIONES DE CORTE.....	39
5.6.1.	Condiciones de corte recomendadas.....	39
5.6.2.	Localizacion de la cuchilla.....	40
5.7.	MÉTODOS .....	41
5.8.	ENSAYOS .....	41
5.8.1.	Ensayos mecánicos y adquisición de imágenes.....	43
5.8.2.	Preparación de los Equipos de Ensayos.....	46
5.8.3.	Adquisición y procesamiento de Imágenes.....	48
5.8.4.	Análisis realizados sobre las imágenes.....	49
5.9.	CRITERIO DE VIDA ÚTIL.....	55
6.	RESULTADOS .....	57
6.1.	Procesamiento de imágenes .....	58
6.2.	Adquisición y segmentación.....	58

6.3.	Obtención de descriptores a partir de las imágenes.....	61
6.4.	Rugosidad, Gráfica y tendencia.....	63
6.5.	Sistema Renishaw.....	65
7.	CONCLUSIONES.....	67
8.	RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	70
9.	BIBLIOGRAFÍA.....	71
10.	ANEXOS.....	75

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Sistema de codificación.....	13
Tabla 2. Longitudes básicas de muestreo.....	15
Tabla 3. Rugosidad superficial $R_a$ (Lara, 2015).....	16
Tabla 4. Rugosidad superficial $R_a$ (Kalpakjian & Schmid, 2008).....	17
Tabla 5. Especificaciones técnicas de la fresadora LEADWELL V32i.....	23
Tabla 6. Especificaciones técnicas Rugosímetro TR200.....	25
Tabla 7. Especificaciones técnicas Electro-microscopio óptico SMZ800.....	25
Tabla 8. Características técnicas. Cámara UHCCD marca Sony.....	26
Tabla 9. Sistemas de clasificación grado C de los aceros.....	31
Tabla 10. Características de la composición química C5.....	32
Tabla 11. Especificaciones del fabricante del inserto.....	35
Tabla 12. Recomendaciones generales de fluidos de corte para maquinado.....	38
Tabla 13. Especificaciones del refrigerante.....	38
Tabla 14. Condiciones de corte.....	39
Tabla 15. Velocidades de corte según el catalogo de la herramienta.....	40
Tabla 16. Plantilla de datos control de pruebas.....	50
Tabla 17. Características geométricas de la marca.....	53
Tabla 18. Datos correspondientes a los descriptores de región simple (inserto 7).....	54
Tabla 20. Valores máximos y mínimos de Descriptores geométricos simples.....	62
Tabla 21. Valores de desgaste de punta y rugosidad.....	63

## LISTA DE FIGURAS

Fig. 1. Velocidad de corte Vs vida de Herramienta.....	4
Fig. 2. Desgaste de flanco uniforme (VB 1).....	6
Fig. 3. Desgaste de flanco uniforme (VB 2).....	7
Fig. 4. Desgaste de flanco localizado (VB 3).....	7
Fig. 5. Desgaste de cráter (KT 1).....	7
Fig. 6. Desgaste de cara formada en escalera (KT 2).....	8
Fig. 7. Astillamiento uniforme (CH 1).....	8
Fig. 8. Astillamiento no uniforme (CH 2).....	8
Fig. 9. Astillamiento localizado (CH 3).....	8
Fig. 10. Grietas de peine (CR 1).....	9
Fig. 11. Grietas paralelas (CR 2).....	9
Fig. 12. Grietas irregulares (CR 3).....	9
Fig. 13. Desgaste de flanco uniforme.....	10
Fig. 14. Deformación plástica (PD).....	10
Fig. 15. Falla catastrófica (CF).....	10
Fig. 16. Fresado frontal.....	14
Fig. 18. Rugosímetro TR200.....	24
Fig. 19. Electro-Microscopio óptico SMZ 800.....	26
Fig.20. Durómetro HR300.....	27
Fig. 21. Refractómetro.....	28
Fig. 22. Renishaw OMI-2T.....	29
Fig. 23. Indicador de caratula.....	29
Fig. 24. Base-magnética.....	30
Fig. 25. Dureza de la pieza.....	31
Fig. 26. Dimensiones de la pieza.....	32
Fig. 27. Herramienta de corte.....	33
Fig. 28. Montaje de la herramienta.....	34

Fig. 29. Descentramiento radial y axial.....	34
Fig. 30. Geometría de la herramienta. ....	35
Fig. 31. Registro de datos de la rugosidad.....	45
Fig. 32. Plantilla de datos de rugosidades y gráficas.....	46
Fig. 33. Imagen inicial.....	50
Fig. 34. Imagen recortada y en escala de grises. ....	51
Fig. 35. Imagen segmentada.....	51
Fig. 36. Imagen en blanco y negro que contiene la marca de desgaste.....	52
Fig. 37. Marca de desgaste mejorada. ....	52
Fig. 38. Imagen de la marca de desgaste final.....	52
Fig. 39. Gráfica del área de desgaste (inserto 7) .....	54
Fig. 40. Gráfica eje mayor (inserto 7). ....	55
Fig. 41. Gráfica eje menor (inserto 7). ....	55
Fig. 42. Ecuación del comportamiento de desgaste (inserto 7).....	55
Fig. 43. Porta-plaquitas.....	59
Fig. 44. Electro-microscopio.....	59
Fig. 45. Mala iluminación del inserto.....	60
Fig. 46. Pasos realizados en la segmentación.....	61
Fig. 47. Gráfico de rugosidad $R_a$ . ....	64
Fig. 48. Tendencia de la rugosidad $R_a$ .....	64
Fig. 49. Gráfico de rugosidad $R_z$ .....	65
Fig. 50. Tendencia de la rugosidad $R_z$ .....	65
Fig. 51. Gráfico desgaste de punta. ....	66
Fig. 52. Gráfico de tendencia desgaste de punta. ....	66
Fig. 53. Inserto fracturado primera etapa. ....	67
Fig. 54. Inserto fracturado segunda etapa.....	68

## **Anexos**

Anexo 1. Tablas correspondientes a los descriptores.....	75
Anexo 2. Gráficas de tendencia al desgaste. ....	83
Anexo 3. Gráficas de desgaste del área. ....	87
Anexo 4. Gráficas de desgaste eje mayor.....	90
Anexo 5. Gráficas de desgaste eje menor.....	93

## 1. INTRODUCCIÓN

La extensión de la vida útil de las herramientas de corte utilizadas en procesos de arranque de material, suponen un ahorro relevante en cuanto a los tiempos y costos de producción. Los tiempos muertos en el mecanizado, en especial los vinculados con el cambio de herramientas representan un porcentaje significativo en las paradas de máquina, las cuales no siempre son necesarias pues su vida útil aún puede estar vigente.

Existen dos maneras de mirar el estado de vida de la herramienta y tomar la decisión si se cambia o todavía es útil; una de ellas hace referencia a la destreza que tenga el operario en identificar este estado, otra opción, es según la normativa ISO 8688-1 donde se estipulan unos criterios de desgaste para establecer si la herramienta es útil o no. En cualquiera de los dos casos, el criterio es conservador impidiendo que la herramienta se utilice en su máxima capacidad o que sea cambiada antes de tiempo, teniendo todavía una vida útil por delante con un buen acabado superficial dentro de la pieza. Después de lo expuesto se pretende evaluar el comportamiento de la vida útil de la herramienta de corte basado en la norma ISO 8688-1 sometiendo a evaluación, la normativa que rige el criterio de desgaste de herramientas.

## 2. JUSTIFICACIÓN

En la actualidad, las industrias de maquinado que trabajan con herramientas de insertos para trabajos en centros mecanizados se rigen por la norma ISO 8688-1 con el fin de lograr procesos que den confiabilidad. Sin embargo, esta norma data de 1989 (hace 29 años). Si se tienen en cuenta los avances tecnológicos que han revolucionado la industria en los últimos años, se puede apreciar la creación de nuevos materiales y técnicas de mecanizado que hacen parte de esta evolución. Por tal motivo, se requiere determinar la manera cómo se desgasta la herramienta, teniendo en cuenta el criterio de la norma al evaluar su estado. De esta manera se obtienen productos maquinados que cuenten con una óptima calidad y costos de producción controlados.

En la industria secundaria el sector de máquinas y herramientas juega un papel importante garantizando la transformación de la materia prima de una manera eficiente. Uno de los factores que proporcionan costo adicional al producto, son los llamados tiempos muertos, los cuales, hacen referencia a las paradas de máquinas para realizar cambios de herramienta, inspección de la pieza, cambio de material, paradas programadas, etc. Siendo el cambio de herramienta una de las paradas que más contribuye a los tiempos muertos, se hace relevante sacar el mayor provecho a las herramientas asegurando la reducción de los mismos sin poner en riesgo la calidad de la pieza. Es por ello por lo que surge el siguiente interrogante. ¿Es posible tener un mejor aprovechamiento de la herramienta y así minimizar costos en las operaciones de arranque de material? Mediante este trabajo investigativo se pretende estudiar el comportamiento de la herramienta de corte en procesos de fresado y su vida útil, dando respuesta al interrogante y determinado así la vigencia de la norma.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1. OBJETIVO GENERAL.**

Analizar el comportamiento de la vida útil de la herramienta de corte basado en la norma ISO 8688-1.

#### **3.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Definir los parámetros de dimensión de la pieza, velocidad del husillo, velocidad de corte y profundidad de la herramienta, para el proceso de maquinado según la norma ISO 8688-1.
- Efectuar las prácticas requeridas para desgastar herramientas y medir el desgaste de las mismas.
- Crear una base de datos con la información de desgaste y acabado superficial de la herramienta.
- Identificar el criterio de la vida útil de la herramienta de corte, de acuerdo con la norma ISO 8688-1 mediante el proceso de desbaste.
- Emitir un concepto sobre el comportamiento de la vida útil de la herramienta de corte basado en la norma ISO 8688-1 y los métodos actuales.

## 4. MARCO TEÓRICO Y ESTADO ACTUAL

### 4.1. MARCO TEÓRICO.

En la Revolución Industrial el hierro fue el material más importante de la época permitiendo fabricar herramientas mediante procesos de fundición en crisol. La manufactura y aplicaciones del material fueron evolucionando a medida que se pudieron alejar con otros materiales, es así como se dio a conocer Taylor, uno de los personajes importante para las herramientas de corte.

En Pensilvania y Filadelfia, se iniciaron los primeros experimentos que duraron aproximadamente un cuarto de siglo y arrojaron procedimientos de corte de metales, entre los cuales resultaron los trabajos de Taylor. Uno de ellos, fue los aceros de alta velocidad (HSS), estos aceros permitieron velocidades sustancialmente altas comparadas con las herramientas de corte anterior. Entre los trabajos realizados, se obtuvo tratamientos térmicos refinados que permitieron duplicar velocidades de producción, hasta cuatro veces mayores que las obtenidas con herramientas fabricadas en acero fundido al carbón (Mikell P. Groover, 1997).

Si se trazan los valores de velocidad de corte contra vida de la herramienta da como resultado la ecuación de Taylor, representada en una línea recta tal como se observa en la Fig. 1.

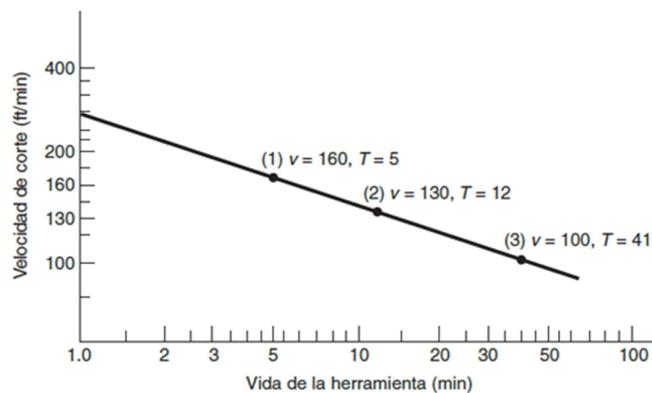


Fig. 1. Velocidad de corte Vs vida de Herramienta.

Fuente: Pág. 547 (Mikell P. Groover, 1997).

El análisis matemático de la representación de la vida útil de una herramienta de la manera que lo hace Groover en su libro *Fundamentos de Manufactura Moderna* (Mikell P. Groover, 1997). Ver Ecuación 1. Fig. 1 permite

*Ecuación 1. Vida útil de la herramienta de corte.*

$$Vt^n = C$$

Dónde:

$v$  \_ velocidad de corte, m/min

$t$  \_ vida de la herramienta, min

$n$  y  $C$  son parámetros cuyos valores dependen del avance, de la profundidad de corte, del material de corte, de la herramienta.

Este desgaste o deterioro se puede presentar en tres partes de la herramienta: cráter, punta o flanco y la manera estandarizada de evaluarlo es teniendo en cuenta la normativa vigente. La norma ISO 8688 recomienda que el deterioro de la herramienta en forma de desgaste sea usada para determinar la vida útil de la herramienta, (NORMA ISO 8688/1.; 1989).

Cada tipo de deterioro progresará u ocurrirá en una variedad de maneras dependiendo de las condiciones de corte. Para ayudar tanto al reporte de la prueba como la interpretación del mismo se recomienda un sistema de clasificación codificado que permita dar una descripción detallada de la forma de deterioro (NORMA ISO 8688/1.; 1989).

En la práctica, diferentes tipos de deterioro ocurrirán junto con el mecanizado. Es deseable, por lo tanto, ser capaz de dar información concerniente al deterioro de la herramienta en función de su utilidad, es decir detectar el nivel de desgaste de la herramienta mientras esta aún puede mecanizar piezas que mantengan un buen acabado superficial y control dimensional (NORMA ISO 8688/1.; 1989).

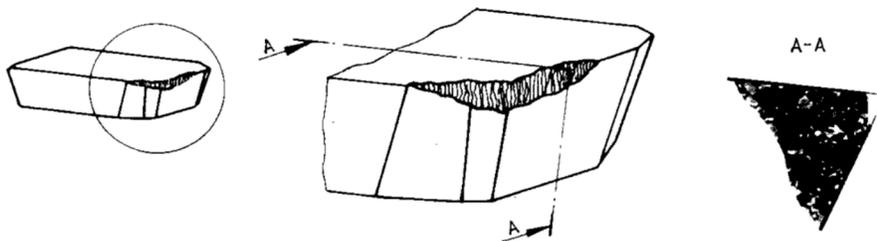
Con el fin de ser capaz de determinar la vida de la herramienta y comparar la influencia de diferentes parámetros como avance, profundidad de corte y velocidad, es necesario seleccionar un tipo definido de deterioro del lado cortante de la herramienta

estableciendo un criterio según la norma (NORMA ISO 8688/1.; 1989). El criterio de la vida de la herramienta puede ser un valor numérico predeterminado que se mide asociado con el deterioro de la herramienta. Este deterioro debe ser registrado continuamente detectando el momento en el que se acerca a los límites definidos como vida útil de la herramienta según los valores establecidos.

En las siguientes figuras de la 2 a la 15 se muestran los tipos de desgaste, su sigla correspondiente y los lados que deben ser medidos (sección A-A), en una herramienta de corte de planeado.

La forma cómo se determinará la medida del valor de la sección A-A, será por medio de un tratamiento de imágenes mediante un aplicativo en Matlab. De esta manera se conocerá la longitud de la mella y el tipo de desgaste presentado por la herramienta de corte.

En las figuras 2 a 15 se muestran los lados que deben ser medidos y tenidos en cuenta a la hora de establecer un criterio de desgaste y los diferentes tipos de desgaste que se pueden presentar. En este trabajo se considera analizar solo el desgaste en punta pues dada la operación de planeado a realizar en la práctica es donde mejor se puede observar la mella.



*Fig. 2. Desgaste de flanco uniforme (VB 1).*

*Fuente: (NORMA ISO 8688/1.; 1989).*

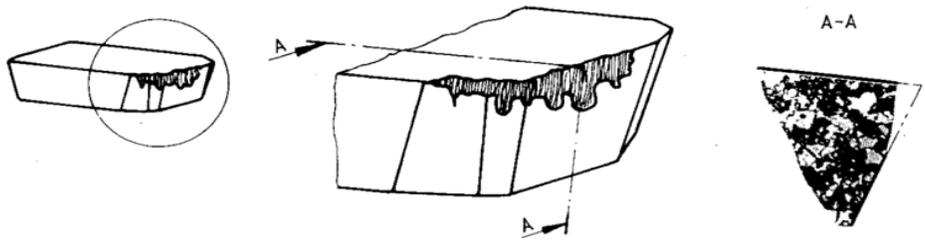


Fig. 3. Desgaste de flanco uniforme (VB 2).

Fuente: (NORMA ISO 8688/1.; 1989).

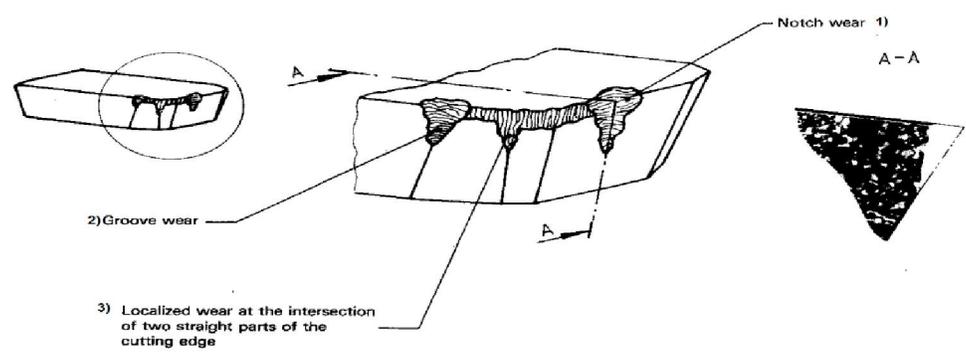


Fig. 4. Desgaste de flanco localizado (VB 3).

Fuente: (NORMA ISO 8688/1.; 1989).

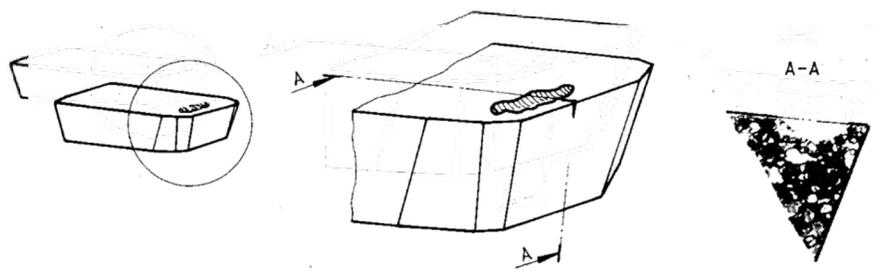
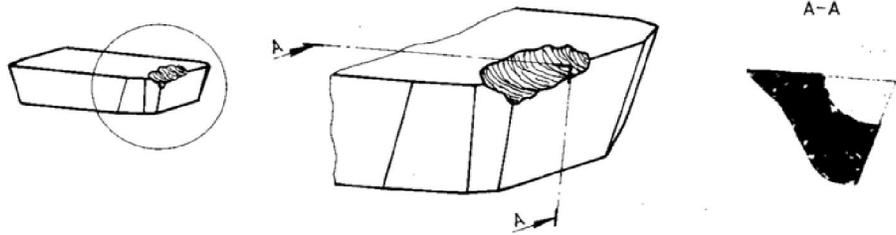


Fig. 5. Desgaste de cráter (KT 1).

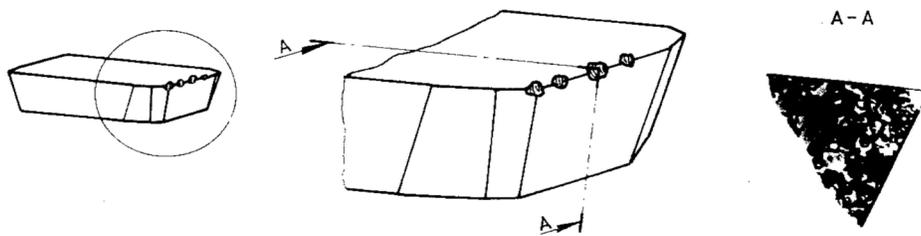
Fuente: (NORMA ISO 8688/1.; 1989).

Fig. 6. Desgaste de cara formada en escalera (KT 2).



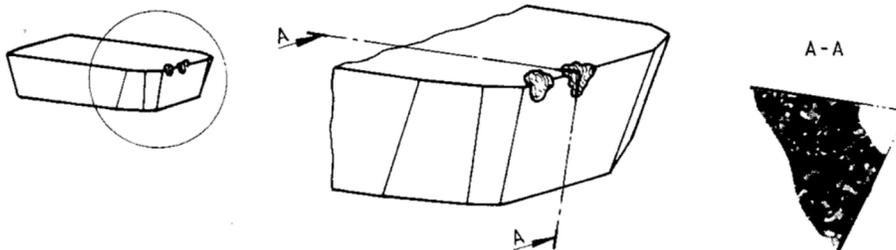
Fuente: (NORMA ISO 8688/1.; 1989).

Fig. 7. Astillamiento uniforme (CH 1).



Fuente: (NORMA ISO 8688/1.; 1989).

Fig. 8. Astillamiento no uniforme (CH 2).



Fuente: (NORMA ISO 8688/1.; 1989).

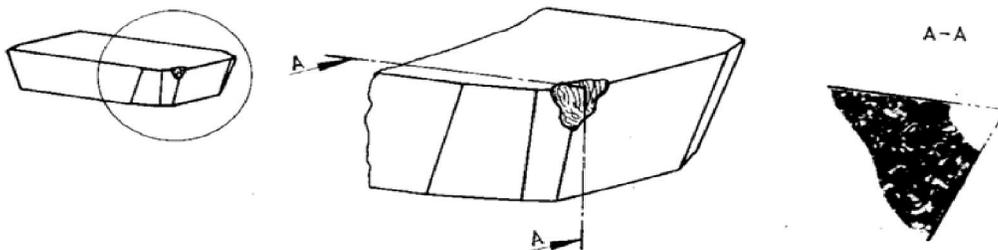
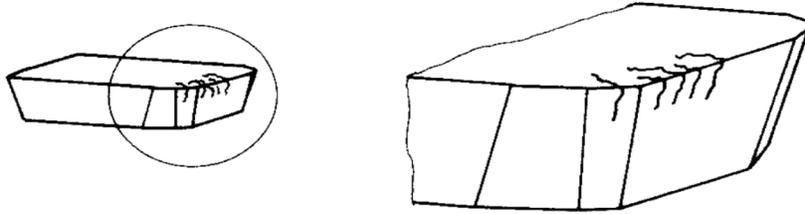


Fig. 9. Astillamiento localizado (CH 3).

Fuente: (NORMA ISO 8688/1.; 1989).

Fig. 10. Grietas de peine (CR 1).



Fuente: (NORMA ISO 8688/1.; 1989).

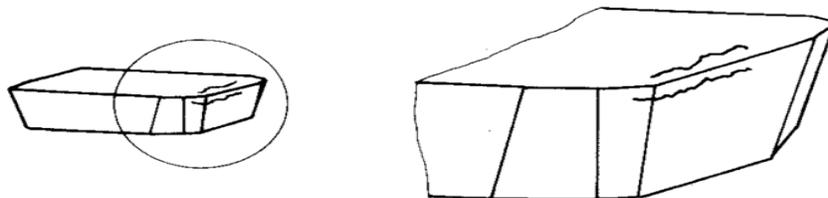


Fig. 11. Grietas paralelas (CR 2).

Fuente: (NORMA ISO 8688/1.; 1989).

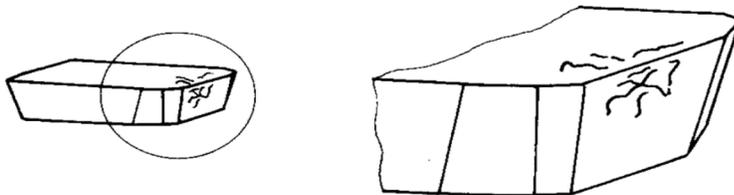
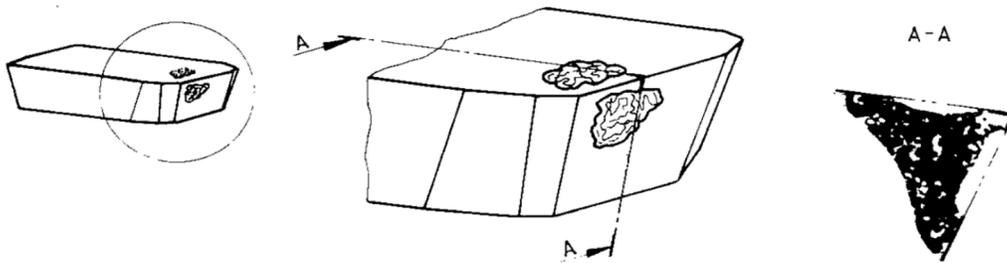


Fig. 12. Grietas irregulares (CR 3).

Fuente: (NORMA ISO 8688/1.; 1989).

Fig. 13. Desgaste de flanco uniforme.



Fuente: (NORMA ISO 8688/1.; 1989).

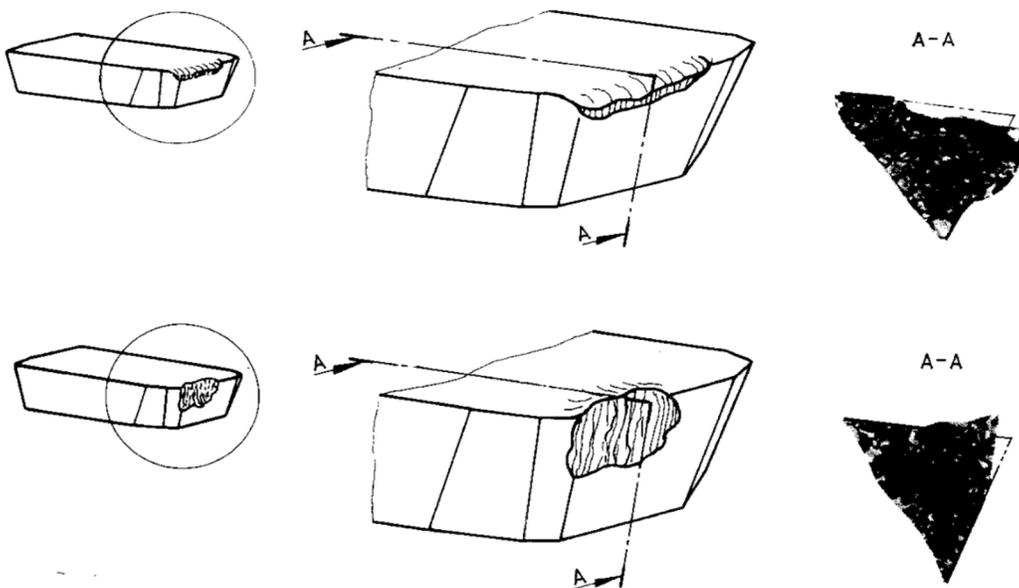


Fig. 14. Deformación plástica (PD).

Fuente: (NORMA ISO 8688/1.; 1989).

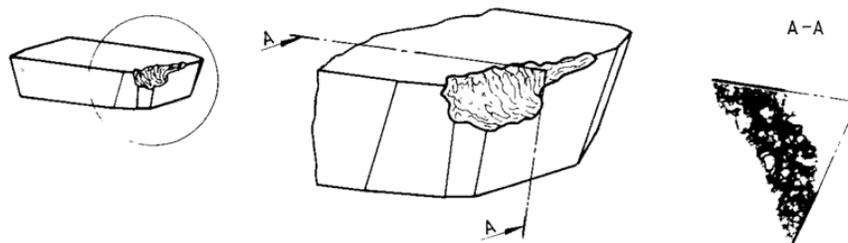


Fig. 15. Falla catastrófica (CF).

Fuente: (NORMA ISO 8688/1.; 1989).

Con el fin de ser capaz de determinar la vida de la herramienta y comparar la influencia de diferentes parámetros de prueba es necesario seleccionar un tipo definido de deterioro de la parte cortante como un criterio a mantener en todas las pruebas (NORMA ISO 8688/1:, 1989).

El ancho de la superficie de desgaste de flanco (VB) es el criterio más comúnmente usado en operaciones de torneado. De igual manera la profundidad del cráter sobre la cara de la herramienta (KT1) o la altura del escalón (KT2) son usados ocasionalmente como criterio. En el caso de operaciones de fresado, el primer contacto de la herramienta es recibido por la punta y el desgaste se ve mejor reflejado en dicha cara. Por tal razón, son las imágenes de punta las que mayor interés tienen para esta investigación.

El número de pruebas a realizar depende de la evolución en el desgaste de la herramienta y su vida útil. Si el número de pruebas es bajo cabe la posibilidad de conseguir poco desgaste en la herramienta y desechar una herramienta que aún se encuentra útil. Si el número de pruebas o pasadas con la misma herramienta es alto se consigue aprovechar la herramienta durante más tiempo, pero el acabado superficial puede llevar a conseguir una pieza de pésimo acabado no apta para su aplicación.

Para satisfacer los requerimientos de prueba para la mayoría de usuarios de acero y hierro fundido convencional se especifica un conjunto de tres valores limitantes por cada criterio de deterioro (NORMA ISO 8688/1:, 1989). Estos tres valores son (N, L y S), el cual se especifican a continuación, y se muestran en la *Tabla 2*.

El valor numérico de las diversas mediciones de deterioro de herramientas indicadas en el título “criterio de la vida de la herramienta” se usa como se especifica a continuación, (NORMA ISO 8688/1:, 1989).

Normal (N): los valores bajo este título se aplican para las condiciones de corte, donde se hace referencia a las condiciones de corte de la herramienta, localización de la cuchilla y velocidad de corte sobre materiales de trabajo similar a los materiales de trabajo de referencia a la norma ISO 8688/1, donde especifica la composición del material recomendado a trabajar y donde se especifican las condiciones de la herramienta de corte. Los valores seleccionados son un compromiso razonable entre fiabilidad, costos de prueba

e intensidad del deterioro normal. Normalmente uno de los valores numéricos se alcanzará antes de que ocurra la destrucción total de las partes cortantes.

Grande (L): los valores bajo este título dan más información acerca de la capacidad de una herramienta bajo condiciones de pruebas. El uso de estos valores es especialmente recomendable en los casos en que las capacidades máximas de las partes de corte y la causa de la destrucción final han de ser evaluados y donde los costos de más altos consumos de materiales no son prohibitivos.

Pequeño (S): los valores bajo este título dan menos información de la capacidad de una herramienta bajo condiciones de prueba. Los usos de estos valores mínimos son permitidos solo en casos donde los costos de consumo de materiales son muy altos como puede ser el caso con herramientas de corte muy resistentes al desgaste o materiales de trabajo muy costosos. No se recomienda la adopción de valores más pequeños que los valores más pequeños especificados en esta parte de la norma ISO 8688 (NORMA ISO 8688/1.; 1989).

En casos donde no se apliquen ninguno de los criterios recomendados, es posible obtener información significativa con el uso de los siguientes criterios.

- Astillamiento (CH, en la forma moderada A o B, ver Tabla 1), es un criterio que puede ser usado.
- Agrietamiento (CR) es un fenómeno común y algunas veces es usado como criterio.
- Astillamiento (CH) en la forma más pesada (Tabla 1), flanqueo (FL), deformación plástica (PD) y falla catastrófica (CF) son formas que excepcionalmente pueden usarse como criterio (NORMA ISO 8688/1.; 1989).

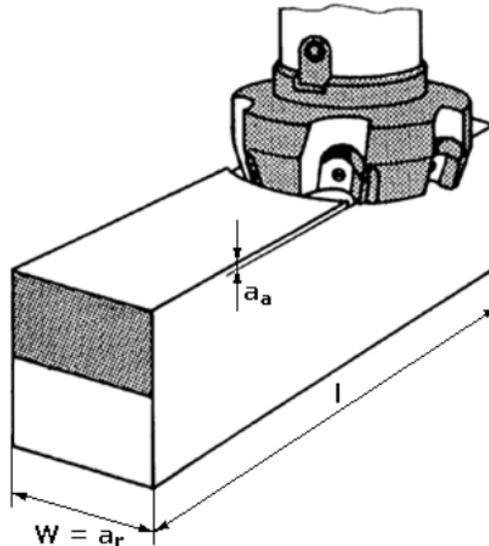
Code	Description of tool deterioration						
Basic form Distribution Subdivision							
	Tool deterioration phenomena		Criteria, mm			Illustration	
		S	N	L			
VB	Flank wear						
1	Uniform	0,2	0,35	0,5			
2	Non-uniform	0,9	1,2	1,5			
3	Localized	0,8	1	1,2			
KT	Face wear						
1	Crater wear :	Depth	0,05	0,1		0,15	
		Width*	.....	.....		.....	
		Distance*	.....	.....		.....	
2	Stair forms :	Depth	0,25	0,3		0,35	
		Depth/width*	.....	.....		.....	
CH	Chipping (breakage)						
1	Uniform		For y or z with corresponding length values				
2	Non-uniform						
3	Localized						
A	Micro-chipping	Length, mm	< 0,3	0,2		0,25	0,3
B	Macro-chipping		0,3 to 1	0,25		0,4	0,5
Code	Description of tool deterioration						
Basic form Distribution Subdivision	Tool deterioration phenomena		Criteria, mm			Illustration	
			S	N	L		
CR	Cracks						
1	Cracks perpendicular to the edge		The number of the largest cracks and the mean distance between them shall be recorded				
2	Cracks parallel to the edge						
3	Irregular direction						

Tabla 1. Sistema de codificación.

Fuente: (NORMA ISO 8688/1.; 1989).

Para la realización de los ensayos se hará uso de la norma ISO 8688 Tool life testing in milling, especialmente de la parte 1 que se refieren a fresado frontal.

La primera parte de la norma ISO 8688 (Norma ISO 8688-1 Face milling) está dedicada al fresado frontal, proceso de mecanizado que se representa en la *Fig. 16*.



*Fig. 16. Fresado frontal.*

*Fuente: (NORMA ISO 8688/1:, 1989).*

Para la medición de la rugosidad superficial se ha hecho uso de la norma UNE 4288 Especificación geométrica de productos (GPS) donde se determinan las reglas y procedimientos a seguir con el fin de poder comparar con los límites de tolerancia de los valores adquiridos de los parámetros del acabado superficial leídos (Lara, 2015).

En esta norma entre otros aspectos que son tratados, se ha seguido principalmente el apartado de Reglas y Procedimientos de verificación utilizando instrumentos de palpador,

Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Longitud básica de muestreo de rugosidad $l_r$ [mm]	Longitud de evaluación de rugosidad $l_n$ [mm]
$0,006 < Ra \leq 0,02$	0,08	0,4
$0,02 < Ra \leq 0,1$	0,25	1,25
$0,1 < Ra \leq 2$	0,8	4
$2 < Ra \leq 10$	2,5	12,5
$10 < Ra \leq 80$	8	40

*Tabla 2. Longitudes básicas de muestreo.*

*Fuente: (Lara, 2015).*

Cuyo fin es la elección de la longitud básica de muestreo en función de los valores de la rugosidad media aritmética Ra. Como el perfil generado es no periódico, mediante el valor teórico de Ra se asigna el valor de longitud básica de muestreo correspondiente al intervalo en el que se encuentra, según se muestra en la *Tabla 3*, (Lara, 2015).

De igual manera se puede observar los valores de la rugosidad recomendados por Groover (Mikell P. Groover, 1997) *Tabla 3*, y los establecidos por Manufactura, Ingeniería y Tecnología (Kalpakjian & Schmid, 2008) *Tabla 4*.

Tabla 3. Rugosidad superficial  $R_a$ . (Lara, 2015).

Operación de maquinado	Capacidad de tolerancia -Típica		Rugosidad superficial AA-Típica		Operación de maquinado	Capacidad de tolerancia -Típica		Rugosidad superficial AA-Típica	
	mm	in	$\mu\text{m}$	$\mu\text{-in}$		mm	in	$\mu\text{m}$	$\mu\text{-in}$
Torneado, barrenado			0.8	32	Rimado			0.4	16
Diámetro $D < 25$ mm	$\pm 0.025$	$\pm 0.001$			Diámetro $D < 12$ mm	$\pm 0.025$	$\pm 0.001$		
$25 \text{ mm} < D < 50$ mm	$\pm 0.05$	$\pm 0.002$			$12 \text{ mm} < D < 25$ mm	$\pm 0.05$	$\pm 0.002$		
Diámetro $D > 50$ mm	$\pm 0.075$	$\pm 0.003$			Diámetro $D > 25$ mm	$\pm 0.075$	$\pm 0.003$		
Perforado*			0.8	32	Fresado			0.4	16
Diámetro $D < 2.5$ mm	$\pm 0.05$	$\pm 0.002$			Periférico	$\pm 0.025$	$\pm 0.001$		
$2.5 \text{ mm} < D < 6$ mm	$\pm 0.075$	$\pm 0.003$			De frente	$\pm 0.025$	$\pm 0.001$		
$6 \text{ mm} < D < 12$ mm	$\pm 0.10$	$\pm 0.004$			Terminal	$\pm 0.05$	$\pm 0.002$		
$12 \text{ mm} < D < 25$ mm	$\pm 0.125$	$\pm 0.005$			Perfilado, ranurado	$\pm 0.025$	$\pm 0.001$	1.6	63
Diámetro $D > 25$ mm	$\pm 0.20$	$\pm 0.008$			Cepillado	$\pm 0.075$	$\pm 0.003$	1.6	63
Escariado	$\pm 0.025$	$\pm 0.001$	0.2	8	Aserrado	$\pm 0.50$	$\pm 0.02$	6.0	250

Fuente: (Lara, 2015).

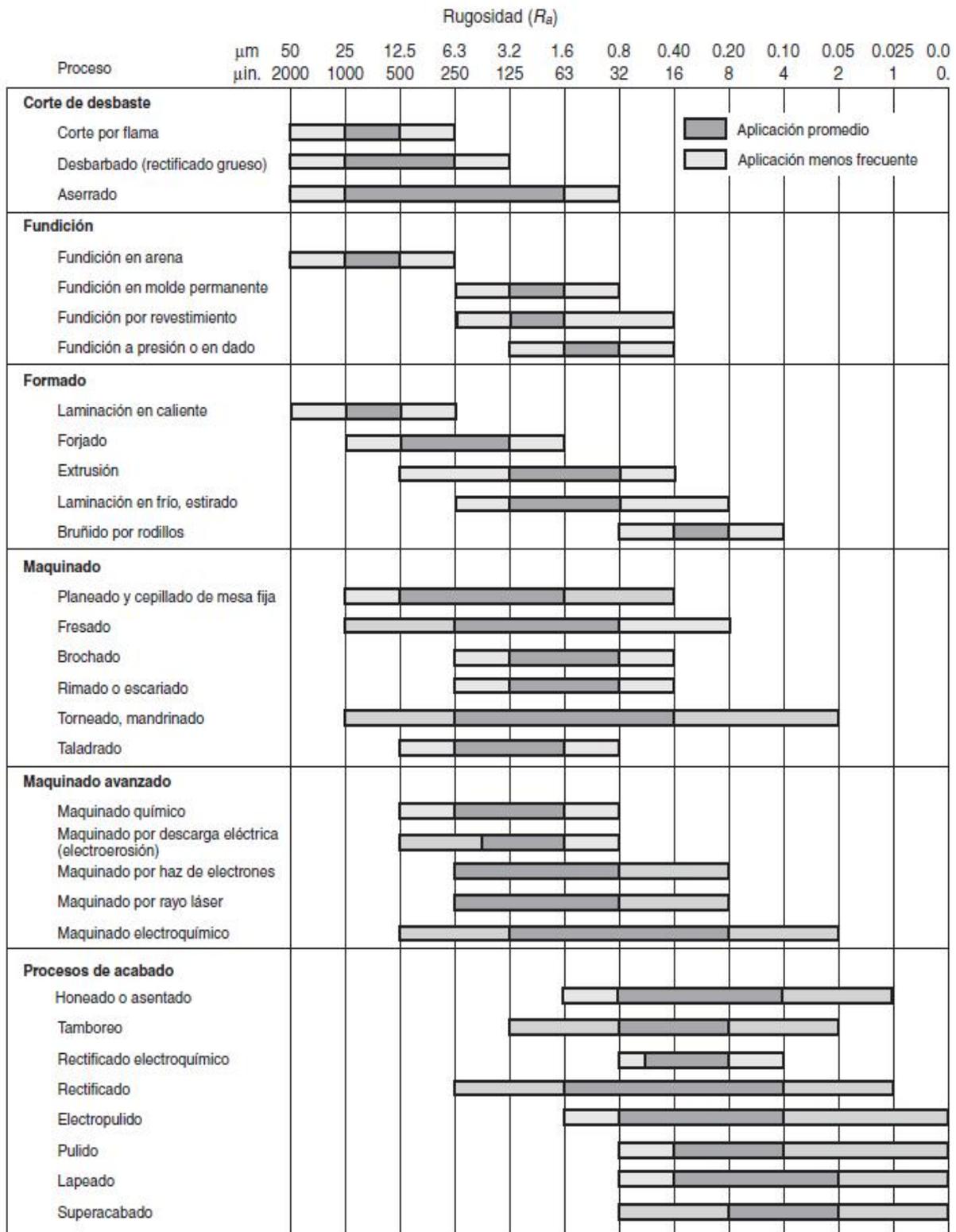


Tabla 4. Rugosidad superficial  $R_a$ . (Kalpakjian & Schmid, 2008).

*Fuente: (Kalpakjian & Schmid, 2008).*

## **4.2. ESTADO ACTUAL**

En la actualidad, las piezas generadas mediante arranque de viruta son obtenidas por operaciones de mecanizado en las cuales están presente parámetros importantes (vida útil de la herramienta de corte, rendimiento del inserto, velocidad de corte, fluido de corte, avance de la herramienta y la rugosidad superficial) para obtener acabados óptimos en los procesos de arranque de viruta. Estos parámetros son relevantes en los procesos de fabricación en las industrias metalmecánicas de hoy en día.

La continua competencia industrial busca estrategias para minimizar procesos, donde se involucran mejoras continuas en tiempos y costos de producción, de ahí la importancia de realizar estudios que permitan ofrecer menores costos sin sacrificar la calidad. Algunas operaciones de manufactura son estudiadas a profundidad con el propósito de una mejora continua. En el caso del arranque de material es preciso mencionar aportes enfocados a mejorar los acabados superficiales como los de los siguientes autores.

Moisés Hinojosa (Moisés Hinojosa Rivera, 2001) es uno de los primeros autores que pone en discusión la importancia de las mediciones de la rugosidad y las técnicas más comunes para registrar los perfiles topográficos.

Un par de años después Guerrero et al (Guerrero, Flores, & Acosta, 2003) plantean un método basado en la descomposición de la rugosidad en términos de análisis de frecuencia, con el fin de identificar las marcas de herramientas en una superficie mecanizada.

Este tipo de estudios tuvo más auge en la década siguiente donde equipos como el de Alves (Alves, Ferreira, & Leta, 2011) evalúan la rugosidad superficial a través de una imagen. Por medio de un sistema de descriptores de Haralick se alimenta una red neuronal que facilita el reconocimiento de la rugosidad superficial.

De igual manera Flórez et all (Florez, Correa, & Alique, 2011) presentan una técnica softcomputing que genera un modelo pre-proceso predictivo de la rugosidad superficial, basado en experimentación con características diversas del proceso de fresado a alta velocidad.

Cabe decir que en el 2013 (Francisco, Issam, Abdellatif, Abdallah, & Mohamed, 2013) establecen las relaciones entre las condiciones de corte (velocidad de corte  $V_c$  y velocidad de avance  $V_a$ ) y la rugosidad, desarrollando modelos matemáticos de segundo orden.

Tomando como parámetros variables la velocidad de corte y el avance también se encuentra el estudio del artículo de (Hernández-González, Pérez-Rodríguez, Dumitrescu, Montero-Sarmiento, & Montero-Sarmiento, 2015). Los autores buscan en el fresado en seco de una superficie plana, un estudio experimental, mostrando que el fresado no provocó cambios en la microestructura del acero, donde los valores de rugosidad superficial fueron apropiados, el efecto del avance fue variable, mientras que el menor valor de la rugosidad se presentó para el mayor valor de la velocidad de corte.

Cabe decir que Lara (Lara, 2015) se enfocó en el estudio de la influencia de los parámetros de corte de forma conjunta en el acabado superficial en procesos de fresado frontal y combinados. Determinando la influencia del avance y velocidad de corte en materiales, a partir de la medición de la rugosidad superficial.

En el mismo año se utilizaron herramientas de corte de carburo cementado, (Melorose, Perroy, & Careas, 2015) con el fin de investigar la influencia de los parámetros de corte, el número de inserciones y la longitud de corte en la cara fresada y rugosidad de la superficie.

(Valencia & Alisis, 2007) buscaron profundizar el análisis y diseño de un sistema inteligente para la predicción y control del acabado superficial en un proceso de fresado a

alta velocidad, basado fundamentalmente en clasificadores Bayesianos, con el propósito de desarrollar una metodología que facilite el diseño de este tipo de sistemas.

Desde el análisis de elementos finitos FEM, Lorentzon (J. Lorentzon, 2008) implemento un código comercial para predecir el desgaste de la herramienta.

Tomando el desempeño de las herramientas, no solo por la prolongación de su vida, si no por su aumento de productividad Castillo (Castillo, 2009), se basó en el estudio dimensional de las variables que permiten atrapar la física del proceso de corte adicionando las variables mecánicas y costos de producción. Se realizaron pruebas con diferentes herramientas con el fin de validar los números planteados en talleres de mecanizado y determinar si las herramientas son utilizadas bajo parámetros óptimos productivos, planteando alternativas de mejoramiento de producción desde una visión técnico-económica.

De hecho (Vagnorius, Rausand, & Sorby, 2010) en su trabajo, buscan modelar el desgaste de la herramienta por medio de una mezcla de distribuciones Weibull, mientras que las fallas a las tensiones externas se aplica por un proceso de Poisson homogéneo

Braga et al (Braga, Neves, Silva, & Parreiras, 2012) utilizan el diseño experimental factorial, para evaluar el fresado frontal asimétrico, utilizando niveles de velocidad de corte, valores de ángulos de posición y ciertas cantidades de aristas en el corte. La velocidad de avance y la profundidad de corte fueron mantenidas constantes.

Adicionando el costo como una variable abstracta desde el punto de vista ingenieril y elemento constitutivo influyente del análisis dimensional (Braga et al., 2012) utilizan una propuesta metodológica que se basa en el estudio dimensional de las variables, conociendo que a través de esta técnica es posible atrapar la física involucrada alrededor del fenómeno de corte.

Posteriormente, Li (Li, 2012) se enfocó en un nuevo desarrollo en la predicción en la evolución del desgaste de herramientas y la vida de la herramienta en el corte ortogonal mediante la simulación con FEM. De esta manera, pudo estimar el desgaste de la herramienta en el corte, que están fuertemente influenciada por la temperatura de corte, las tensiones de contacto, y las tensiones relativas a la interfaz, e introdujo los modelos ocultos de Markov (HMMs) para la predicción de la evolución de desgaste de herramientas y la vida de la herramienta en el corte ortogonal.

(Ramsés Otto Cunha Lima, 2013) presenta un análisis de daño y desgaste de carburo de inserciones, impulsado principalmente por la característica de ciclos térmicos de la ABNT proceso de molienda de acero 1045.

De hecho (de Anda-Rodríguez, G.; Castillo-Castañeda, 2006) presenta una técnica para el monitoreo en línea del desgaste de una herramienta de fresado.

Asociado al efecto que generaría el uso del fluido de corte (Da Silva et al., 2011) en su artículo, afronta las condiciones que acortan la vida de la herramienta y la calidad de la superficie.

Cabe decir que (Ezugwu & Wang, 1997) revisan los principales problemas asociados con el mecanizado de titanio, así como el desgaste de la herramienta y los mecanismos responsables de la falla de la herramienta. Se encontró que el carburo de tungsteno (WC / Co) en herramientas de corte siguen manteniendo su superioridad en casi todos los procesos de mecanizado de aleaciones de titanio.

(Hernández Rossi, Cruz, Casellas Padró, Riera Colom, & Prado Pozuelo, 2007) ofrecen una aproximación a la compleja problemática asociado con la obtención de herramientas predictivas del fenómeno de desgaste empleando simulación numérica.

(NAVARRO & GONZALES, 2012) utilizaron un tipo de investigación experimental, con el propósito de determinar, con la mayor confiabilidad posible,

relaciones de causa-efecto entre el desgaste y el tiempo de vida útil de buriles no implantados e implantados.

Por medio de su trabajo (Pérez, Paz, & Castañeda, 2012) presentaron una técnica para visualizar el desgaste de la herramienta, el cual se calcula directamente a partir de un sensor de desplazamiento láser.

(Shi, Li, He, Zhao, & Liu, 2012) realizaron una serie de experimentos para estudiar la maquinabilidad de una nueva aleación de titanio (TC21).

Como consecuencia a lo anterior expuesto la (NORMA ISO 8688/1:, 1989) especifica procedimientos recomendados para las pruebas de vida de la herramienta con herramientas de carburo cementado usadas para piezas de trabajo de acero y hierro fundido. A su vez establece especificaciones para los factores de prueba de vida de la herramienta en herramientas de planeado.

De los diversos autores 8 tomaron el tema de la rugosidad, 6 analizan la vida útil de la herramienta dependiendo de patrones como: Velocidad de corte, fluido de corte, desgaste de la herramienta, fallas de la herramienta y maquinabilidad.

Mientras que 11 se enfocaron en el diseño experimental y estudio dimensional de las variables.

De los autores anteriormente mencionados ninguno tiene en cuenta la norma ISO 8688-1 bajo la cual establece la vida útil de la herramienta bajo criterios de desgaste, por lo que se hace de esta investigación un aporte a la industria metalmecánica el cual favorece la calidad y costos de los productos manufacturados por arranque de material.

## 5. CONDICIONES, MÉTODOS Y ENSAYOS

### 5.1. MÁQUINA-HERRAMIENTA

En la presente investigación se utilizó una máquina-herramienta marca LEADWELL V32i como se muestra en la *Fig. 17* y cuyas especificaciones técnicas aparecen en la Tabla 5.

*Fig. 17. LEADWELL V32i.*



*Fuente: Autor del proyecto.*

*Tabla 5. Especificaciones técnicas de la fresadora LEADWELL V32i*

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	ESPECIFICACIONES
Longitud mínima de la mesa	Mm	850
Ancho mínimo de la mesa	Mm	400
Carga máxima sobre la mesa	Kg	500-800
Recorrido mínimo eje x	Mm	750
Recorrido mínimo eje y	Mm	410
Recorrido mínimo eje z	Mm	510
Tipo de guías para los tres ejes		Guías lineales de rodillos
Tipo de tornillos de esferas en los tres ejes		Doble circuito de esferas, pre tensionados
Tornillos de esferas xyz (diámetro mínimo)	Mm	40
Avance rápido	m/min	30-36
Avance máximo de mecanizado	Mm/mm	10000-15000
Cono del husillo		BT 40 de doble contacto

Velocidad máxima del husillo	Rpm	10000-12000
Potencia mínima continua	Hp	10
Torque mínimo continuo	Nm	45
Velocidad para 100% potencia	Rpm	Menor o igual a 1500
Fuerza empuje motor x (valor mínimo)	N	5000
Fuerza empuje motor y (valor mínimo)	N	5000
Fuerza empuje motor z (valor mínimo)	N	9000
Tipo de magazín		Magazín de brazo
Número mínimo de herramientas del magazín	Número	24
Tiempo de cambio de herramientas CNC	Segundos	1-2
	FANUC	
	OiMD	
Sistema de enfriamiento alrededor del husillo		
Refrigeración a través del husillo		Bomba de presión mínimo de 20 bar

*Fuente: Autor del proyecto.*

## 5.2. EQUIPOS

Para llevar a cabo la parte experimental se ha utilizado una serie de equipos, el cual se describen a continuación y las características de algunos de ellos.

### 5.2.1. Rugosímetro

Este equipo portátil de medida absoluta dispone de la sensibilidad necesaria para poder medir rugosidades muy finas, a nivel de décimas y/o centésimas de micra.

El equipo que se ha utilizado para la lectura de la rugosidad de los maquinados superficiales es TR200 marca TIME, que se muestra en la *Fig. 18* y cuyas características se indican en la Tabla 6.

*Fig. 18. Rugosímetro TR200*



*Fuente: Autor del proyecto.*

*Tabla 6. Especificaciones técnicas Rugosímetro TR200*

<b>Características</b>	<b>Especificaciones</b>
Precisión	Clase 2 según DIN 4772
Rango de medición	0.005-4000 $\mu\text{m}$
Sistema de medición	$\mu\text{m}$ y $\mu\text{pulgadas}$
Longitudes de corte	0,25 / 0,8 / 2,5 mm
Longitudes transversales según DIN/ISO	1.5/4.8/15 mm
Parámetros	$R_a$ , $R_q$ , $R_z$ , $R_y$ , $R_p$ , $R_t$ , $R_{3t}$ , $R_{sm}$ , $R_s$ , $R_{mr}$
Salida de datos	RS-232 Directo a la impresora o al PC

*Fuente: Autor del proyecto.*

### 5.2.2. Electro-microscopio

Para observar la mella dejada por el desbaste realizado por la herramienta de corte de fresado, tomar las imágenes para el correspondiente tratado de ellas, y así entender el comportamiento que tiene el inserto, se usó un electro-microscopio marca OPTIKA Fig. 19 con una cámara incorporada para la toma de imágenes de 30mm UHCCD marca SONY. Las características técnicas se indican en la Tabla 7.

*Tabla 7. Especificaciones técnicas Electro-microscopio óptico SMZ800*

<b>Características</b>	<b>Especificaciones</b>
Sistema óptico	Sistema de zoom óptico paralelo
Rango de zoom	1x a 6.3x
Relación de zoom	6.3: 1
Ampliación total	5x a 378x dependiendo del ocular y el objetivo utilizado (de 7.5x a 525x cuando se conecta un iluminador episcópico coaxial)
Lentes objetivas	P-Achro 0.5x, P-Plan 1x, P-ERG Plan 1x ERGO, P-Plan Apo 0.5x, Plan ED 0.75x, Plan P-Apo 1x, Plan P-ED 1.5x, Plan P-ED 2x
Tubos de ocular	Tubo ocular binocular, inclinación de 20 °, distancia Inter pupilar: 48-75 mm

Oculares con ajuste dióptrico	CW 10x (FN 22); CW 15x (FN16); CW 20x (FN 12.5); CW 30x (FN 7)
-------------------------------	--

*Fuente: Autor del proyecto.*



*Fig. 19. Electro-Microscopio óptico SMZ 800*

*Fuente: Autor del proyecto.*

### 5.2.3. Cámara UHCCD marca Sony

*Tabla 8. Características técnicas. Cámara UHCCD marca Sony.*

<b>Características</b>	<b>Especificaciones</b>
Temperatura de funcionamiento (°C)	-10 ~ 50
Humedad de funcionamiento	30 ~ 80% RH
fuelle de Alimentación	DC 5 V en el Puerto USB DEL PC
Sistema operativo	Microsoft ® Windows ® XP/Vista/7/8 (32 y 64 bits) os x (Mac OS X) Linux

---

Requisitos del PC	CPU: Igual a Intel Core2 2.8 GHz o Superior memoria: 2 GB o Más Puerto USB: USB \$ NUMBER Puerto de Alta velocidad pantalla: 17 " o Más Grande CD-ROM
-------------------	---

---

*Fuente: Autor del proyecto.*

#### **5.2.4. Durómetro**

Para la caracterización de los aceros en cuanto a dureza ha sido utilizado el durómetro modelo HR300 del fabricante MITUTOYO, ver Fig.20. Se determinó la dureza Rocwell (HRB) de los aceros aplicando una carga de 100 kg con una bola de 1/16 pulgada de diámetro.



*Fig.20. Durómetro HR300*

*Fuente: Autor del proyecto.*

### 5.2.5. Refractómetro

El refractómetro permite obtener una medición del índice de refracción del refrigerante utilizado en el proceso de maquinado. Este dato es importante para saber cuál es la concentración del agua, en la emulsión, requerida por las especificaciones dadas por el fabricante, debido, a que, si la concentración del agua es muy baja, habrá pérdidas en cuanto al rendimiento de la mezcla, en relación con el tiempo de duración con respecto al trabajo



*Fig. 21.* Refractómetro

*Fuente: Autor del proyecto.*

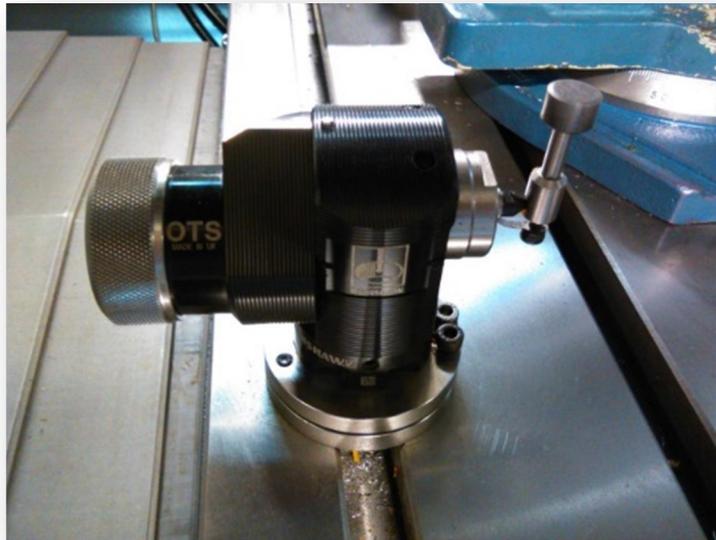
Realizado, por otro lado, si la concentración es muy alta, el refrigerante no estaría produciendo el efecto deseado en la herramienta de corte. Ver *Fig. 21*

### 5.2.6. Renishaw OMI-2T

La gama de soluciones de control de procesos de Renishaw ofrece un enfoque eliminando la variación en todas las etapas de su proceso de mecanizado, respaldado por tecnología, métodos comprobados y apoyo experto.

El sondaje es una buena práctica establecida para maximizar la eficiencia, calidad, capacidad y precisión de las máquinas herramienta. Como tal, la integración de hardware de sondeo Renishaw y el software es ampliamente adoptado dentro de los procesos de mecanizado (Renishaw, 2016). Ver *Fig. 22.*

*Fig. 22. Renishaw OMI-2T.*



*Fuente: Autor del proyecto.*

#### **5.2.7. Indicador de caratula**

Es un instrumento de medición, el cuál fue utilizado en la medición de la excentricidad de la herramienta de corte Fig. 23.

*Fig. 23. Indicador de caratula.*



*Fuente: Autor del proyecto.*

### 5.2.8. Base-magnética

Características: Modelo estándar, altura 322 mm, diámetros del vástago 6 mm a 8 mm.  
mm. Fig. 24. El cual se utilizó para la instalación del indicador de caratula.

*Fig. 24. Base-magnética*



*Fuente: Autor del proyecto.*

## 5.3. MATERIALES

### 5.3.1. Pieza de trabajo

Siguiendo las recomendaciones de la norma (8688-1), se realizaron ensayos mecanizando acero C5 (NORMA ISO 8688/1:, 1989). Los sistemas de clasificación de grado C de la ANSI para los carburos cementados se pueden verificar en la Tabla 9 según la aplicación (Mikell P. Groover, 1997).

Aplicación en el maquinado	Grados de corte no acerado	Grados de corte acerado	El cobalto y sus propiedades
Desbastado	C1	C5	Alto cobalto para máxima tenacidad
Propósito general	C2	C6	De medio a alto Co
Acabado	C3	C7	De medio a bajo Co.
Acabado de precisión	C4	C8	Bajo Co para máxima dureza
Materiales de trabajo	Latón, hierro colado	Carbono y aceros aleados	
Ingredientes típicos	WC-Co	WC-TiC-TaC-Co	

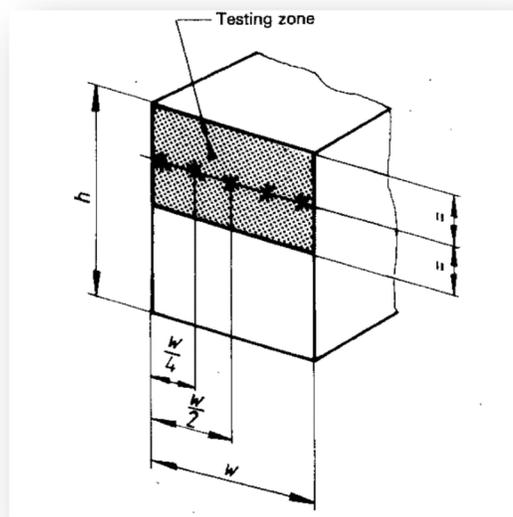
Tabla 9. Sistemas de clasificación grado C de los aceros.

Fuente: (Mikell P. Groover, 1997).

### 5.3.2. Dureza de la pieza

La dureza de la pieza de trabajo se determinó en un extremo de la pieza de ensayo sobre la zona de prueba en la sección transversal. Para las secciones recomendadas de la pieza de trabajo, la dureza de indentación debe situarse a lo largo de la línea central de la zona paralela del borde más largo. El número mínimo de puntos de prueba deben ser cinco; uno en el centro, uno cerca de cada borde y uno en cualquier lado del punto central entre el centro y los puntos de los bordes como lo refleja la Fig. 25 (NORMA ISO 8688/1.; 1989).

Fig. 25. Dureza de la pieza.



Fuente: (NORMA ISO 8688/1.; 1989).

### 5.3.3. Composición química del material

En los laboratorios de la Universidad Francisco de Paula Santander Cúcuta se desarrollaron pruebas con el fin de conocer la composición química del material. La caracterización que se muestra en la Tabla 10 se obtuvo con la ayuda de un microscopio de barrido.

*Tabla 10. Características de la composición química C5.*

C	Mn	P <sub>max</sub>	S <sub>max</sub>
0.43/0.50	0.6/0.90	0.040	0.050

*Fuente: Autor del proyecto*

### 5.3.4. Dimensiones de la pieza

La pieza de trabajo recomendada para el planeado debe ser una barra o un lingote de sección transversal rectangular con un ancho de 0.6 veces el diámetro de la cuchilla (48mm para D=80mm), y una longitud mínima de 3 veces el diámetro de la cuchilla (240mm para D=80mm) (NORMA ISO 8688/1:, 1989).

Fig. 26.

Fig. 26. Dimensiones de la pieza



*Fuente: Autor del proyecto*

Las alturas máximas y mínimas de la pieza de trabajo pueden determinarse de acuerdo con el número de pruebas que se hagan y de la necesidad por propiedades uniformes del material (NORMA ISO 8688/1.; 1989).

#### 5.4. HERRAMIENTA DE CORTE

Se utilizó una herramienta de planeado de 80mm de diámetro y con 7 insertos equidistantes. Se escogió a conveniencia, debido a que ya se poseía dicha herramienta Fig. 27.

*Fig. 27. Herramienta de corte.*

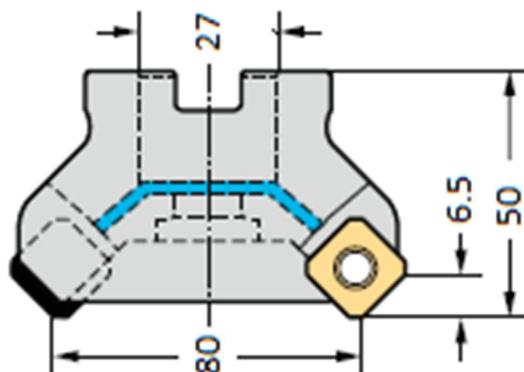


*Fuente: Autor del proyecto*

##### 5.4.1. Montaje de la herramienta.

la herramienta se escogió de acuerdo con las necesidades de la prueba y los recursos propios de las instalaciones del laboratorio

Fig. 28.



*Fig. 28. Montaje de la herramienta*

*Fuente: Autor del proyecto.*

Las cuchillas usadas para las pruebas de planeado deben montarse directamente en el husillo de la máquina. La cuchilla se debe sujetar de forma segura al husillo y el descentramiento de la cuchilla deberá ser cuidadosamente controlada en los filos de corte (NORMA ISO 8688/1:, 1989).

No se debe exceder el descentramiento radial en  $100\ \mu\text{m}$ , y descentramiento axial en  $50\ \mu\text{m}$

Fig. 29 (NORMA ISO 8688/1:, 1989).

Descentramiento radial:  $2\ \mu\text{m}$ .

Descentramiento axial:  $2\ \mu\text{m}$ .

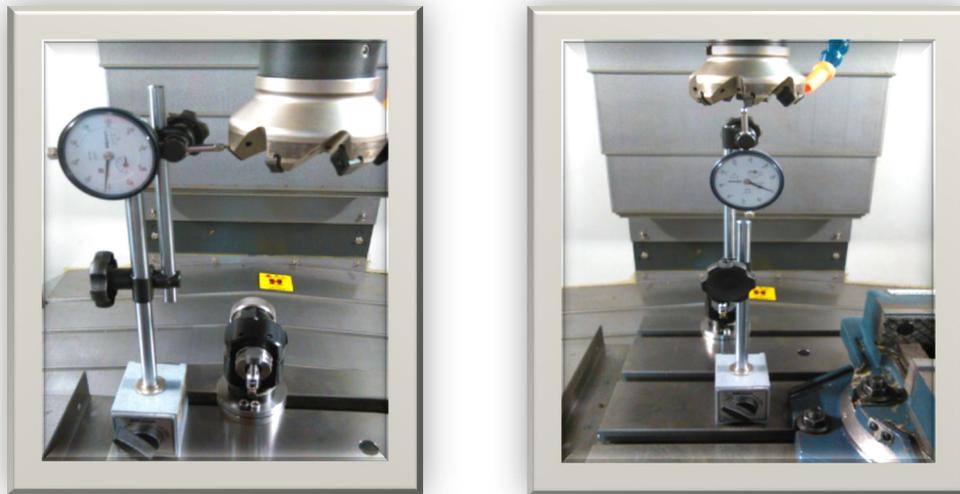


Fig. 29. Descentramiento radial y axial.

*Figura: Autor del proyecto.*

#### **5.4.2. Geometría de la herramienta**

Los insertos para las herramientas de corte se utilizan ampliamente en el maquinado debido a que son económicos y adaptables a muchos tipos diferentes de operaciones: el torneado, perforado, roscado, fresado e incluso taladrado. Se contó con insertos cuadrados negativos para la realización del maquinado como el observado en la

Fig. 30, y teniendo en cuenta las especificaciones del fabricante en cuanto a su uso como se muestra en la Tabla 11.

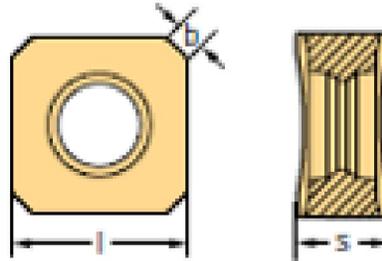


Fig. 30. Geometría de la herramienta.

Fuente: (Walter, 2012).

**Plaquitas de corte**

	Denominación	Clase de tolerancia	Número de filos de corte	l mm	s mm	b mm	P			M			K			N		S			H			
							HC	HC	HC	HC	HC	HC	HC	HC	HW	HC	HC	HC	HC					
							WKP25S	WKP35S	WSP45	WSM35	WSM35S	WSP45	WAK15	WKK25	WKP25S	WKP35S	WXN15	WK10	WSM35	WSM35S	WSP45	WHH15		
	SNGX1205ANN-D27	G	8	12.7	6.4	1.5	⊕	⊕	⊕					⊕	⊕	⊕								
	SNGX1205ANN-F27	G	8	12.7	6.4	1.5	⊕	⊕						⊕	⊕	⊕								
	SNGX1205ANN-F57	G	8	12.7	6.4	1.5	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕					⊕	⊕	⊕	
	SNGX1205ANN-F67	G	8	12.7	6.4	1.5	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕					⊕	⊕	⊕	
	SNGX1606ANN-D27	G	8	16	7.7	1.8	⊕	⊕						⊕	⊕	⊕								
	SNGX1606ANN-F27	G	8	16	7.7	1.8	⊕	⊕						⊕	⊕	⊕								
	SNGX1606ANN-F57	G	8	16	7.7	1.8	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕					⊕	⊕	⊕	
	SNMX1205ANN-F27	M	8	12.7	6.4	1.5	⊕	⊕					⊕	⊕	⊕									
	<b>SNMX1205ANN-F57</b>	<b>M</b>	<b>8</b>	<b>12.7</b>	<b>6.4</b>	<b>1.5</b>	⊕	⊕					⊕	⊕	⊕									
	SNMX1205ANN-F67	M	8	12.7	6.4	1.5	⊕	⊕					⊕	⊕	⊕									
	SNI-X1205ANN-K88	H	8	12.7	6.4	1.5											⊕	⊕						

HC = metal duro recubierto  
HW = metal duro sin recubrimiento

Tabla 11. Especificaciones del fabricante del inserto.

Fuente: (Walter, 2012).

### 5.4.3. Material de la Herramienta

Según el material a trabajar, se escogió un inserto de metal SNMX1205ANN-F57 WKP35S Tiger-tec Sil grado de metal duro con recubrimiento, ya que se contaba con este inserto dentro de las instalaciones (Walter, 2012).

## 5.5. FLUIDO DE CORTE

### 5.5.1. Tipos de fluidos para corte

Es conveniente analizarlos atendiendo primero su función, para después clasificarlos por su composición química.

Los fluidos de corte se utilizan ampliamente en las operaciones de maquinado para obtener los siguientes resultados:

- Reducir la fricción y el desgaste, mejorando así la vida útil de la herramienta y el acabado superficial de la pieza de trabajo.
- Enfriar la zona de corte, mejorando así la vida útil de la herramienta y reduciendo la temperatura y la distorsión térmica de la pieza de trabajo.
- Reducir las fuerzas y el consumo de energía.
- Retirar las virutas de la zona de corte, evitando que interfieran en el proceso de corte, en particular en operaciones como el taladrado y el machueado.
- Proteger la superficie maquinada de la corrosión ambiental (Kalpakjian & Schmid, 2008).

Se presentan los cuatro tipos de fluidos de corte que suelen utilizarse en las operaciones de maquinado:

- **Aceites** (también llamados *aceites simples*), incluyendo aceites minerales, animales, vegetales, compuestos y sintéticos, que por lo general se utilizan

en operaciones de baja velocidad donde el incremento de la temperatura no es significativo.

- **Emulsiones** (también llamadas aceites solubles), que son una mezcla de aceite, agua y aditivos, se utilizan por lo regular en operaciones de alta velocidad porque el incremento de temperatura es significativo. La presencia del agua hace que las emulsiones sean refrigerantes muy eficaces.
- **Los semi-sintéticos** son emulsiones químicas que contienen un poco de aceite mineral diluido en agua y aditivos que reducen el tamaño de las partículas de aceite, haciéndolas más eficaces.
- **Los sintéticos** son productos químicos con aditivos, diluidos en agua y sin aceite (Kalpakjian & Schmid, 2008).

Un fluido para corte es un líquido o gas que se aplica directamente a la operación de maquinado para mejorar el desempeño del corte. Los dos problemas principales que atienden los fluidos para corte son: la generación de calor en las zonas de corte y fricción.

Fricción en las interfaces herramienta-viruta y herramienta-trabajo. Además de la remoción del calor y la reducción de la fricción, los fluidos para corte brindan beneficios adicionales como: lavado de las virutas (especialmente en esmerilado y fresado), reducción de la temperatura de la pieza de trabajo para un manejo más fácil, disminuir las fuerzas de corte y los requerimientos de potencia, mejorar la estabilidad dimensional de la pieza de trabajo y optimizar el acabado superficial (Mikell P. Groover, 1997).

### 5.5.2. Efectos de los fluidos de corte.

La selección de un fluido de corte también debe incluir factores como sus efectos sobre:

- El material de la pieza de trabajo y las máquinas herramienta.
- Consideraciones biológicas.
- El medio ambiente (Kalpakjian & Schmid, 2008).

También se debe tener en cuenta las recomendaciones generales del fluido de corte para maquinado Tabla 12 (Kalpakjian & Schmid, 2008).

Tabla 12. Recomendaciones generales de fluidos de corte para maquinado

Material	Tipo de fluido
Aluminio	D, MO, E, MO + FO, CSN
Berilio	MC, E, CSN
Cobre	D, E, CSN, MO + FO
Magnesio	D, MO, MO + FO
Níquel	MC, E, CSN
Metales refractarios	MC, E, EP
Aceros	
al carbono y baja	D, MO, E, CSN, EP
aleación inoxidable	D, MO, E, CSN
Titanio	CSN, EP, MO
Zinc	C, MC, E, CSN
Zirconio	D, E, CSN

Nota: CSN = químicos y sintéticos; D = seco; E = emulsión; EP = presión extrema; FO = aceite grasoso y MO = aceite mineral.

Fuente: (Kalpakjian & Schmid, 2008).

### 5.5.3. Tipo de fluido de corte a utilizar.

#### *Especificaciones técnicas del refrigerante.*

Los siguientes datos fueron tomados de las especificaciones del fabricante, el cuál es el tipo de refrigerante utilizado para el trabajo a realizar Tabla 13 (LANGENTHAL, 2016).

Unidad de Prueba, propiedades de acuerdo con los valores  
De color marrón DIN ISO 2049 luz.

Tabla 13. Especificaciones del refrigerante

Características	Especificaciones
<b>Densidad</b>	a 20 ° C g / ml 0,970 ASTM D 4052
<b>Viscosidad</b>	a 40 ° C mm <sup>2</sup> / s DIN 51562-1 50
<b>Mineraloelgehalt</b>	% DIN 51561-1 40
<b>Emulsión con agua dura</b>	a 20 ° dH (36 ° FH)
<b>concentración Ph</b>	5% DIN 51 369 9,0
<b>concentración pH</b>	10% DIN 51 369 9,1
<b>Prueba de corrosión con GG25</b>	virutas > 4% DIN 51360-2 0 - 0
<b>Factor para Handrefraktormeter%</b>	Brix 1.1

Fuente: Autor del proyecto.

#### 5.5.4. Tasa de flujo de corte.

La tasa de flujo representativa por el centro mecanizado tiene un valor de 58 L/min, de los cuales, 12 L/min son por el husillo. Que es por donde se es refrigerado las herramientas (insertos).

#### 5.5.5. Velocidad de flujo.

La herramienta de corte posee 7 orificios por donde se es suministrado el refrigerante para la lubricación de los insertos atrves del husillo, este refrigerante cuenta con una velocidad de flujo de 243,16 m/min.

### 5.6. CONDICIONES DE CORTE.

#### 5.6.1. Condiciones de corte recomendadas.

Las condiciones de corte Tabla 14 fueron tomadas según la norma (NORMA ISO 8688/1:, 1989), para el maquinado del tocho.

condición de corte		I	II	III	IV
profundidad axial de corte $a_a$	mm	2.5	2.5	2.5	4
profundidad radial de corte <sup>1)</sup> $a_r$	mm	0.6D <sup>2)</sup>			
avance $f_z$	$\frac{\text{mm}}{\text{diente}}$	0.125	0.2	0.315	0.5

Tabla 14. Condiciones de corte

Fuente: (NORMA ISO 8688/1:, 1989).

En este caso particular, la profundidad es igual al ancho de la pieza de trabajo.

D=diámetro de la cuchilla de la fresa.

#### *Velocidad de corte.*

La velocidad de corte es la velocidad periférica de la herramienta de corte que se determina en el diámetro nominal ( Fig. 28).

Una apropiada velocidad de corte puede encontrarse en los manuales de datos de mecanizado. Para la referencia de los materiales de trabajo y de la herramienta de corte esta velocidad será aproximadamente de 180 m/min (NORMA ISO 8688/1:, 1989).

De acuerdo al catálogo del fabricante de la herramienta, y a la dureza del material con el que se va a trabajar (C5), la velocidad de corte es  $V_c$  220 m/min Tabla 15 (Walter, 2012).

Material group p	Structure of main material groups and identification letters		Brinell hardness HB	Tensile strength $R_m$ N/mm <sup>2</sup>	Machining group <sup>1</sup>	 	Cutting material grades							
							Starting values for cutting speed $v_c$ (m/min)							
							HC							
							WKP35S		WKP35		WKP25			
$a_g / D_c^*$		$a_g / D_c^*$		$a_g / D_c^*$		1/1		1/5						
1/2		1/2		1/2		1/2		1/5						
P	Unalloyed steel	C ≤ 0,25 %	annealed	125	428	P1	●	●●	250	300	250	300	290	320
		C > 0,25 ... ≤ 0,55 %	annealed	190	639	P2	●	●●	220	260	220	260	260	330
		C > 0,25 ... ≤ 0,55 %	tempered	210	708	P3	●	●●	215	250	215	250	255	320
		C > 0,55 %	annealed	190	639	P4	●	●●	220	260	220	260	260	330
		C > 0,55 %	tempered	300	1013	P5	●	●●	160	180	160	180	220	260
		Free cutting steel (short-chipping)	annealed	220	745	P6	●	●●	210	240	210	240	250	315
	Low-alloyed steel	annealed	175	591	P7	●	●●	220	270	220	270	260	320	
		tempered	300	1013	P8	●	●●	170	190	170	190	210	250	
		tempered	380	1282	P9	●	●●	130	150	130	150	170	190	
		tempered	430	1477	P10	●	●●	110	130	110	130	150	170	
	High-alloyed steel and high-alloyed tool steel	annealed	200	675	P11	●	●●	130	160	130	160	140	170	
		hardened and tempered	300	1013	P12	●	●●	80	90	80	90	110	130	
		hardened and tempered	400	1361	P13	●	●●	70	80	70	80	90	110	
	Stainless steel	ferritic / martensitic, annealed	200	675	P14	●	●●	140	160	140	160			

Tabla 15. Velocidades de corte según el catalogo de la herramienta.

Fuente: (NORMA ISO 8688/1:, 1989).

### 5.6.2. Localizacion de la cuchilla

Para pruebas de planeado, el eje de la cuchilla debe preferiblemente viajar a lo largo de la línea central de la pieza de trabajo. Con el fin de evitar la fractura del filo como la salida de insertos de la pieza de trabajo. Se permite alterar la posición de corte en relación con la línea central de la pieza de trabajo en la dirección de alejamiento del filo de salida de la pieza de trabajo.

Se debe reconocer que ciertas condiciones del fresado predominantemente hacia arriba pueden resultar en una salida del inserto adversa de la pieza de trabajo con fractura significativa del filo de corte y corta vida de la herramienta asociada (NORMA ISO 8688/1:, 1989).

## 5.7. MÉTODOS

Los métodos utilizados en el desarrollo de la tesis fueron 3:

- Métodos correspondientes a la adquisición y el procesamiento de las imágenes.
- Método correspondiente al análisis de los datos obtenidos.
- Métodos correspondientes a los ensayos de mecanizado. Estos últimos métodos se incluyen en el apartado 5.8 de ensayos

## 5.8. ENSAYOS

En esta fase experimental, se dividió la investigación en 9 etapas.

### 1. Tipo de máquina a trabajar:

Se utilizó un centro mecanizado vertical marca LEADWELL 32i, el cual proporciono el medio a trabajar.

### 2. Herramienta a trabajar:

Se dispuso de una fresa marca Walter, de diámetro 80 mm, de 7 insertos (cada uno de 8 filos), para la realización de los mecanizados, teniendo en cuenta los parámetros que estipula la norma:

Profundidad axial de corte, profundidad radial de corte, avance de la herramienta y revoluciones del husillo.

Estos parámetros se determinaron de acuerdo con las recomendaciones del fabricante de la herramienta, teniendo en cuenta que los valores hallados estén acordes con los estipulados con la norma.

### 3. Mecanizados de corte:

En esta etapa, se llevarán a cabo cuatro procesos enumerados así:

1. 44 mecanizados.
2. 66 mecanizados
3. 110 mecanizados
4. 151 mecanizados.

En los cuales se tendrá en cuenta, los parámetros que estipula la norma.

**4. Tipo de material a trabajar:**

Se eligió como material de desbaste, un acero C5, con las siguientes dimensiones según la norma:

Barra de lingote de sección transversal rectangular con un ancho 0.6 veces el diámetro de la fresa, longitud mínima de 3 veces el diámetro de la fresa, la altura a conveniencia.

**5. Fluido de corte:**

Se especificó el tipo de fluido a trabajar, especificación, marca o composición de los elementos activos, concentración real, dureza del agua (cuando se utiliza como diluyente), o el valor del PH de la solución o emulsión.

La tasa de flujo no debe ser menor a 3 L/min, el diámetro del orificio. La velocidad de flujo y la temperatura del depósito deben ser informadas.

**6. Equipo de rugosidad:**

Se utilizó un Rugosímetro TR200, marca TIME, el cual proporcione las medidas de rugosidad de la superficie.

**7. Lector óptico de medición:**

Se dispuso de un lector óptico (RENISHAW), con el cual se obtuvo las medidas de desgaste en los insertos de la fresa, dejada en cada mecanizado.

**8. Cámara digital a utilizar:**

Se dispuso de un electro-microscopio, para la toma de imágenes.

**9. Software:**

MATLAD, como herramienta estadística y determinación del desgaste de la mella de la herramienta.

Mastercam, como el sistema de programación de la máquina.

Una vez realizadas las etapas, se dispuso a determinar el PH del refrigerante, excentricidad de los insertos en la fresa, velocidad del refrigerante, temperatura del depósito del refrigerante, parámetros de corte de la herramienta, diseño del programa de mecanizado y punto de marcha de la máquina, se inició el proceso de la siguiente manera:

Se colocó el tocho en su correspondiente posición de desbaste, dejando que la herramienta de corte haga su primera pasada. Después de ello, por medio del renishaw se halló el desgaste de los insertos.

Utilizando el TR200 (Rugosímetro) para determinar la rugosidad dejada por la herramienta de corte en el bruto, tomando 10 muestra de cada mecanizado, se desmontó el tocho para llevarlo al electro-microscopio y tomar una imagen del acabado superficial, después de ello se retiró de la máquina la fresa para colocarla en un dispositivo previamente diseñado y tomarle a cada inserto una imagen, almacenándolas en una base de datos para luego determinar el desgaste utilizando el programa diseñado en software matlab.

Después de realizado este procedimiento, se repetirá consecutivamente hasta completar los procesos de la etapa 3, se creó una base de datos con los diferentes valores tomados en cada pasada del proceso, y se planteó como modelo estadístico un método de cálculos de distribución T del estudiante, el cual la norma 8688-1 la proporciona con unos niveles de confianza de 95%, 99%, 99.9% de acuerdo con los números de grados de libertad.

En esta fase experimental se pretende determinar cuál es criterio para la vida de la herramienta, teniendo en cuenta los parámetros de velocidad de corte, avance de la herramienta, profundidad de la misma y la rugosidad superficial del tocho.

### **5.8.1. Ensayos mecánicos y adquisición de imágenes.**

descripción del proceso:

Contando con que todos los parámetros ya han sido establecidos y manteniendo constantes el mayor número de características tanto en el centro de mecanizado como en el sistema de captura de imágenes, se desarrollaron las pruebas de manera repetitiva para

lograr el desgaste total de la herramienta, registrando toda su transformación. El proceso se desarrolló como se describe a continuación.

- **Montaje de la herramienta y el material:**

El inserto se colocó en la posición correspondiente en la fresa de acuerdo con el orden y la numeración de la codificación, teniendo en cuenta los parámetros de la excentricidad Fig. 29, que estipula la norma 8688-1, respecto al material se tiene en cuenta la correcta sujeción del tocho para no incurrir en vibraciones que perjudiquen los datos obtenidos.

- **Operación de mecanizado:**

Se realizó el desbaste manteniendo constante los parámetros de avance, profundidad, velocidad de corte y la longitud mecanizada. Una vez se ha realizado el mecanizado se desmontó la fresa, para posteriormente desmontar cada uno de los insertos y tomar las medidas correspondientes para cada inserto y la rugosidad del tocho.

- **Captura de las imágenes:**

Para esta etapa se utilizó un electro-microscopio, se seleccionó la resolución más adecuada para la calidad de las imágenes, que a su vez se le incorporó dos lámparas led para que fuera más nítida la imagen, después se utilizó la aplicación desarrollada en Matlab. En esta aplicación se seleccionó la resolución a utilizar. La que más se ajusta a las necesidades dimensionales y de calidad de imagen, permitiendo una escala magnificada. En primer lugar, se configuró la secuencia y posteriormente se previsualiza. Tras inspeccionar que la nitidez, posición e iluminación de la misma se encuentren dentro de los márgenes preestablecidos se procedió a capturar la imagen, y procesar las.

- **Medida de rugosidad:**

De forma consecutiva a la adquisición de las imágenes se realizó la medición de la rugosidad obtenida en la pieza tras cada desbaste del tocho. El Rugosímetro mostró el perfil de la superficie de la pieza, realizando lecturas de 2,5 mm. Se tomaron 10 medidas en cada pasada de los valores correspondientes a Ra y Rz, hallando el promedio para realizar una correlación posterior entre acabado superficial y el

desgaste de herramienta. Los registros de los datos se realizaron tal como aparece en la

Fig. 31. Una vez obtenidas las imágenes y la rugosidad se realizó nuevamente el montaje de la herramienta, repitiéndose el proceso hasta que sea necesario reemplazar el tocho.

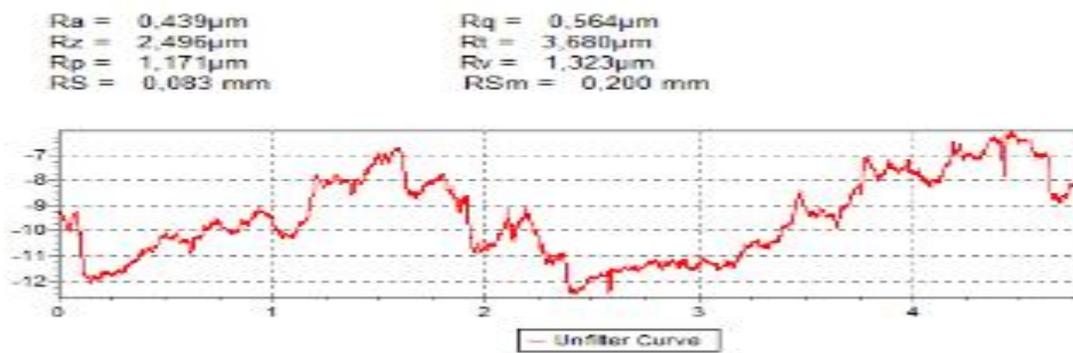


Fig. 31. Registro de datos de la rugosidad

Fuente: Autor del proyecto.

La secuencia de desgaste se logró en el peor de los casos con 4 pasadas, es decir, solo permitía tomar 28 imágenes de desgaste pues ya quedaba inutilizado tres insertos, esto sólo sucedió en dos casos. Por lo cual se decidió cambiar los parámetros de corte para el mecanizado. En el otro extremo se llegó hasta 46 pasadas para lograr el nivel de desgaste máximo. Se capturaron alrededor de 322 imágenes, que corresponde al desgaste de punta, que fueron las que se utilizaron al ser este tipo de desgaste el objeto de interés para la investigación.

El registro de los datos se organizó en una base de datos en Excel como se muestra en la Fig. 32. La Fig. 32 muestra un ejemplo de la plantilla u hoja de datos diseñada para plasmar los mismos. Igualmente se resumen éstos en un inventario general.

Entre los datos se refleja lo siguiente: número total de imágenes, rugosidades, graficas de las rugosidades y demás indicando a qué mecanizado corresponde cada grupo de desbaste.

**VALORES DESGASTE DE LA HERRAMIENTA POR CNC**

N= 875 RPM      INGRESE EL PARAMETRO DE DESGASTE A CONSULTAR:

Fz= 0,1      15

Vc= 220      CONSULTE SU RESULTADO EN LA PAGINA      15

Fv= 612

*Fig. 32. Plantilla de datos de rugosidades y gráficas.*

*Fuente: Autor del proyecto.*

### 5.8.2. Preparación de los Equipos de Ensayos.

Tanto el material C5 como los equipos y procedimientos fueron evaluados para ajustar las condiciones más favorables en función de los objetivos propuestos. La puesta a punto de los equipos se centró en dos tipos de sistemas: el correspondiente al sistema de mecanizado, y al sistema de captura de imágenes.

#### **Sistema de mecanizado:**

Abarca los aspectos correspondientes al centro mecanizado que se utilizó para desgastar la herramienta, así como a la propia plaquita de corte y el material empleado.

Como ya se mencionó en el apartado de materiales, se determinó el tipo de material a trabajar, su dureza, composición química y las dimensiones de la pieza. Se eligió un acero C5 como lo estipula la norma 8688-1 para realizar los ensayos de desgaste.

El material adquirido para las pruebas contaba con una longitud de 3 veces el diámetro de la fresa 240 mm, y un ancho de 0.6 veces el diámetro de la fresa 48 mm.

Las operaciones de mecanizado consistieron básicamente en operaciones de planeado de 240 mm. Como se ha indicado, se utilizó una prensa hidráulica para sujetar el tocho, debido a que la fresa no llegaba en su totalidad hasta el fondo de la mesa. Se realizaron sucesivas pasadas de planeado hasta el punto de que una de las plaquitas de corte

se fracturo en la tercera mecanizada, se incorporó nuevamente la plaquita dañada para continuar con los mecanizados. En el trascurso del mecanizado, quinta mecanizada volvió a fracturarse, esta vez dos de las plaquitas, volvió a colocarse, los insertos dañados. Se continuo con el desbaste del tocho, al transcurrir tres mecanizadas volvió a fracturarse otro de los insertos de la fresa, por tal razón se cambió los parámetros de la herramienta de corte, optando por los parámetros del fabricante.

Para la determinación de los parámetros de corte, se procedió a la búsqueda del catálogo del inserto, la velocidad de avance y la velocidad del husillo, se optó por cumplir al máximo los valores que la norma estipula con el objetivo de conseguir una progresión del desgaste de herramienta adecuada y verificar la norma. El avance, la profundidad y la velocidad de corte estuvieron entre los siguientes rangos: 0,1 a 0.5 mm/rev para el avance, 2 a 4 mm para la profundidad, y 180 a 220 m/min para la velocidad de corte.

De esta manera se encontraron que los valores idóneos que permitían alcanzar una buena relación desgaste de herramienta frente a la norma son:

Avance: 0,1 mm/rev.

Profundidad de pasada: 2 mm.

Velocidad de corte: 220 m/min.

Se usó refrigerante para disminuir la temperatura en la zona de corte, lo que permite mejorar el acabado superficial en la pieza y eliminar la posible adhesión de metal en los insertos que puede alterar su geometría y la zona de desgaste a identificar.

Con respecto al último componente del equipo de ensayos, se escogió un inserto de metal SNMX1205ANN-F57 WKP35S Tiger-tec Sil grado de metal duro con recubrimiento, ya que se contaba con este inserto dentro de las instalaciones.

Posteriormente, se procedió a establecer un sistema de codificación para realizar un mejor control y gestión de información. El sistema utilizado fue el siguiente: las plaquitas fueron marcadas en primera instancia por su posición en la fresa, asignando a cada posición un número. Ya que se cuenta con una fresa de 7 insertos, dándole a cada uno un valor entre 1 y 7. Los archivos que contienen la información relacionada con cada mecanizado de corte, incluyendo todas las imágenes generadas y los datos que se extraen de ellas, mantienen los mismos nombres. Después de cada pasada de mecanizado, se desmontó la

pieza y la herramienta para capturar las imágenes de desgaste y las medidas de rugosidad sobre la pieza.

### **5.8.3. Adquisición y procesamiento de Imágenes.**

Este tema se estructuró de acuerdo con las etapas necesarias a realizar para la adquisición y tratamiento de las imágenes previamente al análisis de los datos obtenidos.

#### *Adquisición y preprocesamiento de las imágenes de desgaste.*

En lo que respecta a la etapa de adquisición, se pueden distinguir dos aspectos. Por un lado, el correspondiente al sistema físico o hardware y por otro lado el ámbito informático o software. Una vez diseñado y preparado el sistema físico (óptica, distancia focal, zoom, encuadre, iluminación), la adquisición se ha realizado mediante una interfaz gráfica desarrollada específicamente con Matlab.

Uno de los factores más importantes en la adquisición de las imágenes es la iluminación. Los efectos que produce el tipo de iluminación dependen además del tipo de superficie, la distribución de la luz sobre la misma y sus propiedades de reflectancia.

Todo ello influye considerablemente en la calidad de la imagen tomada y su posterior segmentación. El sistema de iluminación que se ha empleado ha sido diseñado especialmente para este tipo de aplicaciones. Se reforzó la iluminación en las zonas críticas. Por ejemplo, la geometría de la plaquita presenta curvatura en la zona de la punta, por lo que no toda la plaquita que aparece en la imagen está en el mismo plano.

Se dio la circunstancia, por tanto, de que es difícil iluminar de forma uniforme esta zona a pesar de que esta zona de la punta es de gran interés para el estudio y control del desgaste. Por ello fue necesario reforzar el sistema de iluminación en estas zonas críticas (Gegen, 2007).

Fue necesario colocar la plaquita de corte en una posición donde quedase correctamente centrada, para lo cual se elaboró un porta-plaquitas. Su función fue mantener la posición de la herramienta de corte fija para la medición del desgaste, de forma que permaneciera constante las coordenadas de cada toma.

### *Segmentación.*

El proceso de segmentación consistió en subdividir la imagen en sus partes constituyentes, lo que en este caso vendría a suponer la separación de la zona de desgaste del resto de plaquita y del fondo. Para este proceso se aplicaron dos métodos.

El primer método consistió en identificar la zona de desgaste y realizar la segmentación automática. Para esto fue necesario un pretratamiento de la imagen que consistió, de forma resumida, en el alargamiento del histograma con el fin de aumentar el contraste, seguido de una umbralización.

El segundo método que se empleó fue la segmentación manual. Consistió en tomar cada una de las imágenes y llevar a cabo el seguimiento de los contornos de la marca de desgaste permitiendo, de esta manera, prestar especial atención a la zona correspondiente a la punta de la herramienta.

### *Descriptores Utilizados.*

Con las imágenes ya obtenidas y tratadas, se procedió a la extracción de sus características.

A continuación, se presenta el método utilizado para describir las imágenes segmentadas.

#### ➤ **Descriptores básicos.**

Se calcularon dos descriptores, con lo que se generó un vector.

- **Área:** consistente en el número de píxeles que hay en la región de desgaste.
- **Longitud de los ejes mayor y menor:** proporcionan la longitud (en píxeles) tanto del eje mayor como del menor de la elipse

#### **5.8.4. Análisis realizados sobre las imágenes.**

Una vez obtenidas las imágenes, se aplicaron diversos algoritmos para lograr extraer de la misma información útil y fácilmente procesable. Los pasos que se realizaron con cada una de ellas corresponden con los que se exponen a continuación. En su mayoría se utilizó Matlab como lenguaje de programación aprovechando sus toolboxes y las funciones con las que cuenta el programa (Gegen, 2007). Las operaciones o aplicaciones realizadas sobre las imágenes se exponen a continuación.

*Tabla 16. Plantilla de datos control de pruebas.*

Control de pruebas	
Valores Recomendados	Valores Utilizados
$f=0.1$ mm/rev a 0.5 mm/rev	$F=0.1$ mm/rev
$V_c=180$ m/min a 220 m/min	$V_c=220$ m/min
$a_p=2.5$ mm a 4 mm	$a_p=2.0$ mm
Plaquita: SNMX1205ANN-F57 WKP35S	
Longitud de corte: 240 mm	
Zoom: 300X	

*Fuente: Autor del Proyecto.*

El procesamiento de imagen buscó aislar la mella (marca de desgaste) producida en la herramienta en el proceso de corte, de forma que se pudo cuantificar algunas propiedades geométricas que permitieron la comparación con la rugosidad de la pieza maquinada y con la norma (NORMA ISO 8688/1: 1989).

Imagen inicial mostrada en la Fig. 33. fue tomada a través del microscopio a una resolución de 5.1 Mpixel, se aprecia la marca de desgaste después de 15 pasadas.



*Fig. 33. Imagen inicial.*

*Fuente. Autor del proyecto.*

#### *Corte de la zona de interés.*

Para realizar el procesamiento digital de la imagen se requirió el recorte del área de la punta, eliminando zonas que podrían interferir en el proceso de segmentación como se ve en la Fig. 34, este recorte se realizó seleccionando las coordenadas de la zona de interés y aplicando la función *imcrop* de Matlab.

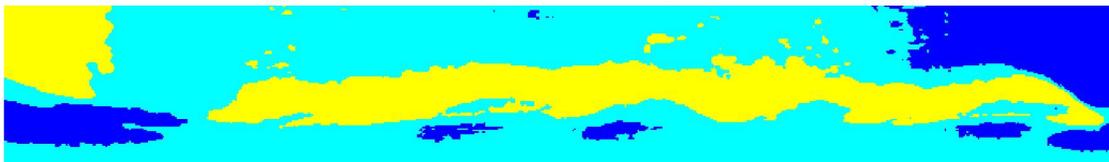
*Fig. 34. Imagen recortada y en escala de grises.*



*Fuente. Autor del proyecto.*

*Tratamiento de la Imagen: acondicionamiento y segmentación.*

Se buscó para este trabajo, que este proceso se realice de forma automática usando el *toolbox* de tratamiento digital de imagen de *Matlab*. El proceso inicia con la conversión de la imagen a escala de grises reduciendo la información de color lo que permite aumentar la facilidad del procesamiento usado la función *rgb2gray*. La imagen se segmenta de acuerdo a los niveles de brillo de cada pixel por las condiciones de la imagen, el proceso se realizó buscando tres rangos de brillo con el comando *multithresh*, para mostrar los resultados cada nivel fue coloreado (*label2rgb*) para distinguirlo de los demás, el número de niveles se obtuvo después de múltiples pruebas, el resultado se puede apreciar en la Fig. 35.

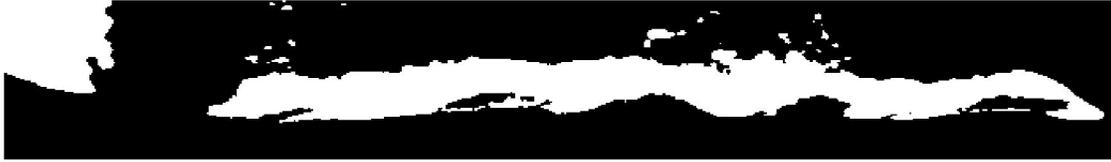


*Fig. 35. Imagen segmentada.*

*Fuente. Autor del proyecto.*

El siguiente paso consistió en aislar los pixeles que contienen la información de la marca de desgaste, en este caso el nivel seleccionado que se muestra en la Fig. 35 en color amarillo se extrae, y se almacena en un archivo en blanco y negro Fig. 36, con el que se continúa el proceso.

*Fig. 36. Imagen en blanco y negro que contiene la marca de desgaste.*



*Fuente. Autor del proyecto.*

Se puede apreciar que además de la marca de desgaste hay otras zonas que tienen el nivel de brillo seleccionado pero que se deben eliminar ya que no corresponden a la zona de interés, para lograr parte de ese objetivo se usó un procesamiento morfológico con *bwmorph*, que permite eliminar vacíos, puntas y manchas de la imagen, el resultado se puede ver en la Fig. 37 aunque el proceso puede mejorar la imagen al punto que se distingue claramente la marca de desgaste, puede contener zonas grandes que deben ser eliminadas.



*Fig. 37. Marca de desgaste mejorada.*

*Fuente. Autor del proyecto.*

Finalmente se usó algunas propiedades de la región de la imagen y se separan, dejando la marca de desgaste que nos interesa en una sola imagen, Fig. 38.



*Fig. 38. Imagen de la marca de desgaste final.*

*Fuente. Autor del proyecto.*

De la imagen final se extrajeron las características geométricas de la marca en este caso se seleccionaron el tamaño del eje mayor, el tamaño del eje menor y el área de la huella con *regionprops*, los valores se muestran en la Tabla 17 el cual están en pixel, se

usa la información de la cámara, del microscopio, así como las características geométricas del inserto para escalar los valores de longitud, de forma que se puedan usar en el proceso de comparación.

*Tabla 17. Características geométricas de la marca.*

Área	Longitud eje mayor	Longitud eje menor
10635	567.77	32.309

*Fuente. Autor del proyecto.*

#### *Descriptores de región aplicados.*

Para analizar el desgaste de las imágenes se aplicaron descriptores de región. A continuación, las características de ellos.

1. Descriptores de región geométricos simples: en la toolbox de procesamiento de imágenes de Matlab se encuentra la función denominada “Regionprops”, cuyo objetivo es medir diversas propiedades de región sobre la imagen (Gegen, 2007).

Los descriptores utilizados fueron los siguientes.

- Área (Área)
- Longitud del eje mayor (MajorAxisLength)
- Longitud del eje menor (MinorAxisLength)

Una vez aplicados sobre las imágenes segmentadas y extraída la información correspondiente se almacena la matriz para su posterior procesamiento      Tabla 18.

Tabla 18. Datos correspondientes a los descriptores de región simple (inserto 7).

Pasada	pixel			milímetros		
	Area	Eje Mayor	Eje Menor	Area	Eje Mayor	Eje Menor
1	4285	628,531694	9,36551133	0,0289666	1,63418241	0,02435033
2	1090	81,8809857	18,842857	0,0073684	0,21289056	0,04899143
3	1580	121,083431	18,4297318	0,0106808	0,31481692	0,0479173
4	1199	89,7561582	20,5633144	0,00810524	0,23336601	0,05346462
5	3219	263,35832	20,5868419	0,02176044	0,68473163	0,05352579
6	2442	139,08876	29,6224397	0,01650792	0,36163077	0,07701834
7	2710	144,76673	26,4764905	0,0183196	0,3763935	0,06883888
8	3541	254,893738	23,0190117	0,02393716	0,66272372	0,05984943
9	2433	180,862855	20,1806862	0,01644708	0,47024342	0,05246978
10	4896	280,800369	30,5663368	0,03309696	0,73008096	0,07947248
11	6971	417,662128	34,4210368	0,04712396	1,08592153	0,0894947
12	6850	296,298966	37,2945294	0,046306	0,77037731	0,09696578
13	7085	321,64846	34,6831241	0,0478946	0,836286	0,09017612
14	10669	628,018609	34,8183842	0,07212244	1,63284838	0,0905278
15	11179	637,410136	32,734904	0,07557004	1,65726635	0,08511075
16	11836	663,487691	31,3748585	0,08001136	1,725068	0,08157463
17	9490	484,255554	32,3749904	0,0641524	1,25906444	0,08417498
18	9723	662,876837	29,6014656	0,06572748	1,72347978	0,07696381
19	11170	645,689339	34,7010613	0,0755092	1,67879228	0,09022276

Fuente. Autor del proyecto.

Para cada una de las imágenes utilizadas se obtuvieron estos descriptores y los datos obtenidos se guardaron en una hoja de cálculo similar a la que se muestra en la Tabla 18. En la Fig. 39,

Fig. 40 y Fig. 41, se observa la gráfica correspondiente al área, largo del eje mayor y largo del eje menor, de desgaste en pixel por cada pasada de la herramienta de corte. En la Fig. 42, observamos la gráfica, con su ecuación característica del comportamiento de desgaste de uno de los insertos a lo largo del eje menor.

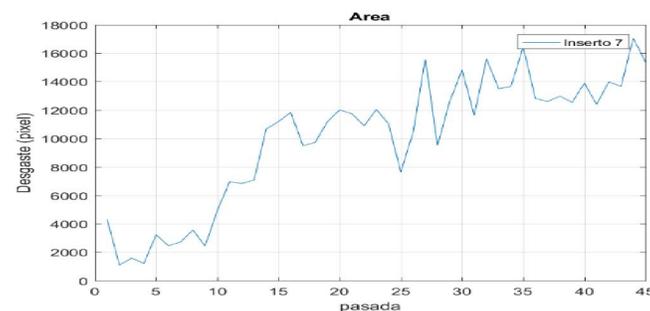


Fig. 39. Gráfica del área de desgaste (inserto 7)

Fuente. Autor del proyecto.

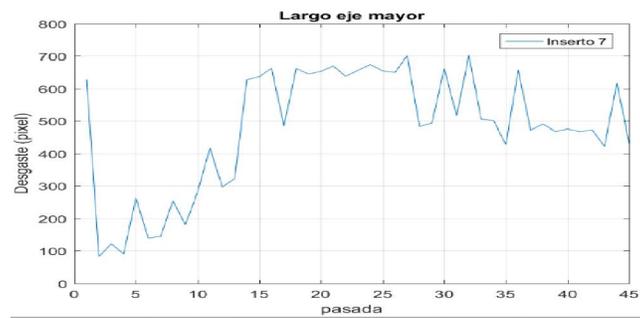


Fig. 40. Gráfica eje mayor (inserto 7).

Fuente. Autor del proyecto.

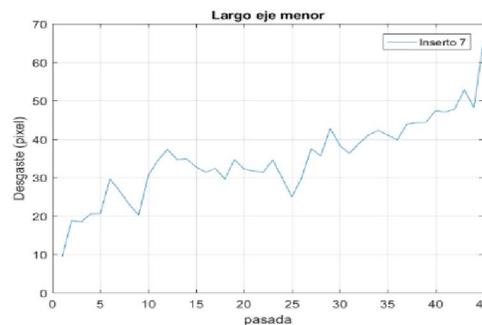


Fig. 41. Gráfica eje menor (inserto 7).

Fuente. Autor del proyecto.

321

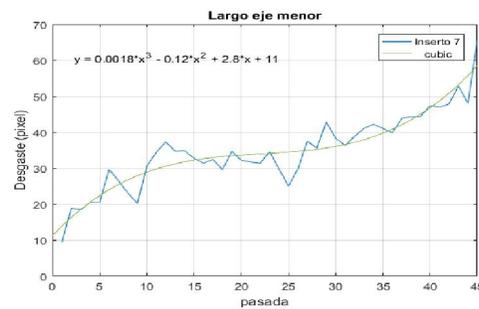


Fig. 42. Ecuación del comportamiento de desgaste (inserto 7).

Fuente. Autor del proyecto.

## 5.9. CRITERIO DE VIDA ÚTIL

En primer lugar, la evaluación de la norma demostró que los parámetros establecidos en la misma no son aplicables para las nuevas herramientas de corte, éstos desmejoran la calidad de la pieza y disminuyen el aprovechamiento de la herramienta. La geometría del inserto, sus materiales y tratamientos han variado con respecto a los estipulados por la norma, esto hace que los parámetros de corte requeridos también varíen. Sin mencionar que los aplicativos computacionales de manufactura permiten optimizar el acercamiento de la herramienta a la pieza permitiendo contactos menos agresivos y prolongando la vida útil de la herramienta.

Una vez descartada la posibilidad de tener en cuenta los criterios de la norma se tomaron los criterios del fabricante para las demás pruebas.

Para establecer el criterio de vida se tomaron diferentes valores con el fin de correlacionarlos. En primer lugar, se midió la rugosidad de la pieza en cada una de sus pasadas, al mismo tiempo se tomó la medida que proporciona el renishaw para la compensación de la herramienta y las imágenes de cada uno de los insertos para extraer por medio del tratamiento de imágenes los valores correspondientes al desgaste (longitud del eje menor). El Anexo 1 muestra los resultados correspondientes a los descriptores, es decir los valores de desgaste del eje menor una vez tratadas las imágenes. Esta información se muestra para cada uno de los insertos. El Anexo 2 muestra las gráficas de tendencia de desgaste generadas con la información de cada una de los insertos la cual se corresponde con una imagen típica de desgaste lo que valida la información obtenida mediante el sistema de visión.

Todos los valores son comparados en el apartado de resultados (Tabla 20) con el fin de establecer el criterio de vida útil.

## 6. RESULTADOS

La norma ISO 8688-1 es aplicable a herramientas de corte basada en insertos, en este caso en herramientas de planeado, para esta investigación en insertos, en donde se midió el desgaste de acuerdo con los diferentes criterios queda la norma, y a la geometría de dicha herramienta. Por ende, se tuvo en cuenta el fenómeno del deterioro de la herramienta y a los tres casos (localizado, no localizado y uniforme), basado en los tres criterios (L, N, S) del desgaste del inserto, según la norma ISO 8688-1.

Lo anterior se puede ratificar con una investigación denominada Influencia de Parámetros de Corte en la Rugosidad Superficial en Procesos de Fresado frontal y combinado (Lara, 2015), basado en la norma ISO 8688-1, donde se enfocó en el estudio de la influencia de los parámetros de corte de forma conjunta en el acabado superficial. Determinando la influencia del avance y velocidad de corte en materiales, a partir de la medición de la rugosidad superficial.

Cabe recalcar, que muchos de los autores citados en esta investigación no tienen en cuenta los nuevos procesos de desbastes de herramientas, en donde el software de hoy en día ayuda a mejorar el rendimiento de mecanizado y a una mejor vida de la herramienta.

Ya que dicha norma data del año 1989 hace 29 años, por este motivo se decidió hacer una sugerencia a la norma, pues se necesita de un criterio definido para darle confiabilidad a la investigación.

En este apartado se tuvo en cuenta los aspectos correspondientes al procesamiento de la imagen, rugosidad y renishaw: la adquisición y la segmentación realizada sobre la misma.

### **6.1. Procesamiento de imágenes**

En los apartados anteriores se han comentado los resultados correspondientes al procesamiento de las imágenes. En la presente sección se exponen algunas de las opciones examinadas.

### **6.2. Adquisición y segmentación**

Esta investigación se enfocó en obtener imágenes de calidad que permitiera visualizar de forma clara la evolución del desgaste de la herramienta. Para llevar a cabo este proceso se buscaron ciertos parámetros. A continuación, se comentan las que tienen relación directa con el proceso.

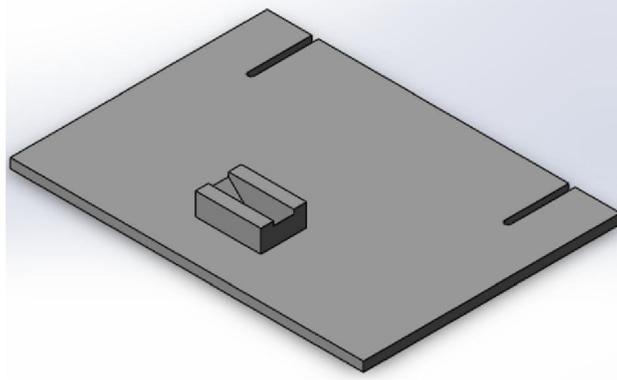
#### *Adquisición:*

Las opciones empleadas, aspectos que no condujeron a resultados deseados y aquellos que se descartaron por completo se mencionan aquí.

- **Ubicación de la plaquita para la adquisición de la imagen.**

El proceso no fue del todo fácil, ya que una vez enfocada la imagen basta con mover la pieza sólo unos milímetros para que la imagen quede completamente fuera del campo de visión de la cámara. Por tal razón se construyó un dispositivo que mantuviera estable y en la misma posición el inserto a la hora de la captura de las imágenes

Fig. 43.



*Fig. 43. Porta-plaquitas.*

*Fuente. Autor del proyecto.*

Este dispositivo fue de gran ayuda a la hora de la captura de las imágenes ya que permitía mantener estable el inserto.

- **Iluminación.**

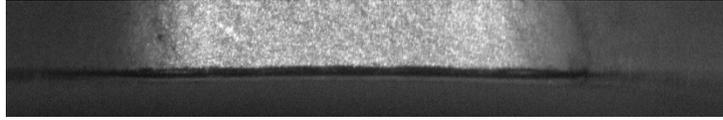
Se capturaron imágenes para cada uno de los insertos, en su respectiva cara correspondientes al desgaste, estas imágenes no eran del todo apreciables Fig. 45, motivo por el cual fue necesario instalar un sistema de iluminación externa de manera que se enfocara correctamente la imagen en todos los casos Fig. 44. Tras comprobar los resultados obtenidos en varias posiciones del dispositivo, al final se optó por emplear un ángulo de 45 grados con respecto al electro-microscopio para cada uno de los insertos

Fig. 44.



*Fig. 44. Electro-microscopio.*

*Fuente. Autor del proyecto.*



*Fig. 45. Mala iluminación del inserto.*

*Fuente. Autor del proyecto.*

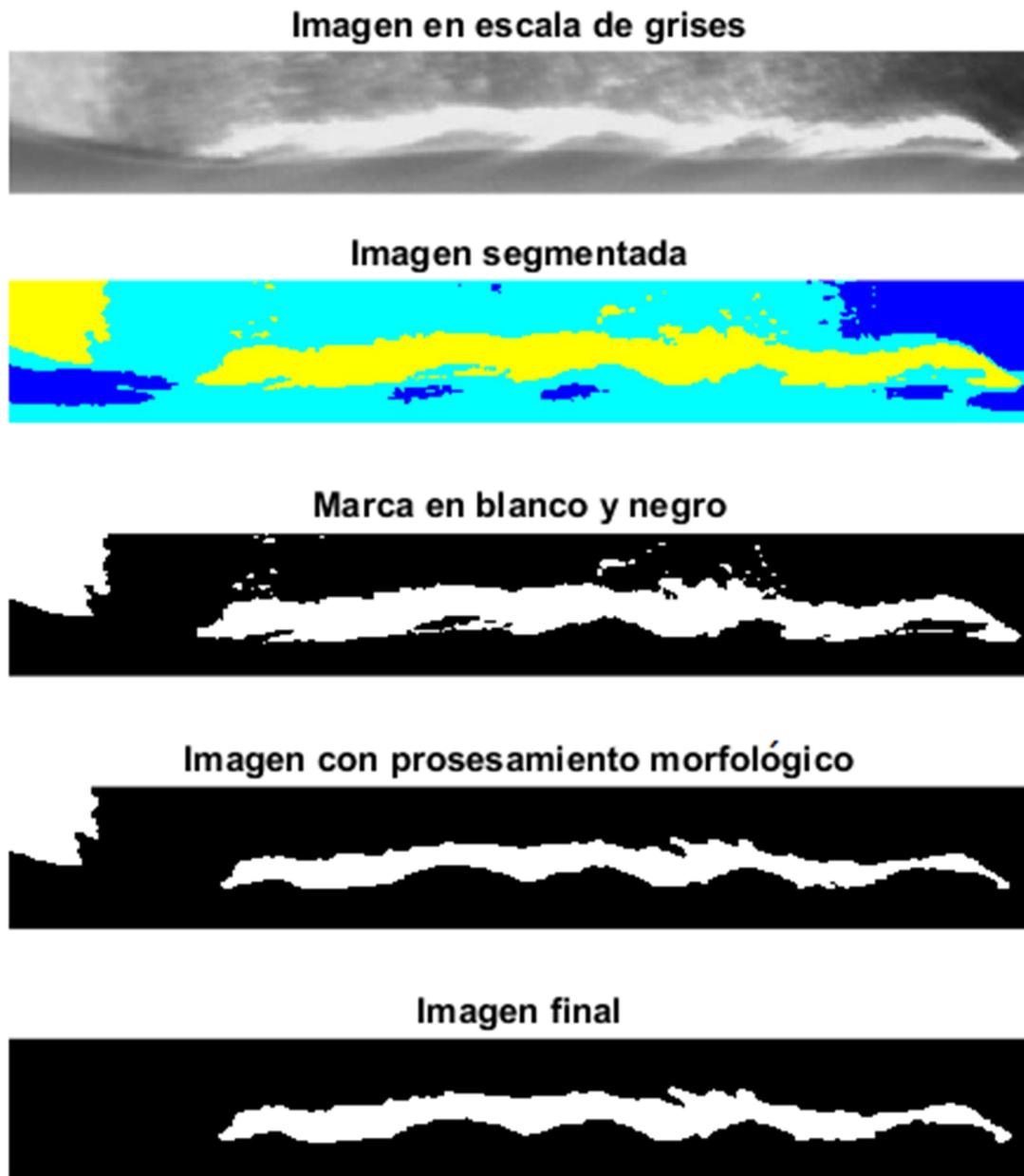
#### *Segmentación:*

Como paso previo al cálculo de descriptores se requieren diversos posts procesamientos que mejoran y resaltan la forma de la región obtenida. Se seleccionó un primer grupo de imágenes para realizar pruebas de segmentación automática. Las etapas de dicha segmentación son las siguientes:

- Se detectó la zona de desgaste mediante crecimiento de regiones por agregación de píxeles generados por umbralización.
- Se identificó la zona empleando una binarización.
- Se obtuvo la imagen con la región de desgaste en blanco y el fondo en negro.
- Se redujo ruidos residuales y se eliminó zonas ajenas al desgaste mediante un filtro de mediana
- Se aplicó un crecimiento de regiones y sucesivos cerramientos de la zona (Gegen, 2007).

Los resultados se pueden observar en la Fig. 46.

A pesar de que esta alternativa mostró una buena segmentación en el 90% de los casos, finalmente se optó por realizar la segmentación de forma completamente manual.



*Fig. 46. Pasos realizados en la segmentación.*

*Fuente Autor del proyecto.*

### **6.3. Obtención de descriptores a partir de las imágenes.**

Para calcular los diferentes descriptores se tuvo en cuenta el conjunto de imágenes segmentadas tanto en escala de gris como en blanco y negro. Se generó una matriz de datos con los valores correspondientes a los descriptores geométricos simples.

### *Descriptores geométricos simples.*

El entorno computacional Matlab integra en sus librerías una función específica (Regionprops) para la obtención de estos descriptores, lo que facilitó su obtención de forma notable. Los descriptores considerados son los descritos en el apartado 5.8.3. “Análisis realizados sobre las imágenes”.

En el Tabla 19 se registran los valores máximos, mínimos que arroja cada uno de los descriptores geométricos simples (inserto 7). Las estadísticas mostradas en el citado cuadro permiten conocer información tangible de la huella de desgaste y el rango en el que se encuentra cada uno de los descriptores geométricos simples. Por ejemplo, para el primer caso, el área mínima de desgaste calculada tiene un valor de 4285 píxeles, y la plaquita con la que se obtuvo el mayor desgaste presentaba un área de 15328 píxeles.

Pasada	pixel			milímetros		
	Area	Eje Mayor	Eje Menor	Area	Eje Mayor	Eje Menor
1	4285	628,531694	9,36551133	0,0289666	1,63418241	0,02435033
2	1090	81,8809857	18,842857	0,0073684	0,21289056	0,04899143
3	1580	121,083431	18,4297318	0,0106808	0,31481692	0,0479173
4	1199	89,7561582	20,5633144	0,00810524	0,23336601	0,05346462
5	3219	263,35832	20,5868419	0,02176044	0,68473163	0,05352579
6	2442	139,08876	29,6224397	0,01650792	0,36163077	0,07701834
7	2710	144,76673	26,4764905	0,0183196	0,3763935	0,06883888
8	3541	254,893738	23,0190117	0,02393716	0,66272372	0,05984943
9	2433	180,862855	20,1806862	0,01644708	0,47024342	0,05246978
10	4896	280,800369	30,5663368	0,03309696	0,73008096	0,07947248
11	6971	417,662128	34,4210368	0,04712396	1,08592153	0,0894947
12	6850	296,298966	37,2945294	0,0463306	0,77037731	0,09696578
13	7085	321,64846	34,6831241	0,0478946	0,836286	0,09017612
14	10669	628,018609	34,8183842	0,07212244	1,63284838	0,0905278
15	11179	637,410136	32,734904	0,07557004	1,65726635	0,08511075
16	11836	663,487691	31,3748585	0,08001136	1,725068	0,08157463
17	9490	484,255554	32,3749904	0,0641524	1,25906444	0,08417498
18	9723	662,876837	29,6014656	0,06572748	1,72347978	0,07696381
19	11170	645,689339	34,7010613	0,0755092	1,67879228	0,09022276
20	12004	653,932297	32,1834476	0,08114704	1,70022397	0,08367696
21	11728	670,247108	31,7052056	0,07928128	1,74264248	0,08243353
22	10891	638,945124	31,3533524	0,07362316	1,66125732	0,08151872
23	12037	656,985324	34,5463404	0,08137012	1,70816184	0,08982049
24	11017	674,874331	29,7481743	0,07447492	1,75467326	0,07734525
25	7650	655,671094	24,9475167	0,051714	1,70474485	0,06486354
26	10410	650,701469	29,8270804	0,0703716	1,69182382	0,07755041
27	15532	701,614532	37,4935695	0,10499632	1,82419778	0,09748328
28	9537	482,666684	35,5892945	0,06447012	1,25493338	0,09253217
29	12593	493,221718	42,7980939	0,08512868	1,28237647	0,11127504
30	14806	662,044935	38,3295303	0,10008856	1,72131683	0,09965678
31	11617	515,937742	36,2620431	0,07853092	1,34143813	0,09428131
32	15572	703,124633	38,8604346	0,10526672	1,82812405	0,10103713
33	13479	505,09297	41,0567498	0,09111804	1,31324172	0,10674755
34	13649	501,177714	42,2499776	0,09226724	1,30306206	0,10984994
35	16397	428,395683	41,0349267	0,11084372	1,11382878	0,10669081
36	12806	657,984228	39,8198758	0,08656856	1,71075899	0,10353168
37	12585	472,004156	43,8714886	0,0850746	1,22721081	0,11406587
38	12971	489,917464	44,2586653	0,08768396	1,27378541	0,11507253
39	12527	468,508679	44,3587004	0,08468252	1,21812256	0,11533262
40	13872	475,601983	47,3981492	0,09377472	1,23656516	0,12323519
41	12393	468,437319	46,963179	0,08377668	1,21793703	0,12210427
42	13959	473,069207	47,8440607	0,09436284	1,22997994	0,12439456
43	13652	422,636001	52,8662191	0,09228752	1,0988536	0,13745217
44	17053	617,730595	48,114156	0,11527828	1,60609955	0,12509681
45	15328	430,126556	65,5228416	0,10361728	1,11832905	0,17035939

*Tabla 19. Valores máximos y mínimos de Descriptores geométricos simples.*

*Fuente. Autor del proyecto.*

En el Anexo 1 se muestra las tablas correspondientes de los descriptores para cada inserto de la herramienta de corte que se trabajó en el proceso de desbaste para esta investigación. También podemos observar la tendencia de desgaste de la herramienta de corte

Fig. 42. Donde se ve el comportamiento que da el desgaste en función de cada pasada.

En el Anexo 2, se puede observar la tendencia de cada inserto.

#### 6.4. Rugosidad, Gráfica y tendencia.

Para cada desbaste realizado por la herramienta de corte en el tocho, se obtuvo, un conjunto de datos de la rugosidad  $R_a$  y  $R_z$ , donde se generó una matriz de datos correspondientes a dichos valores. Tabla 20. Generando su grafica correspondiente a  $R_a$

Fig. 47,  $R_z$  Fig. 49, y su tendencia al desgaste Fig. 48, Fig. 50.

A continuación, se observan los resultados de la rugosidad ( $R_a$ )Tabla 20 y la representación gráfica Fig. 47, los cuales van aumentando progresivamente con cada una de las pasadas de la herramienta por el tocho. Se observa en la prueba #46 un aumento significativo, demostrando así que la herramienta ya es inútil en ese momento.

Tabla 20. Valores de desgaste de punta y rugosidad.

# de prueba	Desgaste de punta Renishaw (mm)	$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	$R_z$ ( $\mu\text{m}$ )	Longitud eje menor (mm)	# de prueba	Desgaste de punta Renishaw (mm)	$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	$R_z$ ( $\mu\text{m}$ )	Longitud eje menor (mm)
1	0.010	0.439	2.496	0,024	24	0.024	0.554	2.916	0,077
2	0.013	0.600	2.723	0,049	25	0.013	0.542	3.007	0,065
3	0.013	0.307	1.803	0,048	26	0.013	0.459	2.972	0,078
4	0.014	0.342	2.099	0,053	27	0.034	0.635	3.619	0,097
5	0.013	0.479	2.216	0,054	28	0.033	0.634	4.888	0,093
6	0.019	0.452	2.460	0,077	29	0.034	0.512	3.075	0,111
7	0.011	0.414	2.272	0,069	30	0.020	0.456	3.212	0,100
8	0.013	0.504	2.427	0,060	31	0.010	0.383	2.496	0,094
9	0.015	0.445	2.171	0,052	32	0.019	0.509	2.716	0,101
10	0.022	0.558	3.463	0,079	33	0.015	0.424	2.912	0,107
11	0.019	0.208	1.988	0,089	34	0	0.700	4.559	0,110
12	0.031	0.340	1.851	0,097	35	0.029	0.755	3.612	0,107

13	0.022	0.502	3.072	0,090	36	0.023	0.561	3.404	0,104
14	0.020	0.402	2.947	0,091	37	0.023	0.789	5.300	0,114
15	0.010	0.454	2.952	0,085	38	0.026	0.732	4.044	0,115
16	0.007	0.556	3.452	0,082	39	0.027	0.379	2.676	0,115
17	0.001	0.493	3.079	0,084	40	0.026	0.341	2.092	0,123
18	0	0.449	3.127	0,077	41	0.027	0.358	2.187	0,122
19	0.002	0.421	2.572	0,090	42	0.029	0.491	2.992	0,124
20	0.031	0.423	3.259	0,084	43	0.041	0.523	2.767	0,137
21	0.027	0.493	3.259	0,082	44	0.036	0.329	2.420	0,125
22	0.037	0.620	4.104	0,082	45	0.037	0.412	2.936	0,170
23	0.024	0.509	3.027	0,090	46	0.036	2.748	15.050	0,077

Fuente. Autor del proyecto.

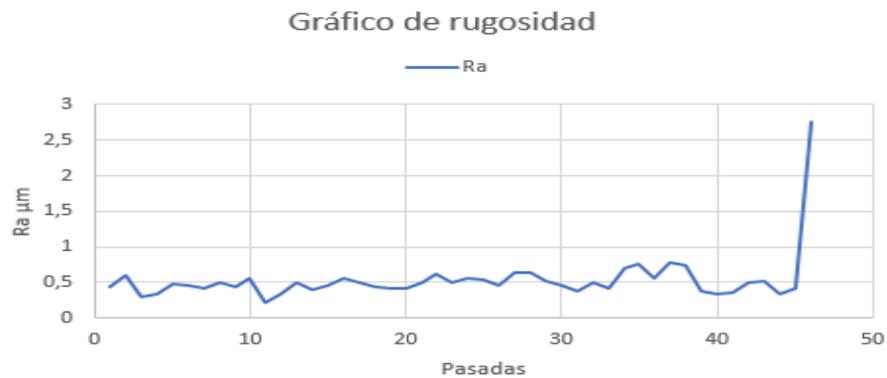


Fig. 47. Gráfico de rugosidad  $R_a$ .

Fuente. Autor del proyecto.

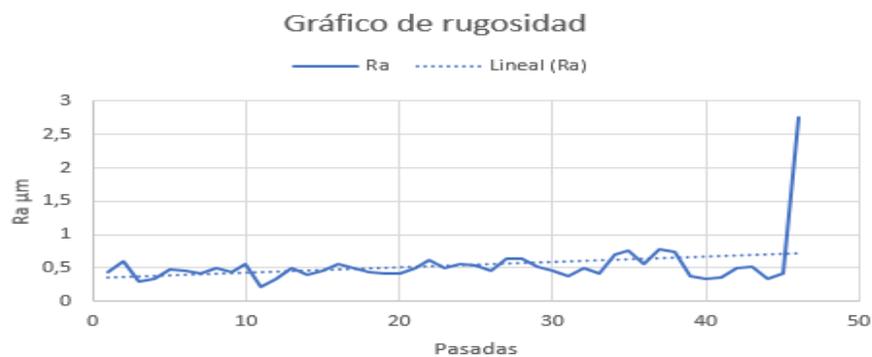


Fig. 48. Tendencia de la rugosidad  $R_a$ .

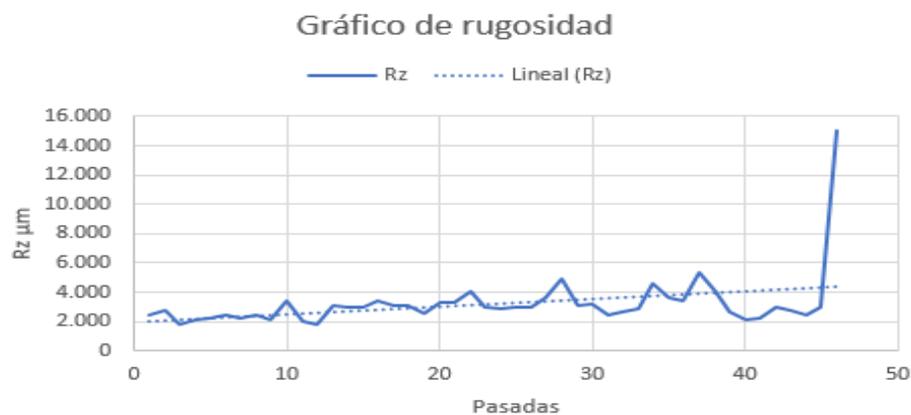
Fuente. Autor del proyecto.



Fig. 49. Gráfico de rugosidad Rz.

Fuente. Autor del proyecto.

Fig. 50. Tendencia de la rugosidad  $R_z$



Fuente. Autor del proyecto.

## 6.5. Sistema Renishaw.

En la Fig. 51 se observa el comportamiento de desgaste de punta del inserto en cada pasada de mecanizado de la herramienta de corte por el tocho y su tendencia Fig. 52, estos datos fueron obtenidos de la Tabla 20.

Fig. 51. Gráfico desgaste de punta.



Fuente. Autor del proyecto.



Fig. 52. Gráfico de tendencia desgaste de punta.

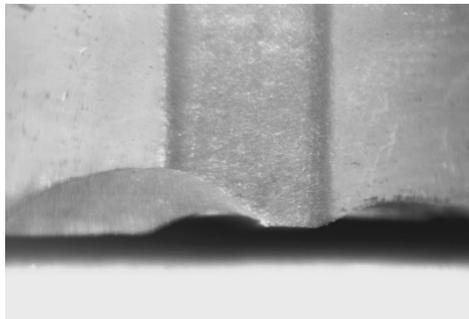
Fuente, Autor del proyecto.

## 7. CONCLUSIONES

En la presente investigación se buscó relacionar la vida útil de la herramienta con tres técnicas de medición de variables involucradas en el proceso de corte: evaluando la mella sobre la herramienta mediante un sistema de visión artificial, midiendo la rugosidad de la superficie obtenida y midiendo el cambio de la altura de la punta del inserto.

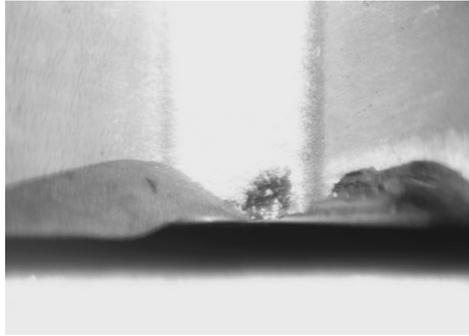
Del desarrollo del trabajo se obtuvieron las siguientes conclusiones

- Los parámetros recomendados por la norma no permitieron el desarrollo de las prácticas debido a las constantes fracturas como se observa en la Fig. 53, todos los insertos fueron remplazados para una mejor confiabilidad del proceso volviendo a fracturarse Fig. 54. Debido a las constantes fracturas se decidió cambiar los parámetros de corte siguiendo las recomendaciones del fabricante del inserto en cuanto a los parámetros del mecanizado ideales.



*Fig. 53. Inserto fracturado primera etapa.*

*Fuente. Autor del proyecto.*



*Fig. 54. Inserto fracturado segunda etapa.*

Fuente. Autor del proyecto.

- Los valores dados por el fabricante de la herramienta permitieron un buen desarrollo de las prácticas estableciendo una marca homogénea de desgaste en la mella del inserto.
- El número de pasadas planificadas según los parámetros recomendados por la norma fue de 44 de los cuales solo de llevaron a cabo 4 debido a la fractura prematura, en la segunda prueba se obtuvo el mismo resultado. Una vez se cambiaron los parámetros a los del fabricante se consiguieron 46 pasadas con una correcta evolución del desgaste.
- El diseño y construcción del montaje para medir el desgaste de los insertos es importante para el desarrollo de la investigación, ya que se debe lograr que los insertos antes y después de cada pasada queden exactamente en la misma posición para la captura. Gracias a esto se controlaron aspectos como intensidad lumínica, velocidad de obturación, valor de apertura, obteniendo una buena imagen.
- La buena captura de las imágenes permite que el sistema de visión artificial realice un adecuado proceso de segmentación y selección de la marca dejada por el desgaste sobre la herramienta como información importante en la creación de la base de datos de desgaste.
- En la creación de la base de datos relacionada con el sistema de visión los descriptores más útiles son los geométricos simples, ya que ofrecen una matriz de datos cuya información muestra aspectos relevantes del estado de la herramienta como la longitud del eje menor.

- Los datos obtenidos por el renishaw mantienen la misma tendencia que los obtenidos por el rugosímetro en cuanto a la rugosidad media y las medidas de los valles.
- Criterio de vida útil: el sistema de visión permite identificar el momento en que el desgaste sube significativamente previendo el cambio de la herramienta y prolongando así el aprovechamiento de la misma.
- Los valores de rugosidad son fiables a la hora de establecer el acabado superficial de la pieza mas no para determinar el desgaste de la herramienta y predecir el cambio oportuno de esta.
- Concepto de la norma: Debido a la evolución tanto en materiales como en geometrías para las herramientas de corte, la norma ISO 8688-1 se encuentra obsoleta. El uso de los parámetros estipulados por la norma demostró que los contactos con fuertes impactos consiguen afectar fuertemente la herramienta lo que disminuye significativamente la vida útil. Los parámetros establecidos por la norma junto con las ayudas computacionales permiten optimizar los procesos logrando mejores acabados. El uso de sistemas de visión permite establecer el momento en el que se requiere el cambio de la herramienta y esto prolonga la vida útil reduciendo tiempos muertos y costos.
- Como conclusión general se recomienda tener en cuenta los parámetros dados por los fabricantes de las herramientas e implementar sistemas de visión para el mejor aprovechamiento de la vida útil de la herramienta.

## 8. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Gracias a este trabajo se creó una base de datos para continuar con el desarrollo de investigaciones, ya que se dejó el diseño experimental, funcional y replicable, se aconseja trabajar con los parámetros de corte del inserto sugeridos por el fabricante.

Como trabajos futuros se propone lo siguientes:

Hacer un estudio de la vida de la herramienta en función de las mejores prácticas que ofrecen los aplicativos de manufactura.

Buscar relacionar el cambio de la longitud del eje menor ( $\Delta$ ) con el momento en el que se aproxima la falla de la herramienta.

Hacer una actualización de la norma incluyendo los nuevos insertos, materiales y nuevas geometrías que existen en el mercado hoy en día.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

- Alves, M. L., Ferreira, B. B., & Leta, F. R. (2011). Evaluación de Parámetros de Rugosidad usando Análisis de Imágenes de Diferentes Microscopios Ópticos y Electrónicos. *Información Tecnológica*, 22(4), 129–146. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642011000400014>
- Braga, D. U., Neves, F. O., Silva, A. S. C., & Parreiras, L. G. S. (2012). Evaluación Experimental del Desempeño del Proceso de Fresado Frontal del Acero ABNT 1045 para Herramientas con Diferentes Números de Aristas. *Informacion Tecnologica*, 23(4), 89–96. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642012000400011>
- Castillo, J. M. G. (2009). Estudio del desempeño de herramientas de corte de acero rápido convencional y acero rápido sinterizado en la industria metalmecánica. *Revista Clepsidra*, 5(9), 51–72.
- Da Silva, R. B., Vieira, J. M., Cardoso, R. N., Carvalho, H. C., Costa, E. S., Machado, A. R., & De Ávila, R. F. (2011). Tool wear analysis in milling of medium carbon steel with coated cemented carbide inserts using different machining lubrication/cooling

- systems. *Wear*, 271(9–10), 2459–2465. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.12.046>
- de Anda-Rodríguez, G.; Castillo-Castañeda, E. (2006). Un método de monitoreo del desgaste de una herramienta de corte basado en un sensor de proximidad de fibra óptica Ingeniare.
- Ezugwu, E. O., & Wang, Z. M. (1997). Titanium alloys and their machinability. *Journal of Materials Processing Technology*, 68(3), 262–274. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(96\)00030-1](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(96)00030-1)
- Flores, V. M., Correa, M., & Alique, J. R. (2011). Modelo Pre-Proceso de predicción de la Calidad Superficial en Fresado a Alta Velocidad basado en Softcomputing. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, 8(1), 38–43. [https://doi.org/10.1016/S1697-7912\(11\)70006-1](https://doi.org/10.1016/S1697-7912(11)70006-1)
- Francisco, M.-C., Issam, H., Abdellatif, K., Abdallah, J., & Mohamed, B. (2013). Predicción de rugosidad en maquinado de compuestos con base de Peek usando metodología de superficie de respuesta. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 14(4), 463–474. [https://doi.org/10.1016/S1405-7743\(13\)72258-3](https://doi.org/10.1016/S1405-7743(13)72258-3)
- Gegen, L. K. H. (2007). PROPUESTA DE NUEVOS CRITERIOS DE VIDA DE HERRAMIENTA DE CORTE Y DETERMINACIÓN DEL DESGASTE A PARTIR DE LA CLASIFICACIÓN DE IMÁGENES DIGITALES CARACTERIZADAS UTILIZANDO DESCRIPTORES DE REGIÓN SIMPLES Y BASADOS EN MOMENTOS.
- Guerrero, E. L., Flores, R. C., & Acosta, M. D. (2003). Caracterización de superficies maquinadas por medio de parámetros de rugosidad. *Sistemas Integrados de Manufactura, División de Ingeniería Mecánica, FIME-UANL*, VI(18), 62.

- Hernández-González, L. W., Pérez-Rodríguez, R., Dumitrescu, L., Montero-Sarmiento, R., & Montero-Sarmiento, R. (2015). Estudio de la influencia de los parámetros de corte en la integridad superficial y las desviaciones durante el fresado del acero AISI 1010. *Revista Tecnología En Marcha*, 28(4), 26. <https://doi.org/10.18845/tm.v28i4.2440>
- Hernández Rossi, R., Cruz, M., Casellas Padró, D., Riera Colom, M. D., & Prado Pozuelo, J. M. (2007). Evaluación del comportamiento a desgaste en aceros de herramienta: simulación por ordenador y verificación experimental. *Anales de Mecánica de La Fractura*, 2, 619–623.
- J. Lorentzon, N. J. (2008). Modelling tool wear in cemented-carbide machining alloy 718. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48(10), 1072–1080. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2008.03.001>
- Kalpakjian, S., & Schmid, S. R. (2008). *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*.
- LANGENTHAL, M. A. (2016). Swisscool magnum ux 200. Retrieved from <https://www.jbcnc.se/images/datasheets/magnumux200.pdf>
- Lara, A. G. E. (2015). *Influencia de Parámetros de Corte en la Rugosidad Superficial en Procesos de Fresado*. Universidad de Sevilla.
- Li, B. (2012). A review of tool wear estimation using theoretical analysis and numerical simulation technologies. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 35, 143–151. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2012.05.006>
- Melrose, J., Perroy, R., & Careas, S. (2015). THE INFLUENCE OF NUMBER OF INSERTS AND CUTTING PARAMETERS ON SURFACE ROUGHNESS IN FACE MILLING. *Statewide Agricultural Land Use Baseline 2015*, 1(1), 1–7. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

- Mikell P. Groover. (1997). *Fundamentos de manufactura moderna*. (S. A. D. C. . McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, Ed.) (Tercera).
- Moisés Hinojosa Rivera, M. E. R. M. (2001). La rugosidad de las superficies: Topometría, *IV*.
- NAVARRO, J. E. C., & GONZALES, J. C. T. (2012). *Estudio del desgaste del flanco de un buril de acero rápido hss implantado con iones de titanio y nitruro de titanio durante el torneado en seco del acero aisi 1045*. 200.93.148.28.
- NORMA ISO 8688/1: (1989). Pruebas para la determinación de la vida útil de una herramienta de corte en la operación de fresado. Parte 1: fresado frontal.
- Pérez, J. de J. R., Paz, J. P. Z. De, & Castañeda, E. C. (2012). Técnica de medición del desgaste de una herramienta de corte utilizando un sensor de desplazamiento láser. *Scientia Et Technica*, *XVII*(50), 27–32. Retrieved from <http://www.redalyc.org/resumen.oa?id=84923878005>
- Ramsés Otto Cunha Lima, A. C. A. de M. (2013). análise do desgaste e das avarias em insertos de metal duro após o fresamento com ar quente.
- Renishaw. (2016). Process control solutions. Retrieved from [file:///C:/Users/ufpso/Downloads/H-2000-3006-06-A\\_MTP\\_Pocket\\_Guide\\_EN.pdf](file:///C:/Users/ufpso/Downloads/H-2000-3006-06-A_MTP_Pocket_Guide_EN.pdf)
- Shi, Q., Li, L., He, N., Zhao, W., & Liu, X. (2012). Experimental study in high speed milling of titanium alloy TC21. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 49–54. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-3997-3>
- Vagnorius, Z., Rausand, M., & Sorby, K. (2010). Determining optimal replacement time for metal cutting tools. *European Journal of Operational Research*, *206*(2), 407–416. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2010.03.023>

Valencia, D. E., & Alisis, D. E. L. A. N. (2007). INTELIGENCIA ARTIFICIAL PARA LA PREDICCIÓN Y CONTROL DEL ACABADO SUPERFICIAL EN PROCESOS DE FRESADO A ALTA VELOCIDAD.

Walter. (2012). General Catalogue TURNING VISIONS, 2148. Retrieved from <http://www.walter-tools.com/SiteCollectionDocuments/downloads/global/catalogues/en-gb/general-catalogue-2012-en.pdf>

## 10. ANEXOS

*Anexo 1. Tablas correspondientes a los descriptores.*

Inserto 1.

Pasada	pixel			milímetros		
	Area	Eje Mayor	Eje Menor	Eje Mayor	Eje Menor	
1	1133	130,564099	14,5539524	0,00765908	0,33946666	0,03784028
2	2192	141,03635	24,319917	0,01481792	0,36669451	0,06323178
3	3325	172,521878	27,5054251	0,022477	0,44855688	0,07151411
4	2000	156,699464	22,110859	0,01352	0,40741861	0,05748823
5	2030	161,060642	19,4646265	0,0137228	0,41875767	0,05060803
6	2065	147,422241	21,1912896	0,0139594	0,38329783	0,05509735
7	3266	191,509418	29,4858477	0,02207816	0,49792449	0,0766632
8	4099	285,180081	28,6541991	0,02770924	0,74146821	0,07450092
9	3542	274,834474	26,6907283	0,02394392	0,71456963	0,06939589
10	10393	615,713108	33,0018112	0,07025668	1,60085408	0,08580471
11	10489	613,334252	35,8238366	0,07090564	1,59466906	0,09314198
12	10268	610,777318	34,7352367	0,06941168	1,58802103	0,09031162
13	10516	581,09965	33,4038292	0,07108816	1,51085909	0,08684996
14	11222	598,579918	33,4386691	0,07586072	1,55630779	0,08694054
15	12245	587,707021	36,058741	0,0827762	1,52803826	0,09375273
16	5345	295,067384	31,9371351	0,0361322	0,7671752	0,08303655
17	9350	576,789377	31,2426051	0,063206	1,49965238	0,08123077
18	12818	626,370551	37,7831671	0,08664968	1,62856343	0,09823623
19	11818	616,166662	35,4576361	0,07988968	1,60203332	0,09218985
20	10002	611,938937	31,9637003	0,06761352	1,59104124	0,08310562
21	10057	615,062188	32,6006662	0,06798532	1,59916169	0,08476173
22	9037	615,747063	31,1808622	0,06109012	1,60094236	0,08107024
23	10545	670,048361	33,8733418	0,0712842	1,74212574	0,08807069
24	8851	635,626841	32,2240188	0,05983276	1,65262979	0,08378245
25	9557	613,086347	32,1922862	0,06460532	1,5940245	0,08369994
26	9553	624,161759	33,6477407	0,06457828	1,62282057	0,08748413
27	7079	427,583056	32,3995887	0,04785404	1,11171595	0,08423893
28	10906	593,287984	34,5075392	0,07372456	1,54254876	0,0897196
29	5526	431,116305	25,7913452	0,03735576	1,12090239	0,0670575
30	10749	653,005472	34,4072832	0,07266324	1,69781423	0,08945894
31	10518	659,472591	33,300452	0,07110168	1,71462874	0,08658118
32	5457	357,508912	28,7878197	0,03688932	0,92952317	0,07484833
33	6594	338,689205	33,4785599	0,04457544	0,88059193	0,08704426
34	11104	561,050486	35,8607258	0,07506304	1,45873126	0,09323789
35	12430	587,810569	38,8805068	0,0840268	1,52830748	0,10108932
36	6180	366,598932	28,6461343	0,0417768	0,95315722	0,07447995
37	8475	458,403596	34,7682862	0,057291	1,19184935	0,09039754
38	8163	418,660344	34,0121691	0,05518188	1,08851689	0,08843164
39	9124	423,207088	36,5110246	0,06167824	1,10033843	0,09492866
40	8914	613,659047	33,8394657	0,06025864	1,59551352	0,08798261
41	7612	412,206475	36,7748361	0,05145712	1,07173683	0,09561457
42	7978	448,262233	35,3637388	0,05393128	1,16548181	0,09194572
43	6121	301,547644	31,8664396	0,04137796	0,78402387	0,08285274
44	12259	580,718322	38,5984042	0,08287084	1,50986764	0,10035585
45	7847	350,490105	42,983397	0,05304572	0,91127427	0,11175683

Inserto 2.

Pasada	pixel			milímetros		
	Area	Eje Mayor	Eje Menor	Area	Eje Mayor	Eje Menor
1	1214	114,086127	20,3262172	0,01846494	0,44493589	0,07927225
2	2543	163,855178	33,5132009	0,03867903	0,6390352	0,13070148
3	3186	172,064361	36,5562698	0,04845906	0,67105101	0,14256945
4	2760	179,877498	31,7366544	0,0419796	0,70152224	0,12377295
5	3411	193,210247	34,7560428	0,05188131	0,75351996	0,13554857
6	2627	181,637726	30,6757516	0,03995667	0,70838713	0,11963543
7	3185	184,92524	33,8983952	0,04844385	0,72120844	0,13220374
8	3378	203,941525	35,9347302	0,05137938	0,79537195	0,14014545
9	6629	353,499506	35,1195287	0,10082709	1,37864807	0,13696616
10	3677	233,211249	34,3043271	0,05592717	0,90952387	0,13378688
11	4244	252,413777	36,7884203	0,06455124	0,98441373	0,14347484
12	3411	239,019696	34,4025591	0,05188131	0,93217682	0,13416998
13	3064	201,317867	33,1653329	0,04660344	0,78513968	0,1293448
14	4545	259,146966	36,4658581	0,06912945	1,01067317	0,14221685
15	4061	236,004697	35,7433216	0,06176781	0,92041832	0,13939895
16	4146	237,965113	36,302638	0,06306066	0,92806394	0,14158029
17	4421	238,307197	34,1140868	0,06724341	0,92939807	0,13304494
18	5965	336,921054	36,8763419	0,09072765	1,31399211	0,14381773
19	4233	263,385024	32,9877888	0,06438393	1,0272016	0,12865238
20	2980	181,527536	23,5478829	0,0453258	0,70795739	0,09183674
21	3171	182,973746	24,1276084	0,04823091	0,71359761	0,09409767
22	4540	326,02369	30,2063095	0,0690534	1,27149239	0,11780461
23	2887	179,293016	22,6167905	0,04391127	0,69924276	0,08820548
24	4315	288,541374	25,822752	0,06563115	1,12531136	0,10070873
25	3462	217,128821	24,730925	0,05265702	0,8468024	0,09645061
26	3077	190,08675	23,6767138	0,04680117	0,74133832	0,09233918
27	2541	175,220561	21,3172464	0,03864861	0,68336019	0,08313726
28	3428	238,207741	23,0322923	0,05213988	0,92901019	0,08982594
29	3161	216,619406	21,8111258	0,04807881	0,84481569	0,08506339
30	3755	225,945128	25,350496	0,05711355	0,881186	0,09886693
31	3914	253,978582	24,7945521	0,05953194	0,99051647	0,09669875
32	5682	239,771156	33,3800737	0,08642322	0,93510751	0,13018229
33	9843	420,849229	37,5662647	0,14971203	1,64131199	0,14650843
34	3661	257,309606	24,3490792	0,05568381	1,00350746	0,09496141
35	6495	427,667031	29,2240654	0,09878895	1,66790142	0,11397386
36	3599	253,707825	24,730552	0,05474079	0,98946052	0,09644915
37	3937	241,617145	24,7725612	0,05988177	0,94230686	0,09661299
38	3950	255,411702	24,5234766	0,0600795	0,99610564	0,09564156
39	4504	280,518344	23,8448349	0,06850584	1,09402154	0,09299486
40	3355	254,923957	21,9363359	0,05102955	0,99420343	0,08555171
41	4471	254,470013	27,2885875	0,06800391	0,99243305	0,10642549
42	5032	418,342382	27,2871156	0,07653672	1,63153529	0,10641975
43	5243	397,766349	26,4025056	0,07974603	1,55128876	0,10296977
44	3768	276,824084	26,1073246	0,05731128	1,07961393	0,10181857
45	4793	322,216537	29,563038	0,07290153	1,25664449	0,11529585

## Inserto3.

Pasada	pixel			milímetros		
	Area	Eje Mayor	Eje Menor	Area	Eje Mayor	Eje Menor
1	2101	200,545805	19,9046721	0,01420276	0,52141909	0,05175215
2	3090	249,605157	18,3977749	0,0208884	0,64897341	0,04783421
3	4128	303,574844	30,0332651	0,02790528	0,78929459	0,07808649
4	5599	312,201382	31,1790791	0,03784924	0,81172359	0,08106561
5	5015	349,632675	29,6712128	0,0339014	0,90904495	0,07714515
6	5160	340,64994	23,9934168	0,0348816	0,88568984	0,06238288
7	9573	565,106255	30,6484938	0,06471348	1,46927626	0,07968608
8	7576	585,638418	25,5544546	0,05121376	1,52265989	0,06644158
9	8047	592,61268	27,951859	0,05439772	1,54079297	0,07267483
10	8113	575,760303	29,0757765	0,05484388	1,49697679	0,07559702
11	10471	618,647413	30,9446236	0,07078396	1,60848327	0,08045602
12	10074	638,749052	29,3450119	0,06810024	1,66074753	0,07629703
13	9839	633,904022	30,2213215	0,06651164	1,64815046	0,07857544
14	11390	630,682921	32,0682568	0,0769964	1,63977559	0,08337747
15	9815	616,942468	29,7635257	0,0663494	1,60405042	0,07738517
16	12000	660,093621	34,0693135	0,08112	1,71624342	0,08858022
17	13083	592,751517	38,4057201	0,08844108	1,54115394	0,09985487
18	9978	523,840532	36,103763	0,06745128	1,36198538	0,09386978
19	9426	587,002839	32,6493849	0,06371976	1,52620738	0,0848884
20	11656	612,464505	32,9003765	0,07879456	1,59240771	0,08554098
21	13608	659,833978	36,2018587	0,09199008	1,71556834	0,09412483
22	10641	614,951606	31,5837082	0,07193316	1,59887417	0,08211764
23	10476	646,646985	33,3421739	0,07081776	1,68128216	0,08668965
24	11907	629,448423	34,8661314	0,08049132	1,6365659	0,09065194
25	10784	627,598206	34,908475	0,07289984	1,63175533	0,09076203
26	12964	623,131645	34,8234088	0,08763664	1,62014228	0,09054086
27	10796	593,527583	36,5332207	0,07298096	1,54317172	0,09498637
28	10553	571,19433	36,4978627	0,07133828	1,48510526	0,09489444
29	13726	628,181033	41,410505	0,09278776	1,63327069	0,10766731
30	11721	566,035795	39,3971031	0,07923396	1,47169307	0,10243247
31	12378	570,136817	41,3513529	0,08367528	1,48235572	0,10751352
32	15900	616,939297	40,8433523	0,107484	1,60404217	0,10619272
33	14864	621,892527	39,1268118	0,10048064	1,61692057	0,10172971
34	14447	544,782427	44,5121199	0,09766172	1,41643431	0,11573151
35	15173	620,877963	42,5371158	0,10256948	1,6142827	0,1105965
36	15531	570,992924	42,8394608	0,10498956	1,4845816	0,1113826
37	16079	589,165702	41,3148415	0,10869404	1,53183082	0,10741859
38	16295	586,834969	44,0108323	0,1101542	1,52577092	0,11442816
39	16832	608,369005	44,1110708	0,11378432	1,58175941	0,11468878
40	13934	550,065995	41,5820837	0,09419384	1,43017159	0,10811342
41	15872	602,890818	43,5444305	0,10729472	1,56751613	0,11321552
42	15966	606,799666	45,1875392	0,10793016	1,57767913	0,1174876
43	15928	588,652878	43,3323475	0,10767328	1,53049748	0,1126641
44	20645	592,242874	53,6234362	0,1395602	1,53983147	0,13942093
45	14762	544,561735	47,126446	0,09979112	1,41586051	0,12252876

## Inserto 4.

Pasada	pixel			milímetros		
	Area	Eje Mayor	Eje Menor	Area	Eje Mayor	Eje Menor
1	1399	117,159407	22,7247335	0,00945724	0,30461446	0,05908431
2	3940	221,694739	38,3795185	0,0266344	0,57640632	0,09978675
3	5772	254,071111	35,326376	0,03901872	0,66058489	0,09184858
4	5367	245,8913	39,4093641	0,03628092	0,63931738	0,10246435
5	6569	326,665542	35,6622005	0,04440644	0,84933041	0,09272172
6	5708	302,959455	30,1386054	0,03858608	0,78769458	0,07836037
7	4462	226,345097	28,8730483	0,03016312	0,58849725	0,07506993
8	6228	370,825799	32,3383455	0,04210128	0,96414708	0,0840797
9	4025	223,013911	26,2242548	0,027209	0,57983617	0,06818306
10	5726	263,327555	36,9992774	0,03870776	0,68465164	0,09619812
11	5669	262,503731	36,4243412	0,03832244	0,6825097	0,09470329
12	5680	236,414414	32,4408551	0,0383968	0,61467748	0,08434622
13	11068	612,01484	32,7102031	0,07481968	1,59123858	0,08504653
14	11864	667,218651	34,0547142	0,08020064	1,73476849	0,08854226
15	6178	258,526017	37,1857013	0,04176328	0,67216764	0,09668282
16	5965	289,905157	36,4378784	0,0403234	0,75375341	0,09473848
17	10251	652,136913	31,1966874	0,06929676	1,69555597	0,08111139
18	6477	364,023009	32,8833053	0,04378452	0,94645982	0,08549659
19	8042	419,567263	34,1328733	0,05436392	1,09087488	0,08874547
20	9655	714,310016	33,4093451	0,0652678	1,85720604	0,0868643
21	9618	632,412081	29,2338176	0,06501768	1,64427141	0,07600793
22	5707	427,837972	33,0000163	0,03857932	1,11237873	0,08580004
23	4400	358,937318	31,676984	0,029744	0,93323703	0,08236016
24	6634	377,084618	33,8548094	0,04484584	0,98042001	0,0880225
25	13166	686,354301	34,3453615	0,08900216	1,78452118	0,08929794
26	8938	644,574154	31,126697	0,06042088	1,6758928	0,08092941
27	10290	645,702561	30,9774812	0,0695604	1,67882666	0,08054145
28	7677	379,51581	39,3308641	0,05189652	0,98674111	0,10226025
29	12333	666,557713	33,7494126	0,08337108	1,73305005	0,08774847
30	8405	479,459675	32,8955664	0,0568178	1,24659516	0,08552847
31	8070	512,658317	32,9485236	0,0545532	1,33291162	0,08566616
32	8772	673,407878	30,3776268	0,05929872	1,75086048	0,07898183
33	10769	566,205712	34,5197651	0,07279844	1,47213485	0,08975139
34	13873	690,321966	42,3538805	0,09378148	1,79483711	0,11012009
35	10017	709,103768	33,8852589	0,06771492	1,8436698	0,08810167
36	10649	668,830311	34,4499399	0,07198724	1,73895881	0,08956984
37	12120	714,88092	47,2491406	0,0819312	1,85869039	0,12284777
38	9491	713,455182	31,6508818	0,06415916	1,85498347	0,08229229
39	7346	676,739297	30,8254828	0,04965896	1,75952217	0,08014626
40	2878	153,771511	32,9261155	0,01945528	0,39980593	0,0856079
41	9529	702,953449	33,2620353	0,06441604	1,82767897	0,08648129
42	10412	707,477219	34,0959383	0,07038512	1,83944077	0,08864944
43	7983	685,344567	31,1855391	0,05396508	1,78189587	0,0810824
44	11124	784,95239	34,6769985	0,07519824	2,04087621	0,0901602
45	9570	634,871039	35,1831224	0,0646932	1,6506647	0,09147612

## Inserto 5.

Pasada	pixel			milímetros		
	Area	Eje Mayor	Eje Menor	Area	Eje Mayor	Eje Menor
1	2843	432,509161	9,55403824	0,01921868	1,12452382	0,0248405
2	1940	237,14472	11,8662982	0,0131144	0,61657627	0,03085238
3	410	63,1011014	8,76362738	0,0027716	0,16406286	0,02278543
4	356	62,0128694	7,85177037	0,00240656	0,16123346	0,0204146
5	624	70,8318654	12,6979117	0,00421824	0,18416285	0,03301457
6	1831	242,507837	13,1059937	0,01237756	0,63052038	0,03407558
7	537	111,082181	7,24808332	0,00363012	0,28881367	0,01884502
8	2248	390,076164	8,71248948	0,01519648	1,01419803	0,02265247
9	502	86,4033806	8,59432102	0,00339352	0,22464879	0,02234523
10	1561	282,82069	8,8402795	0,01055236	0,7353338	0,02298473
11	396	74,1809377	7,55495036	0,00267696	0,19287044	0,01964287
12	919	110,496059	11,7762034	0,00621244	0,28728975	0,03061813
13	365	64,8415199	8,0955951	0,0024674	0,16858795	0,02104855
14	498	83,741543	8,49718566	0,00336648	0,21772801	0,02209268
15	469	83,4311262	13,1455042	0,00317044	0,21692093	0,03417831
16	408	41,8389918	18,7670828	0,00275808	0,10878138	0,04879442
17	524	53,9776305	16,4448094	0,00354224	0,14034184	0,0427565
18	978	87,43746	15,3803517	0,00661128	0,2273374	0,03998891
19	1871	144,925953	31,0055084	0,01264796	0,37680748	0,08061432
20	1612	111,828922	47,1896005	0,01089712	0,2907552	0,12269296
21	301	33,3037352	11,911444	0,00203476	0,08658971	0,03096975
22	1394	121,824934	19,9579686	0,00942344	0,31674483	0,05189072
23	769	70,2397156	16,1426567	0,00519844	0,18262326	0,04197091
24	1771	125,78673	36,8246691	0,01197196	0,3270455	0,09574414
25	2271	129,002182	36,6071237	0,01535196	0,33540567	0,09517852
26	1911	164,043578	21,0331236	0,01291836	0,4265133	0,05468612
27	1605	153,052452	15,5960668	0,0108498	0,39793638	0,04054977
28	1133	84,632903	20,4383951	0,00765908	0,22004555	0,05313983
29	1555	137,589713	18,9472455	0,0105118	0,35773325	0,04926284
30	1822	142,591383	20,1061393	0,01231672	0,3707376	0,05227596
31	1831	163,2327	21,4835979	0,01237756	0,42440502	0,05585735
32	870	115,842597	22,1686972	0,0058812	0,30119075	0,05763861
33	2548	130,120549	26,6704355	0,01722448	0,33831343	0,06934313
34	2319	164,88412	20,2753406	0,01567644	0,42869871	0,05271589
35	1692	121,925044	19,248455	0,01143792	0,31700511	0,05004598
36	1404	121,057667	17,1442303	0,00949104	0,31474993	0,044575
37	1509	134,353896	17,4804246	0,01020084	0,34932013	0,0454491
38	1291	115,903561	16,9513405	0,00872716	0,30134926	0,04407349
39	1777	133,550049	20,2486894	0,01201252	0,34723013	0,05264659
40	1483	99,0363197	20,1934816	0,01002508	0,25749443	0,05250305
41	1845	125,160364	20,1895967	0,0124722	0,32541695	0,05249295
42	2343	186,733483	27,325866	0,01583868	0,48550705	0,07104725
43	2472	168,160456	24,4312147	0,01671072	0,43721719	0,06352116
44	1697	117,589328	19,6215009	0,01147172	0,30573225	0,0510159
45	1475	89,9053897	21,817577	0,009971	0,23375401	0,0567257

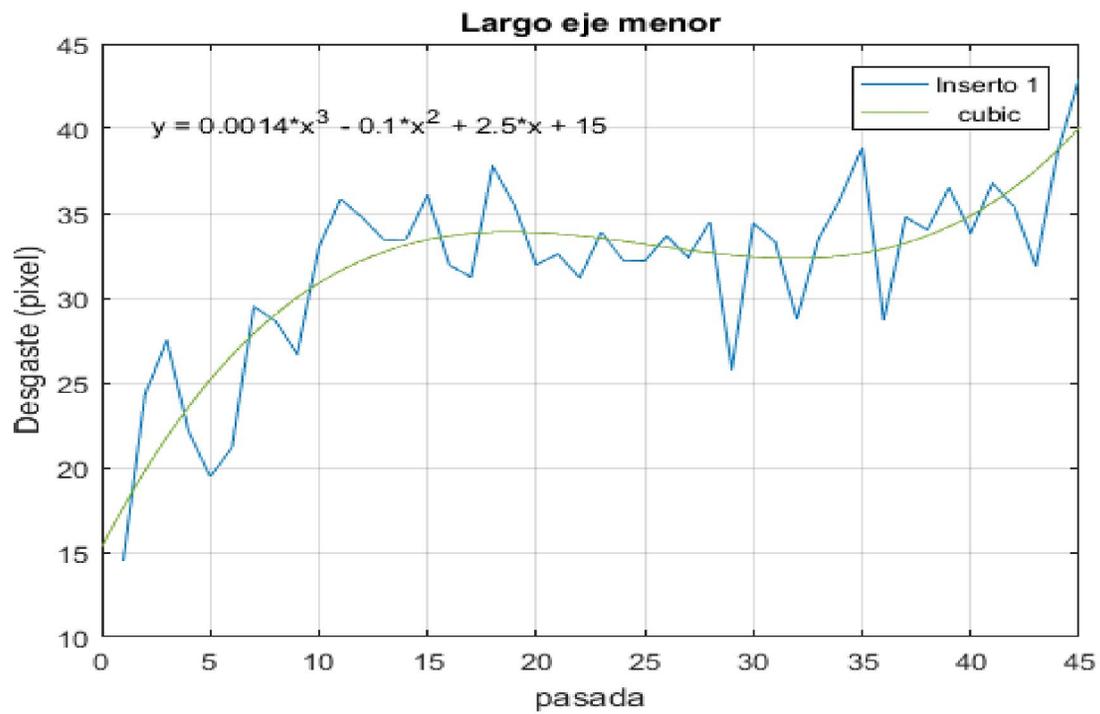
## Inserto 6.

Pasada	pixel			milímetros		
	Area	Eje Mayor	Eje Menor	Area	Eje Mayor	Eje Menor
1	979	137,59089	10,634025	0,00661804	0,35773631	0,02764847
2	2911	207,006424	36,8772609	0,01967836	0,5382167	0,09588088
3	4281	299,898028	33,8699936	0,02893956	0,77973487	0,08806198
4	3296	168,984424	27,8310988	0,02228096	0,4393595	0,07236086
5	4226	254,481662	38,6164296	0,02856776	0,66165232	0,10040272
6	3810	237,729356	35,368383	0,02575556	0,61809633	0,0919578
7	3580	227,206578	26,8259863	0,0242008	0,5907371	0,06974756
8	3579	225,051935	25,2091734	0,02419404	0,58513503	0,06554385
9	3141	195,313788	24,9317032	0,02123316	0,50781585	0,06482243
10	4061	284,599759	36,4184243	0,02745236	0,73995937	0,0946879
11	4976	280,337057	40,5354146	0,03363776	0,72887635	0,10539208
12	4771	290,704931	40,1194656	0,03225196	0,75583282	0,10431061
13	5492	331,719467	36,5643216	0,03712592	0,86247062	0,09506724
14	5610	355,323551	37,005863	0,0379236	0,92384123	0,09621524
15	5776	335,871473	35,8778795	0,03904576	0,87326583	0,09328249
16	7680	516,834145	29,1831112	0,0519168	1,34376878	0,07587609
17	6402	386,576984	36,7382853	0,04327752	1,00510016	0,09551954
18	7718	546,253008	30,793298	0,05217368	1,42025782	0,08006257
19	6971	549,563834	27,6176404	0,04712396	1,42886597	0,07180587
20	6456	431,583317	30,8270957	0,04364256	1,12211662	0,08015045
21	5881	440,577295	28,3015762	0,03975556	1,14550097	0,0735841
22	4823	428,55894	23,5333236	0,03260348	1,11425325	0,06118664
23	6298	530,283196	31,4237262	0,04257448	1,37873631	0,08170169
24	6618	558,071219	30,503045	0,04473768	1,45098517	0,07930792
25	6915	548,826507	30,5348095	0,0467454	1,42694892	0,0793905
26	6230	531,163109	28,0269497	0,0421148	1,38102408	0,07287007
27	6861	559,151823	31,0298568	0,04638036	1,45379474	0,08067763
28	6280	550,009152	29,8378086	0,0424528	1,4300238	0,0775783
29	6830	547,287703	28,7064427	0,0461708	1,42294803	0,07463675
30	7430	582,073975	30,578702	0,0502268	1,51339234	0,07950463
31	10797	556,468258	33,3503679	0,07298772	1,44681747	0,08671096
32	8523	564,619506	32,7419938	0,05761548	1,46801072	0,08512918
33	12708	525,334678	39,9876056	0,08590608	1,36587016	0,10396777
34	18016	618,252391	56,2012519	0,12178816	1,60745622	0,14612325
35	8477	512,780966	28,5585426	0,05730452	1,33323051	0,07425221
36	8105	536,078402	26,045899	0,0547898	1,39380384	0,06771934
37	7893	508,856714	26,9067921	0,05335668	1,32302746	0,06995766
38	9007	489,09079	27,8562234	0,06088732	1,27163605	0,07242618
39	8201	504,766182	27,7520441	0,05543876	1,31239207	0,07215531
40	7106	532,385395	29,4943318	0,04803656	1,38420203	0,07668526
41	15023	634,950412	45,974128	0,10155548	1,65087107	0,11953273
42	15193	649,255225	58,5880873	0,10270468	1,68806358	0,15232903
43	16212	665,138141	44,6198627	0,10959312	1,72935917	0,11601164
44	25154	539,496503	82,4517613	0,17004104	1,40269091	0,21437458
45	10345	559,788951	39,7792428	0,0699322	1,45545127	0,10342603

## Inserto 7.

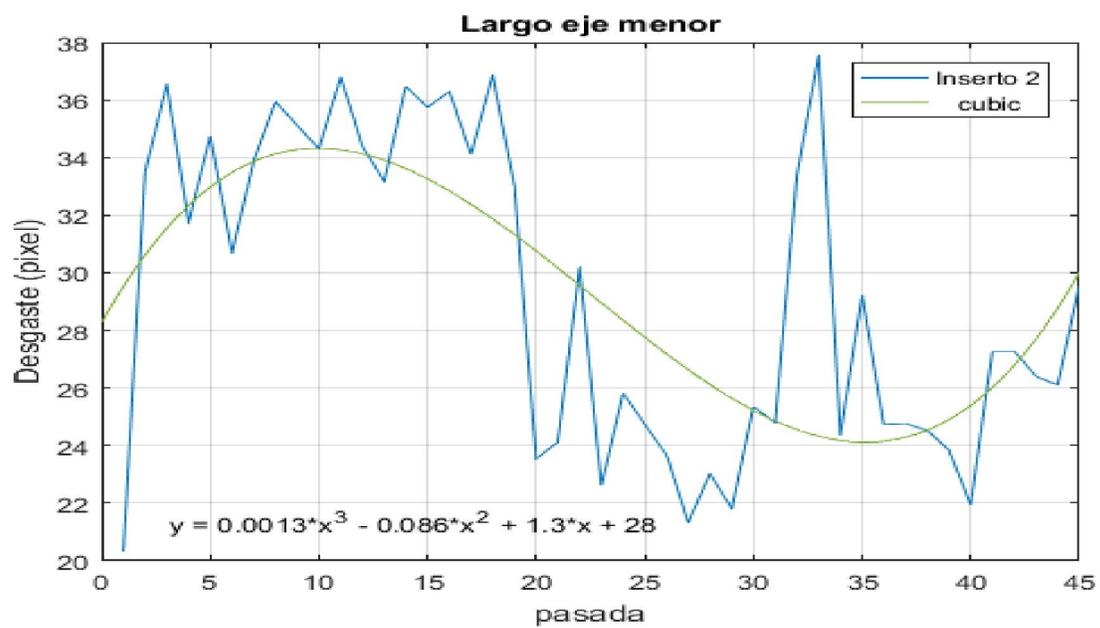
Pasada	pixel			milímetros		
	Area	Eje Mayor	Eje Menor	Area	Eje Mayor	Eje Menor
1	4285	628,531694	9,36551133	0,0289666	1,63418241	0,02435033
2	1090	81,8809857	18,842857	0,0073684	0,21289056	0,04899143
3	1580	121,083431	18,4297318	0,0106808	0,31481692	0,0479173
4	1199	89,7561582	20,5633144	0,00810524	0,23336601	0,05346462
5	3219	263,35832	20,5868419	0,02176044	0,68473163	0,05352579
6	2442	139,08876	29,6224397	0,01650792	0,36163077	0,07701834
7	2710	144,76673	26,4764905	0,0183196	0,3763935	0,06883888
8	3541	254,893738	23,0190117	0,02393716	0,66272372	0,05984943
9	2433	180,862855	20,1806862	0,01644708	0,47024342	0,05246978
10	4896	280,800369	30,5663368	0,03309696	0,73008096	0,07947248
11	6971	417,662128	34,4210368	0,04712396	1,08592153	0,0894947
12	6850	296,298966	37,2945294	0,046306	0,77037731	0,09696578
13	7085	321,64846	34,6831241	0,0478946	0,836286	0,09017612
14	10669	628,018609	34,8183842	0,07212244	1,63284838	0,0905278
15	11179	637,410136	32,734904	0,07557004	1,65726635	0,08511075
16	11836	663,487691	31,3748585	0,08001136	1,725068	0,08157463
17	9490	484,255554	32,3749904	0,0641524	1,25906444	0,08417498
18	9723	662,876837	29,6014656	0,06572748	1,72347978	0,07696381
19	11170	645,689339	34,7010613	0,0755092	1,67879228	0,09022276
20	12004	653,932297	32,1834476	0,08114704	1,70022397	0,08367696
21	11728	670,247108	31,7052056	0,07928128	1,74264248	0,08243353
22	10891	638,945124	31,3533524	0,07362316	1,66125732	0,08151872
23	12037	656,985324	34,5463404	0,08137012	1,70816184	0,08982049
24	11017	674,874331	29,7481743	0,07447492	1,75467326	0,07734525
25	7650	655,671094	24,9475167	0,051714	1,70474485	0,06486354
26	10410	650,701469	29,8270804	0,0703716	1,69182382	0,07755041
27	15532	701,614532	37,4935695	0,10499632	1,82419778	0,09748328
28	9537	482,666684	35,5892945	0,06447012	1,25493338	0,09253217
29	12593	493,221718	42,7980939	0,08512868	1,28237647	0,11127504
30	14806	662,044935	38,3295303	0,10008856	1,72131683	0,09965678
31	11617	515,937742	36,2620431	0,07853092	1,34143813	0,09428131
32	15572	703,124633	38,8604346	0,10526672	1,82812405	0,10103713
33	13479	505,09297	41,0567498	0,09111804	1,31324172	0,10674755
34	13649	501,177714	42,2499776	0,09226724	1,30306206	0,10984994
35	16397	428,395683	41,0349267	0,11084372	1,11382878	0,10669081
36	12806	657,984228	39,8198758	0,08656856	1,71075899	0,10353168
37	12585	472,004156	43,8714886	0,0850746	1,22721081	0,11406587
38	12971	489,917464	44,2586653	0,08768396	1,27378541	0,11507253
39	12527	468,508679	44,3587004	0,08468252	1,21812256	0,11533262
40	13872	475,601983	47,3981492	0,09377472	1,23656516	0,12323519
41	12393	468,437319	46,963179	0,08377668	1,21793703	0,12210427
42	13959	473,069207	47,8440607	0,09436284	1,22997994	0,12439456
43	13652	422,636001	52,8662191	0,09228752	1,0988536	0,13745217
44	17053	617,730595	48,114156	0,11527828	1,60609955	0,12509681
45	15328	430,126556	65,5228416	0,10361728	1,11832905	0,17035939

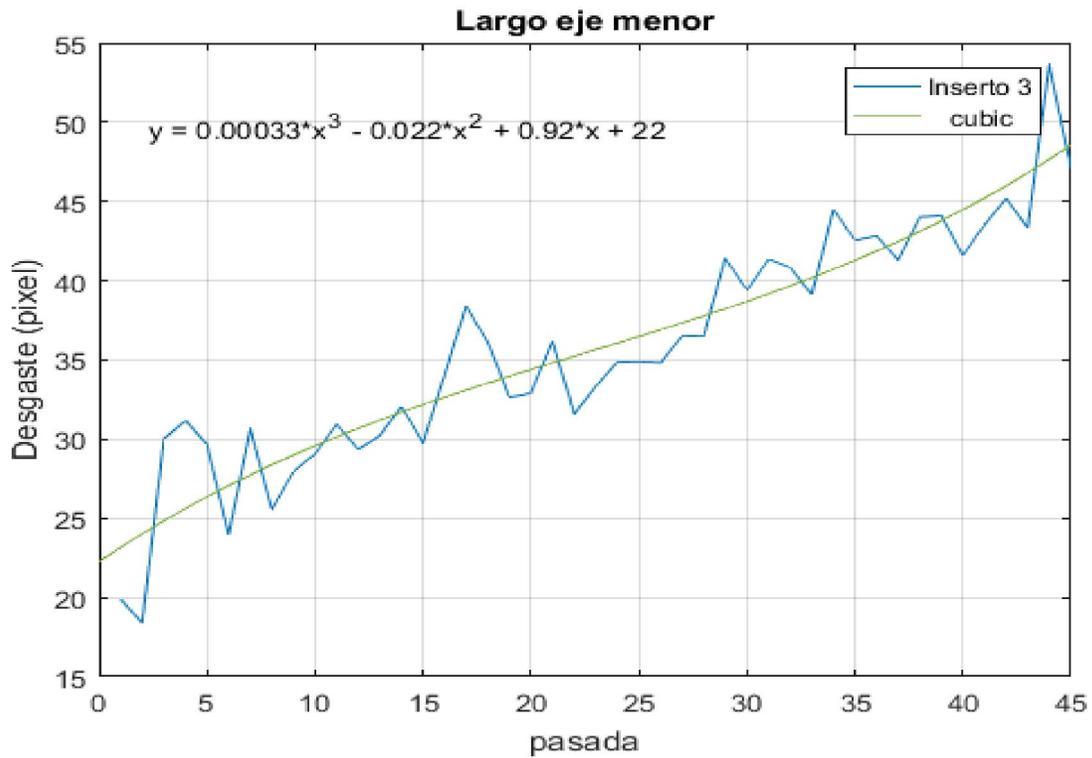
Anexo 2. Gráficas de tendencia al desgaste.



Inserto 1.

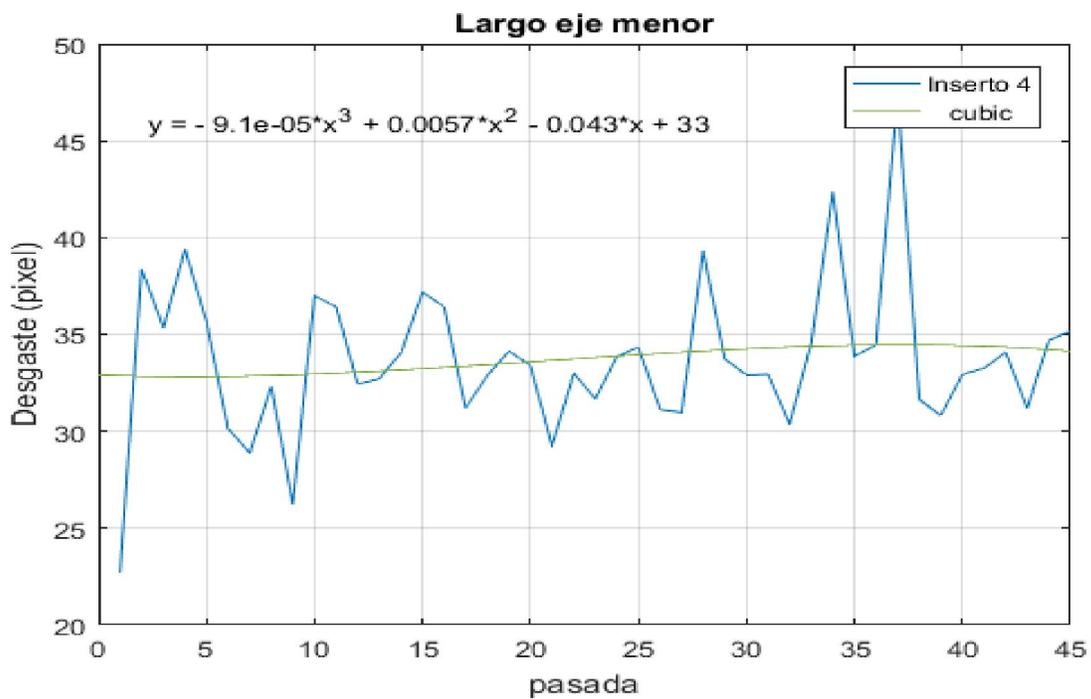
Inserto 2.

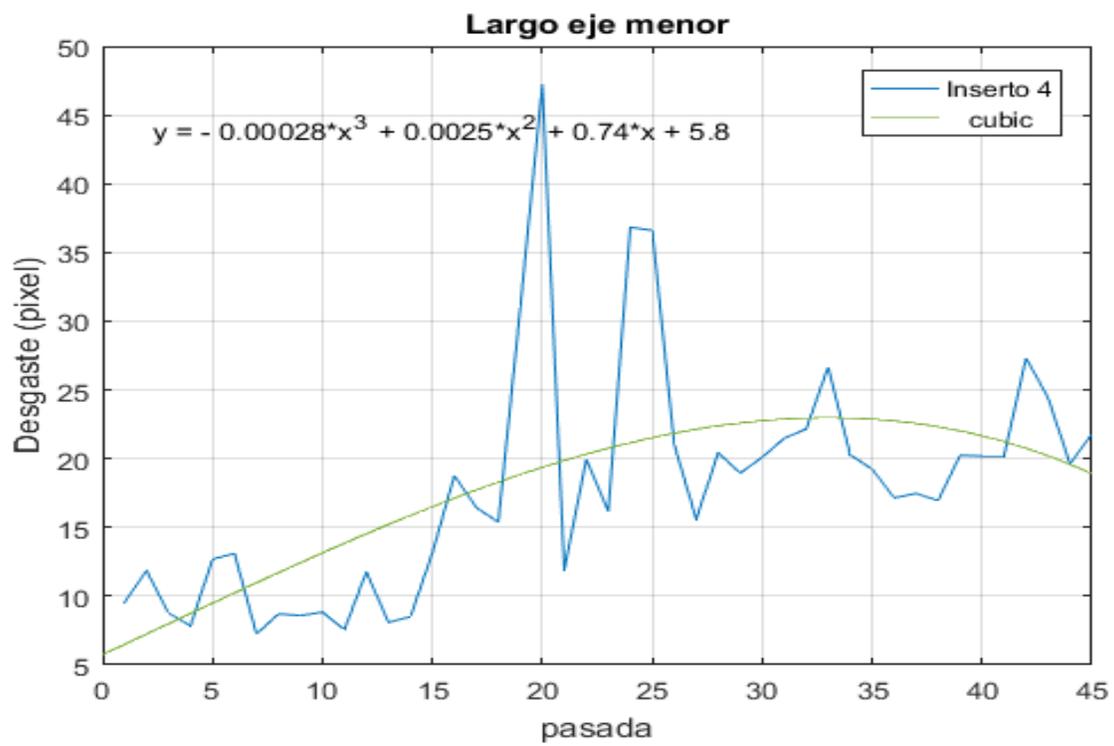




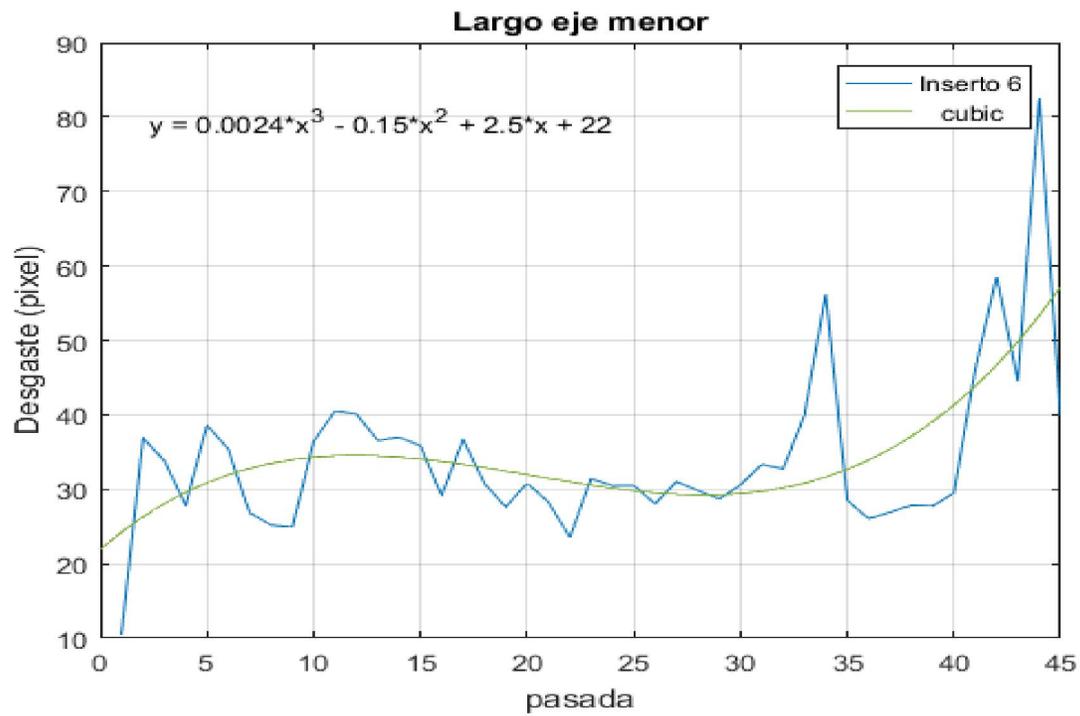
Inserto 3.

Inserto 4.

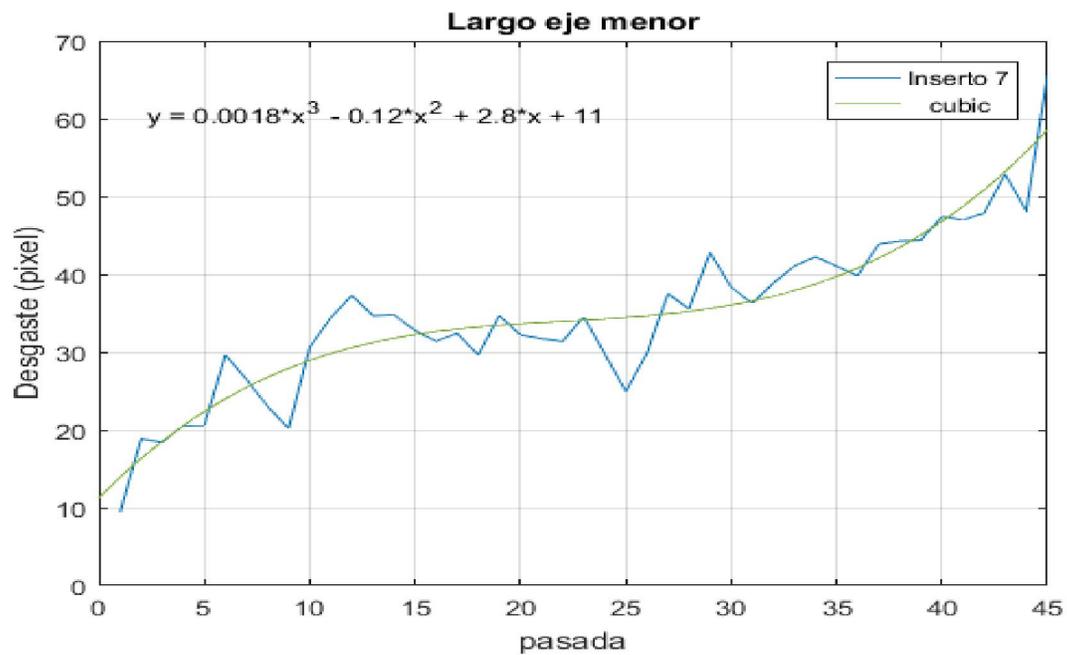




Inserto 5.

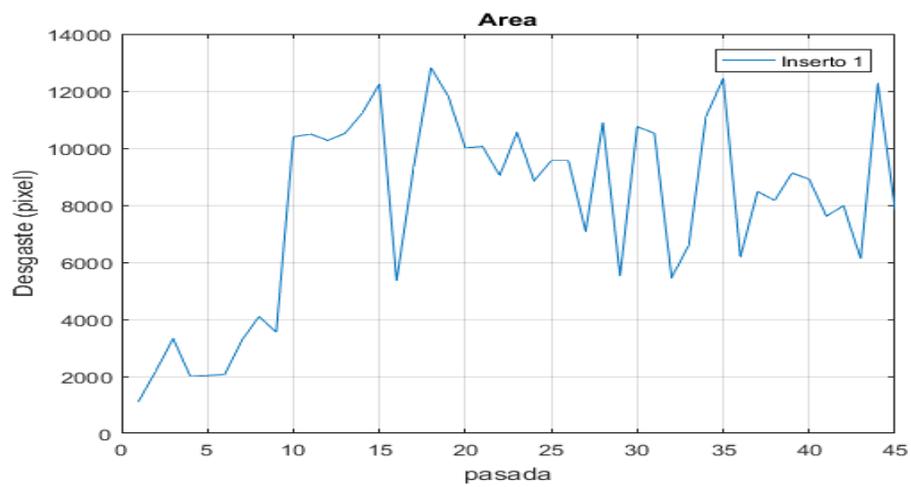


Inserto 6.

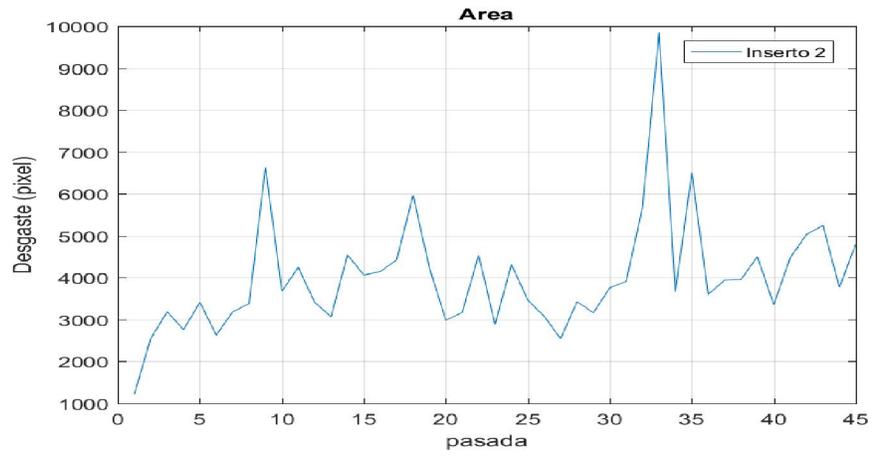


Inserto 7.

*Anexo 3. Gráficas de desgaste del área.*

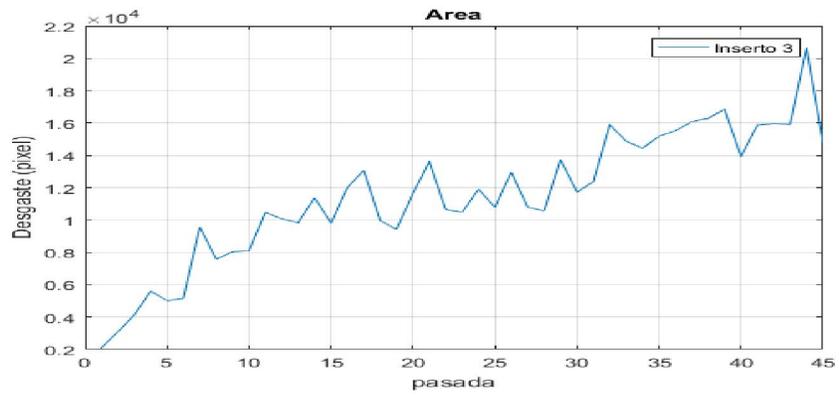


Inserto 1.

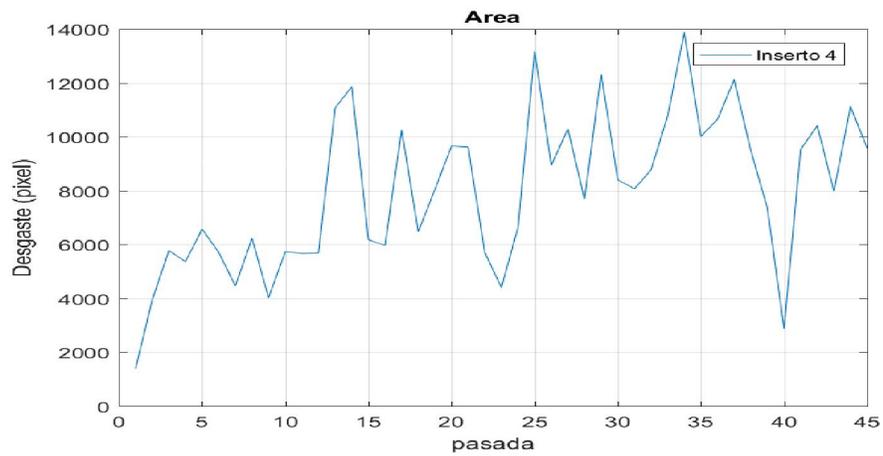


Inserto 2.

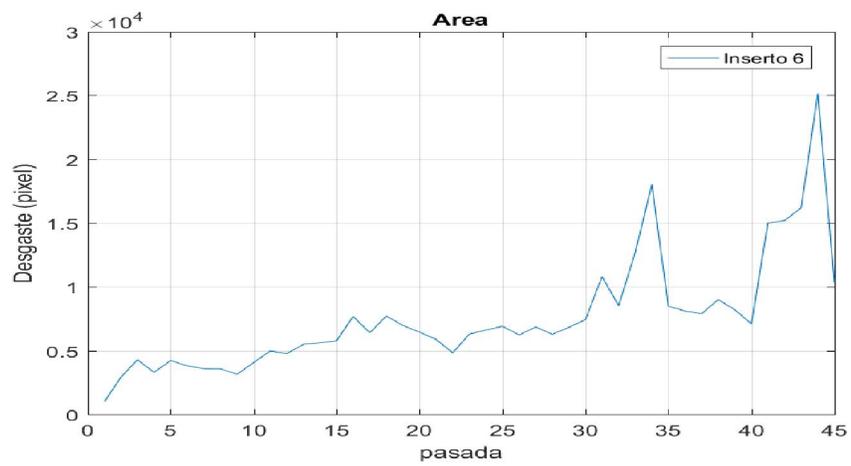
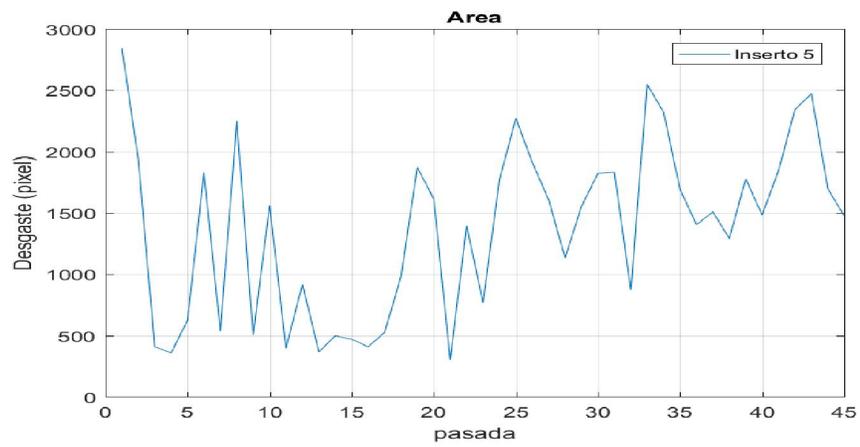
Inserto 3.



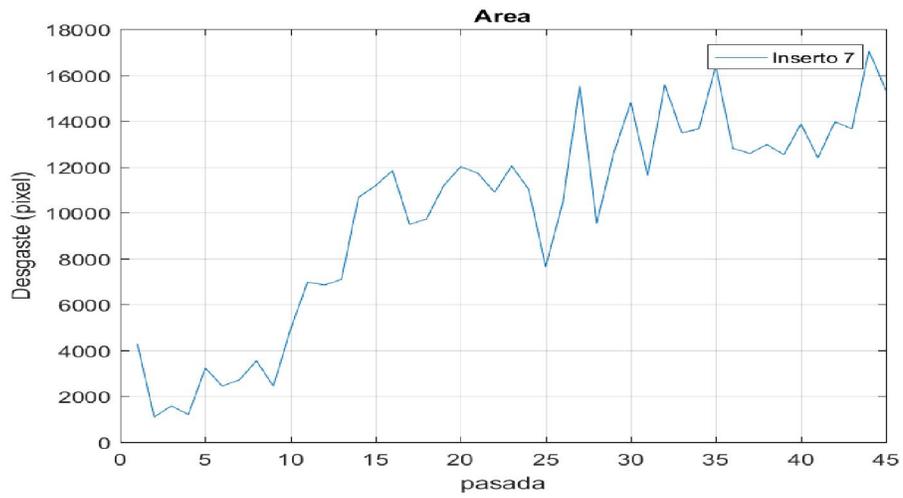
Inserto 4.



Inserto 5.

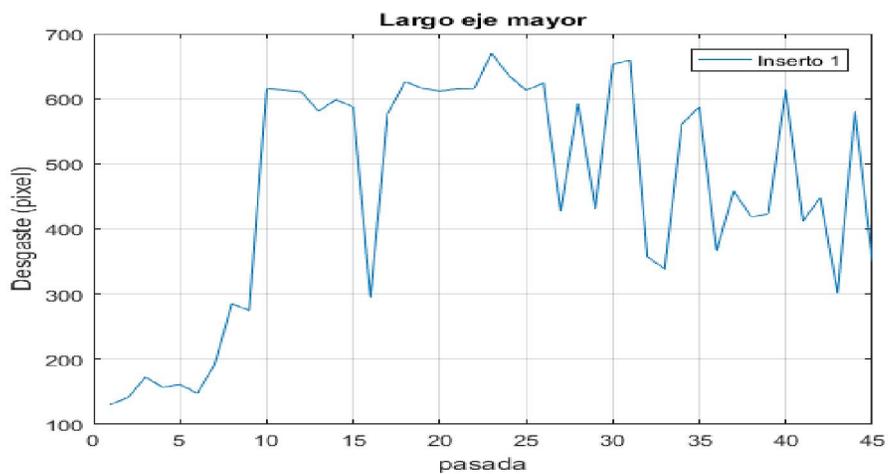


Inserto 6.



Inserto 7.

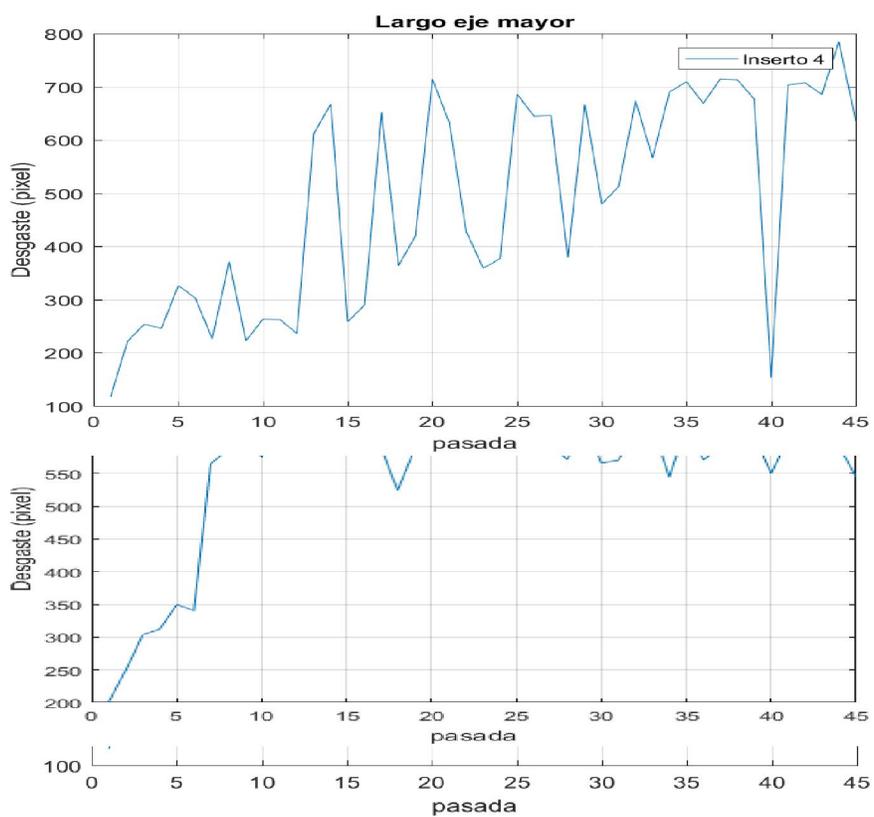
*Anexo 4. Gráficas de desgaste eje mayor.*



Inserto 1.

Inserto 2.

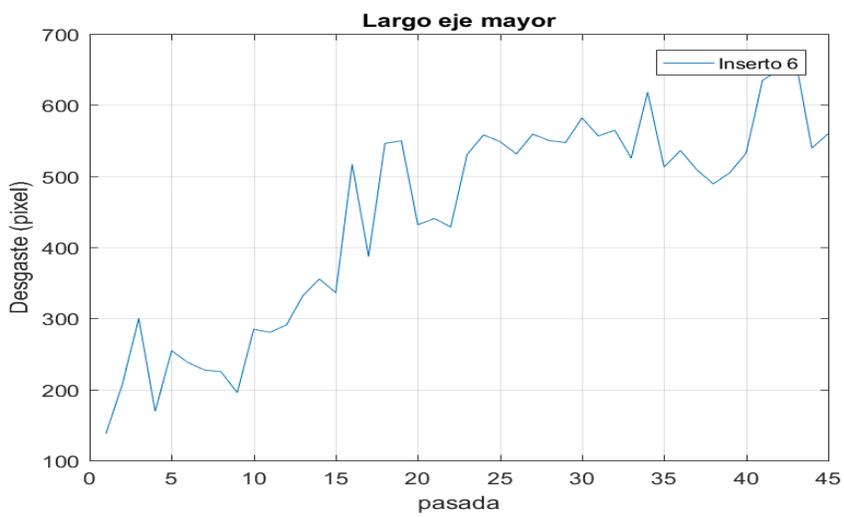
Inserto 3.

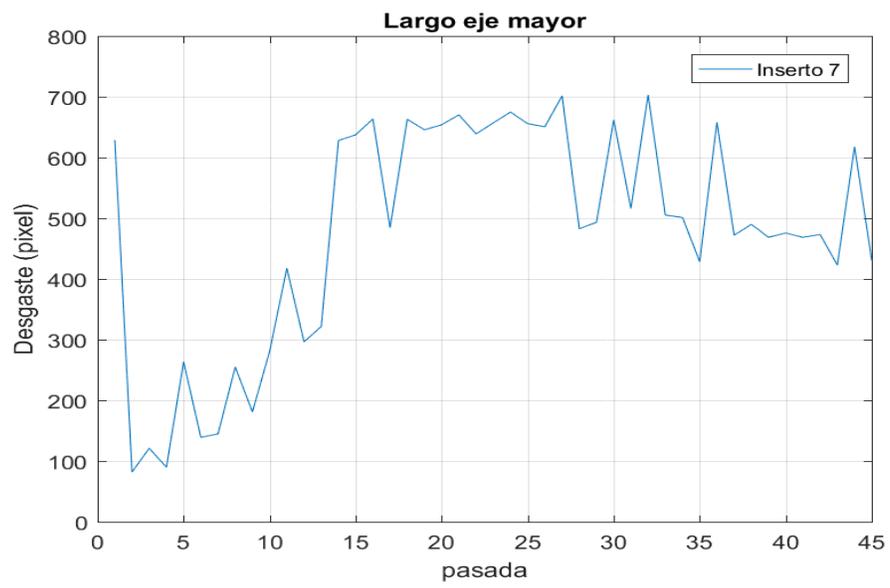


Inserto 4.

Inserto 5.

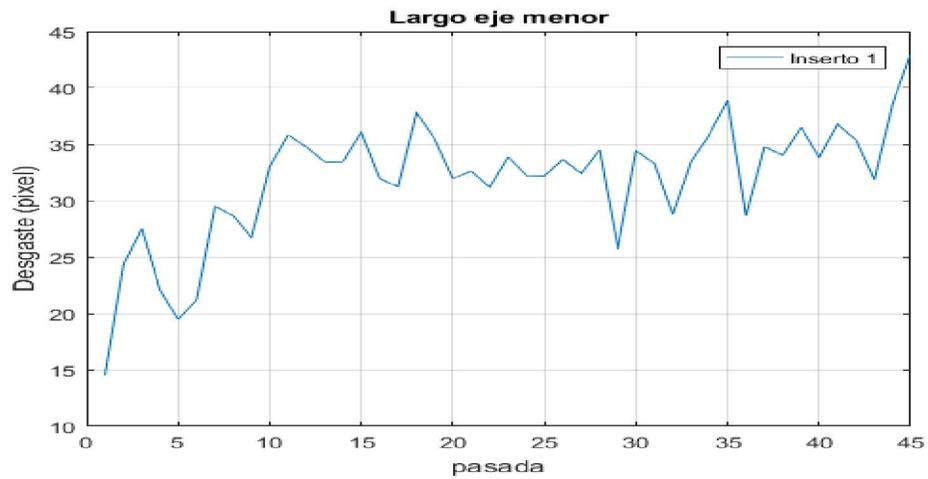
Inserto 6.



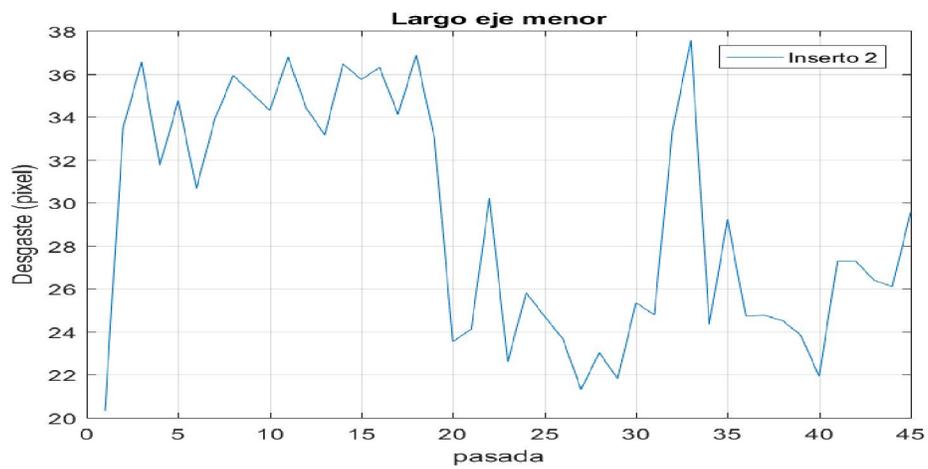


Inserto 7.

Anexo 5. Gráficas de desgaste eje menor.

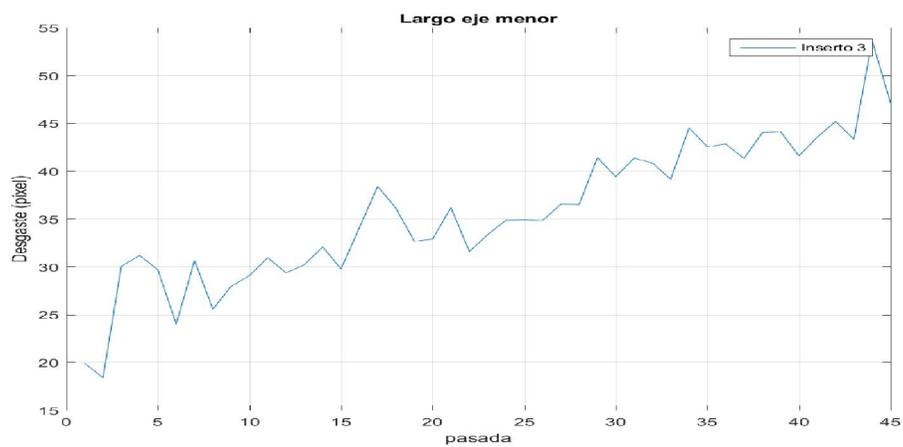


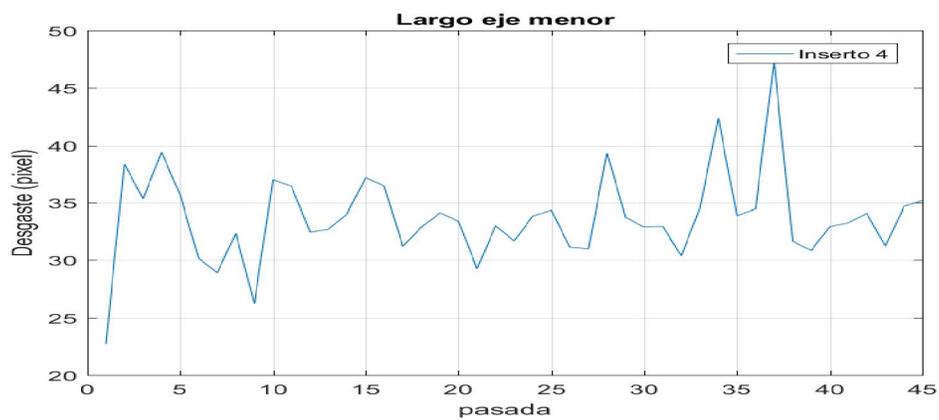
Inserto 1.



Inserto 2.

Inserto 3.

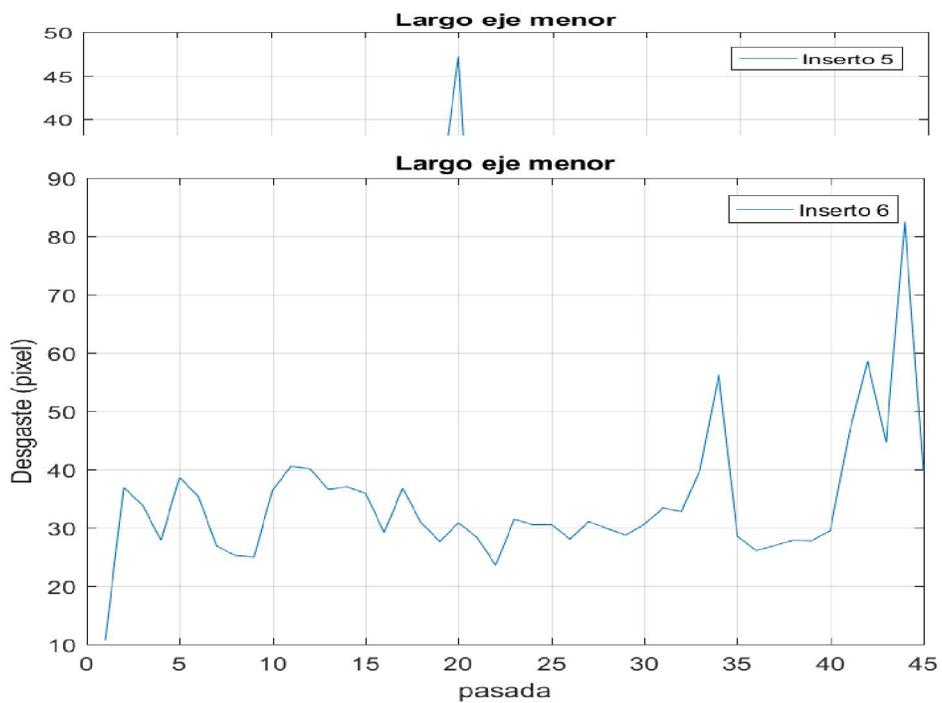


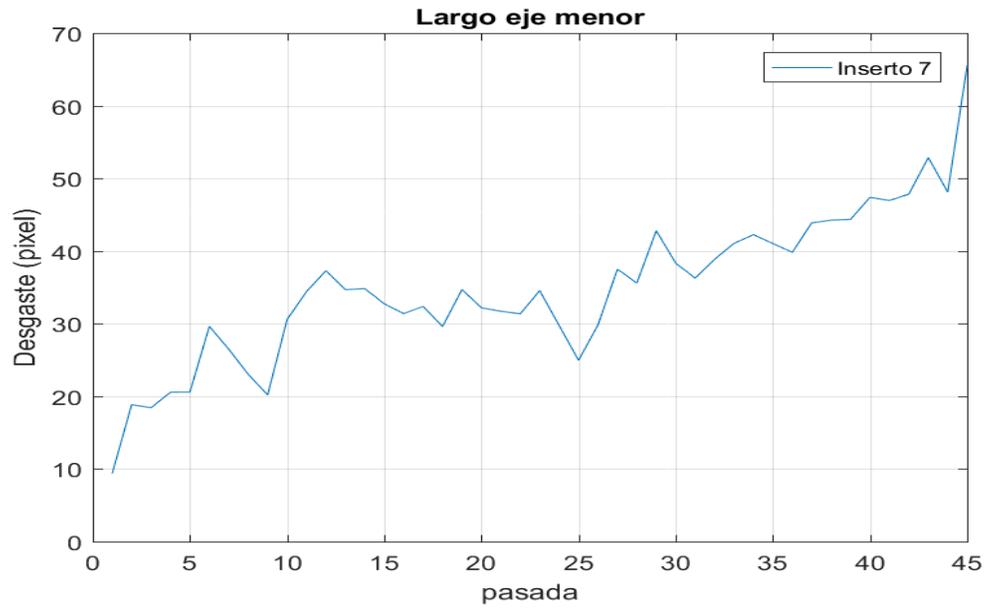


Inserto 4.

Inserto 5.

Inserto 6.





Inserto 7.