



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Departamento: Ingeniería Civil, de Materiales y Fabricación

**Área de Conocimiento: Ingeniería de los Procesos de
Fabricación**

TRABAJO FIN DE GRADO

**METODOLOGÍA EXPERIMENTAL PARA LA UTILIZACIÓN DE TÉCNICAS
DE MICROSCOPIA ÓPTICA ESTEREOSCÓPICA EN EL ANÁLISIS
CUANTITATIVO DEL DESGASTE DE HERRAMIENTAS DE CORTE**

Grado en

Ingeniería Mecánica

Autor: D. Pablo Artacho Timonet

Tutor: D. Francisco Javier Trujillo Vilches

Cotutor: D. Manuel José Herrera Fernández

Málaga, Septiembre de 2024

Resumen

El uso de las aleaciones ligeras en la industria ha tenido un papel fundamental en las últimas décadas, especialmente las aleaciones de aluminio. Dichas aleaciones son de suma importancia en la industria aeronáutica, principalmente en la fabricación de componentes estructurales de aeronaves. Dentro de los distintos procesos de conformado utilizado en la fabricación de estas piezas, el mecanizado es uno de los más usados, debido a su alta precisión y su fácil automatización entre otros factores clave. Las operaciones de torneado, fresado y taladrado son las más comunes a la hora de conformar la pieza. Actualmente, razones económicas y medioambientales hacen del mecanizado en seco, realizado en ausencia de fluidos de corte, uno de los procesos con mayor interés, a pesar de que las agresivas condiciones de corte pueden afectar en gran medida a la integridad estructural de las piezas mecanizadas. En estas condiciones, el fenómeno de desgaste de la pieza aflora en un factor especialmente relevante, y es de suma importancia llevar a cabo investigaciones para mejorar los resultados del proceso. Una técnica habitual para realizar la monitorización del desgaste consiste en la observación del filo de corte mediante el uso de técnicas de microscopía óptica estereoscópicas.

Dentro del contexto anteriormente mencionado se encuentra trabajando el grupo de investigación TEP933 “Ingeniería de Fabricación” de la Universidad de Málaga, entre sus diversas líneas de investigación referidas a la mejora de la integridad superficial en el proceso de mecanizado sostenible de aleaciones ligeras.

De este modo, el objetivo principal de este Trabajo de Fin de Grado es la aplicación de técnicas SOM (Stereoscopic Optical Microscopy), junto con la utilización de un conjunto de operaciones de software que permitan automatizar la captura de imágenes y el proceso de medida de parámetros de desgaste mediante procesamiento digital de imágenes.

En primer lugar, se ha realizado un análisis exhaustivo al microscopio ZEISS Discovery V12 y su software ZEN CORE v5, y se ha diseñado y desarrollado un soporte específico para optimizar la toma de imágenes digitales de las herramientas de corte. Se ha realizado un proceso de verificación y puesta a punto del microscopio, con el fin de tomar imágenes con técnicas EDF (Extended Depth of Field) de distintas plaquitas que han realizado previos procesos de mecanizado en aleaciones ligeras de uso aeronáutico. Una vez obtenidas suficientes imágenes, se ha procedido con el procesamiento digital, utilizando el software de MatLab junto a aditivos externos al programa para la conversión de algunos parámetros. Dicho procesamiento ha consistido en seguir una serie de pasos tales como el binarizado, operaciones morfológicas de erosión y dilatación, limpieza de ruido, identificación de elementos y obtención de parámetros de desgaste de forma automática (superficie de desgaste, profundidad de desgaste, altura máxima de desgaste de incidencia, etc). Los resultados obtenidos han sido comparados con los obtenidos mediante procedimientos de medida de desgaste no automatizados, procediendo a la validación de la metodología empleada.



La metodología desarrollada en este TFG ha permitido ahorrar una gran cantidad de tiempo, desde la operación analógica de recopilación de imágenes de las plaquitas a través del microscopio hasta la toma de resultados obtenidas de estas.

Palabras clave: Mecanizado / Aleaciones ligeras / Desgaste de herramientas de corte / Técnicas de microscopía / Procesamiento digital de imágenes / Inteligencia artificial

Abstract

The use of light alloys in industry has played a major role in recent decades, especially aluminium alloys. These alloys are of great importance in the aeronautical industry, mainly in the manufacture of aircraft structural components. Among the different forming processes used in the manufacture of these parts, machining is one of the most widely used, due to its high precision and easy automation, among other key factors. Turning, milling and drilling operations are the most common when forming the part. Nowadays, economic and environmental reasons make dry machining, performed in the absence of cutting fluids, one of the most interesting processes, although the aggressive cutting conditions can greatly affect the structural integrity of the machined parts. Under these conditions, the phenomenon of part wear is a particularly relevant factor, and it is of utmost importance to carry out research to improve the results of the process. A common technique for wear monitoring is the observation of the cutting edge using stereo optical microscopy techniques.

Within the aforementioned context, the TEP933 "Ingeniería de Fabricación" research group of the University of Malaga is working, among its various lines of research relating to the improvement of surface integrity in the sustainable machining process of light alloys.

Thus, the main objective of this Final Degree Project is the application of SOM (Stereoscopic Optical Microscopy) techniques, together with the use of a set of software operations to automate the capture of images and the process of measuring wear parameters by means of digital image processing.

Firstly, an exhaustive analysis of the ZEISS Discovery V12 microscope and its ZEN CORE v5 software has been carried out, and a specific support has been designed and developed to optimise the digital imaging of cutting tools. A process of verification and fine-tuning of the microscope has been carried out in order to take images with EDF (Extended Depth of Field) techniques of different inserts that have undergone previous machining processes on light alloys for aeronautical use. Once enough images had been obtained, digital processing was carried out, using MatLab software together with external additives to the programme for the conversion of some parameters. This processing consisted of following a series of steps such as binarisation, morphological operations of erosion and dilation, noise cleaning, identification of elements and obtaining wear parameters automatically (wear surface, wear depth, maximum incidence wear height, etc.). The results obtained have been compared with those obtained using non-automated wear measurement procedures, and the methodology used has been validated.

The methodology developed in this TFG has saved a large amount of time, from the analogue operation of collecting images of the inserts through the microscope to taking the results obtained from them.



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



Keywords: Machining / Light alloys / Tool wear / Microscopy techniques / Digital image processing / Artificial Intelligence



ÍNDICE DE CONTENIDO

1	Introducción.....	16
1.1	Contexto del Trabajo Fin de Grado.....	16
1.2	Objetivos del Trabajo.....	18
1.3	Estructura de la memoria	19
2	Aleaciones Ligeras y sus usos en la aeronáutica.....	20
2.1	Aluminio y sus propiedades.....	20
2.2	Aleaciones de Aluminio	21
2.3	Titanio y sus propiedades	24
2.4	Aleaciones de Titanio.....	24
2.5	Aplicación de las aleaciones para uso aeronáutico.....	25
3	Mecanizado en seco de aleaciones aeronáuticas.....	26
3.1	Impacto medioambiental y económico del uso de fluidos de corte	26
3.2	Desgaste de la pieza por mecanizado.....	27
3.3	Proceso de Medida del Desgaste.....	29
3.3.1	Desgaste en Incidencia	30
3.3.2	Cráteres.....	31
3.3.3	Filo recrecido (BUE: build-up edge)	31
3.4	Integridad superficial.....	32
4	Inteligencia artificial aplicada al proceso digital de imágenes	34
4.1	Concepto de Proceso de filtrado	35
4.2	Diferentes técnicas de procesado	36
4.3	Aplicaciones del procesado de imágenes.....	37
4.4	Proceso de imágenes para la detección del desgaste de herramientas de corte.	39

5	Metodología experimental	40
5.1	Desarrollo de la metodología empleada	40
5.2	Datos de partida	42
5.3	Herramienta de Corte. Tipo, Material y Geometría.	44
5.4	Descripción del Microscopio ZEISS Discovery V12	46
5.5	Descripción del soporte creado para la sujeción de la plaquita	48
5.6	Verificación y Puesta a Punto del Microscopio ZEISS Discovery V12	54
5.6.1	Técnicas Metrológicas en la Verificación del Microscopio ZEISS Discovery V12	55
	Análisis del Software ZEN CORE v.5	57
5.7	57
5.8	Aplicación de Técnicas SOM	59
5.8.1	Técnicas de Imagen EDF	60
5.9	Procesamiento digital de imágenes.....	60
5.10	Desarrollo de la APP	67
5.10.1	Introducción.....	67
5.10.2	Funcionamiento de la App.....	68
6	Resultados	77
6.1	Introducción.....	77
6.2	Cara de Desprendimiento.....	78
6.2.1	Área de Desgaste	79
6.2.2	Ancho y Profundidad de Desgaste.....	79
6.3	Cara de Incidencia.....	80
6.3.1	Desgaste Máximo de Incidencia (VB_{MAX})	81
6.3.2	Ancho de Desgaste (b).....	82
6.4	Comparación de Resultados	82



6.4.1	Plaquita DCMT 11T308-F2 HX de SECO. Cara de Desprendimiento	83
6.4.2	Plaquita DCMT 11T308-UM 1115 de SandVik. Cara de Desprendimiento	87
6.4.3	Plaquita DCMT 11T308-UM 1115 de SandVik. Cara de Incidencia.....	91
7	Conclusiones.....	95
7.1	Conclusiones generales	95
7.2	Conclusiones particulares.....	96
7.3	Ventajas e Inconvenientes.....	96
8	Referencias Bibliográficas.....	99
9	Anexos	103
9.1	Anexo I. Código correspondiente a la APP de MatLab para el procesamiento de imágenes digital de las caras de desprendimiento e incidencia.....	103

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Aplicaciones de aleaciones ligeras.....	16
Figura 1.2 - Mecanizado en seco.	17
Figura 2.1 - Materiales posibles para la formación de distintas aleaciones de aluminio. [8]	22
Figura 2.2 - Denominación de aleación del aluminio por el material secundario.....	22
Figura 2.3 - Sufijos usados para denominar aleaciones de aluminio.	23
Figura 3.1 - Fenómenos de desgaste de una herramienta de corte [26].	29
Figura 3.2 - Principales mecanismos de desgaste de una herramienta en mecanizado.....	29
Figura 3.3 - Parámetros geométricos de desgaste en una herramienta de corte [27].	30
Figura 3.4 - Desgaste en incidencia [28].	31
Figura 3.5 - Cráter en la herramienta [28].	31
Figura 3.6 - Fenómeno de filo recrecido (BUE) [28].	32
Figura 3.7 - Clasificación de la Integridad Superficial	33
Figura 4.1 - Valor en matriz de la intensidad de los píxeles de una imagen en blanco y negro.....	36
Figura 4.2 - Imagen original y resultantes tras aplicar filtros Laplaciano y Sobel respectivamente.	37
Figura 4.3 - Uso de procesamiento de imágenes para visualizar distintos cortes de un cerebro humano [30].	38
Figura 4.4 - Procesamiento de la imagen de la cara de incidencia de una plaquita. a) Imagen sin alterar. b) Imagen procesada. c) Selección de la zona de interés. d) Imagen recortada [34].	40
Figura 5.1 - Metodología experimental empleada.	42
Figura 5.2 - Parámetros geométricos de la plaquita usada.	44
Figura 5.3 - Identificador en catálogo SECO.	45
Figura 5.4 - Identificador en catálogo SandVik.	45
Figura 5.5 - Comparación esquemática de los dos principales diseños de microscopios estereoscópicos.	47

Figura 5.6 - Imagen del microscopio ZEISS Discovery 12 con las partes a destacar señalizadas.	48
Figura 5.7 - Impresora 3D RAISE3D E2	49
Figura 5.8 - Base del soporte para el microscopio en diferentes vistas dentro del programa SOLIDWORKS.....	50
Figura 5.9 - Imágenes de la base del soporte del microscopio procesado por fabricación aditiva.	50
Figura 5.10 - Cabeza del soporte para el microscopio (cara de desprendimiento) en diferentes vistas dentro del programa SOLIDWORKS.	51
Figura 5.11 - Imágenes de la cabeza del soporte del microscopio (cara de desprendimiento) procesado por fabricación aditiva.	51
Figura 5.12 - Cabeza del soporte para el microscopio (cara de incidencia) en diferentes vistas dentro del programa SOLIDWORKS.	52
Figura 5.13 - Imágenes de la cabeza del soporte del microscopio (cara de incidencia) procesado por fabricación aditiva.....	52
Figura 5.14 - Portaherramientas creados para estudiar las caras de desprendimiento (izquierda) e incidencia (derecha) con mecanizado CNC.....	53
Figura 5.15 - Resultado de la unión de los elementos de sujeción.	53
Figura 5.16 - Montaje de la sujeción de la herramienta para el estudio en el microscopio.	54
Figura 5.17 - Compartimentos de los bloques patrón con sus medidas y su tolerancia.....	56
Figura 5.18 - Imagen del bloque patrón de 1.47 mm tomada y medida desde el microscopio ZEISS Discovery V12.....	56
Figura 5.19 - Imagen del bloque patrón de 1.49 mm tomada y medida desde el microscopio ZEISS Discovery V12.....	57
Figura 5.20 - Interfaz del software ZEN CORE v.5.....	58
Figura 5.21 - Función del software para capturar imágenes EDF.....	58
Figura 5.22 - Medición del desgaste de incidencia de una plaquita desde el software ZEN CORE v.5.	59
Figura 5.23 - Selección de un área específica en la imagen de la cara.....	62
Figura 5.24 - Matriz RGB de una imagen a color.	62

Figura 5.25 - Imagen de la cara de desprendimiento en escala de grises.....	63
Figura 5.26 - Ajuste del contraste de la imagen para conseguir un espectro del histograma más ancho.....	63
Figura 5.27 - Imagen de la cara de desprendimiento (a) y de incidencia (b) en escala binaria.	64
Figura 5.28 - Imagen de la cara de desprendimiento (a) y la cara de incidencia (b) tras realizar un ajuste morfológico y limpiar partículas pequeñas.....	65
Figura 5.29 - Numeración de las entidades de la imagen binarizada para la cara de desprendimiento (a) y la cara de incidencia (b).	66
Figura 5.30 - Imagen de la cara de desprendimiento (a) y cara de incidencia (b) binarizada con las entidades enmarcadas en "Bounding Boxes".....	66
Figura 5.31 - Resultados recogidos en MatLab de diferentes parámetros de las entidades.	67
Figura 5.32 - Interfaz general de la App.....	68
Figura 5.33 - Zonas de división de la interfaz de la App.	70
Figura 5.34 - Componentes de selección y ajustes de la imagen.	71
Figura 5.35 - Selección de aumentos y relación.	72
Figura 5.36 - Deslizadera de ajuste de contraste y botones de binarizar y deshacer binarizado.	72
Figura 5.37 - Apartado de cálculo de superficie afectada por desgaste.	73
Figura 5.38 - Deslizadera para el ajuste morfológico y botón para observar el número de entidades de la imagen.....	73
Figura 5.39 - Botón de cálculo de la cara de desprendimiento.	74
Figura 5.40 - Representación de los ejes mayores y menores en una acumulación de píxeles.....	74
Figura 5.41 - Distintas interpretaciones de eje mayor y eje menor.	75
Figura 5.42 - Muestra de resultados de la cara de desprendimiento.	75
Figura 5.43 - Botones de recortar y deshacer recorte para la cara de incidencia binarizada.	76
Figura 5.44 - Muestra de resultados de la cara de desprendimiento.	76
Figura 6.1 - Imagen tomada con el microscopio ZEISS Discovery V12.	77

Figura 6.2 - Interfaz de ImageJ donde se muestran los datos de la conversión.....	78
Figura 6.3 - Área binarizada del desgaste de la cara de desprendimiento.....	79
Figura 6.4 - Ancho y Profundidad del área de desgaste de la cara de desprendimiento definida por una elipse y sus ejes.....	80
Figura 6.5 - Representación de distintos parámetros geométricos, entre ellos la longitud máxima de desgaste (VBMAX) y la anchura de desgaste (b).	81
Figura 6.6 - Representación del desgaste máximo de incidencia en una herramienta.....	81
Figura 6.7 - Obtención de la altura de desgaste de incidencia (VBMAX) a partir de su "Bounding Box".....	82
Figura 6.8 - Obtención de la anchura de desgaste (b) de incidencia a partir de su "Bounding Box".	82
Figura 6.9 - Imágenes SOM (x20) de la cara de desprendimiento de las plaquitas usadas para mecanizado de aleación de aluminio, con sus respectivos parámetros de corte.	83
Figura 6.10 - Gráfica comparativa de área de desgaste en la cara de desprendimiento de una plaquita DCMT 11T308-F2 HX de SECO.	84
Figura 6.11 - Diferencia entre las áreas afectadas en una cara de desprendimiento a bajas (a) y altas (b) velocidades de avance.....	85
Figura 6.12 - Gráfica comparativa de ancho de desgaste en la cara de desprendimiento de una plaquita DCMT 11T308-F2 HX de SECO.	86
Figura 6.13 - Gráfica comparativa de profundidad de desgaste en la cara de desprendimiento de una plaquita DCMT 11T308-F2 HX de SECO.	87
Figura 6.14 - Imágenes SOM (x20) de la cara de desprendimiento de las plaquitas usadas para mecanizado de aleación de titanio, con sus respectivos parámetros de corte.	88
Figura 6.15 - Gráfica comparativa de área de desgaste en la cara de desprendimiento de una plaquita DCMT 11T308-UM 1115 de SandVik.	89
Figura 6.16 - Diferencia entre las áreas afectadas en una cara de desprendimiento a bajas (a) y altas (b) velocidades de avance.....	89
Figura 6.17 - Gráfica comparativa de anchura de desgaste en la cara de desprendimiento de una plaquita DCMT 11T308-UM 1115 de SandVik.	90

Figura 6.18 - Gráfica comparativa de profundidad de desgaste en la cara de desprendimiento de una plaquita DCMT 11T308-UM 1115 de SandVik.	91
Figura 6.19 - Imágenes SOM (x20) de la cara de incidencia de las plaquitas usadas para mecanizado de aleación de titanio, con sus respectivos parámetros de corte.	92
Figura 6.20 - Gráfica comparativa del ancho máxima de desgaste (VBMAX) en la cara de incidencia de una plaquita DCMT 11T308-UM 1115 de SandVik.	93
Figura 6.21 - Diferencias entre dos caras de incidencia. (a) desgaste progresivo (b) fallo catastrófico de la punta de la plaquita.	93
Figura 6.22 - Gráfica comparativa de la profundidad de desgaste (b) en la cara de incidencia de una plaquita DCMT 11T308-UM 1115 de SandVik.	94
Figura 7.1 - Imágenes tomadas con una iluminación correcta (a) e incorrecta (b), y sus respectivos binarizados.	97

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 - Propiedades del aluminio.	21
Tabla 5.1 - Valores de los parámetros de corte utilizados para los ensayos de la plaquita DCMT 11T308-F2 HX de SECO.	46
Tabla 5.2 - Valores de los parámetros de corte utilizados para los ensayos de la plaquita DCMT 11T308-UM 1115 de SandVik.	46
Tabla 6.1 - Factores de conversión de píxeles a micrómetros.	78
Tabla 6.2 - Datos comparativos correspondientes al área de desgaste en la cara de desprendimiento de una plaquita DCMT 11T308-F2 HX de SECO.	84
Tabla 6.3 - Datos comparativos correspondientes al ancho de desgaste en la cara de desprendimiento de una plaquita DCMT 11T308-F2 HX de SECO.	85
Tabla 6.4 - Datos comparativos correspondientes a la profundidad de desgaste en la cara de desprendimiento de una plaquita DCMT 11T308-F2 HX de SECO.	86
Tabla 6.5 - Datos comparativos correspondientes al área de desgaste en la cara de desprendimiento de una plaquita DCMT 11T308-UM 1115 de SandVik.	88
Tabla 6.6 - Datos comparativos correspondientes al ancho de desgaste en la cara de desprendimiento de una plaquita DCMT 11T308-UM 1115 de SandVik.	90
Tabla 6.7 - Datos comparativos correspondientes a la profundidad de desgaste en la cara de desprendimiento de una plaquita DCMT 11T308-UM 1115 de SandVik.	91
Tabla 6.8 - Datos comparativos correspondientes a la altura máxima de desgaste (VBMAX) en la cara de incidencia de una plaquita DCMT 11T308-UM 1115 de SandVik.	92
Tabla 6.9 - Datos comparativos correspondientes a la anchura máxima de desgaste (b) en la cara de incidencia de una plaquita DCMT 11T308-UM 1115 de SandVik.	94

1 Introducción

1.1 Contexto del Trabajo Fin de Grado

Tradicionalmente las aleaciones ligeras han sido utilizadas en la industria para la fabricación de diversos componentes estructurales en diferentes sectores industriales. Son llamadas aleaciones ligeras por su relación de propiedades de resistencia mecánica y peso. La industria aeronáutica es uno de los sectores más importantes donde el factor de las propiedades de dichas aleaciones es crítico desde el punto de vista de la fiabilidad, por lo que el diseño y fabricación de componentes están sometidos a niveles de calidad muy estrictos, con márgenes de tolerancia mínimos (Figura 1.1).



Figura 1.1 - Aplicaciones de aleaciones ligeras.

Para la fabricación de este tipo de componentes, es necesario aplicar una serie de procesos de conformado del metal, siendo el más destacado el conocido como mecanizado. El mecanizado es un proceso de fabricación realizado en una pieza de materia prima, para darle forma y tamaño final deseados retirando material sobrante de forma controlada, principalmente con operaciones de torneado, fresado y taladrado.

Actualmente, motivaciones económicas y medioambientales hacen del mecanizado en seco (Figura 1.2), realizado en ausencia de fluidos de corte, uno de los procesos con mayor interés, a pesar de que sus agresivas condiciones de corte pueden afectar a la integridad estructural de las piezas mecanizadas debido a las altas temperaturas que se alcanzan, produciendo fenómenos de

adherencia y abrasión de material a la herramienta de corte, dificultando así la evacuación de la viruta. Por otro lado, también influyen en las desviaciones geométricas de la pieza que se está mecanizando [1,2].



Figura 1.2 - Mecanizado en seco.

Entre los factores más importantes a considerar en el análisis y mejora del rendimiento de los procesos de mecanizado se encuentra el desgaste de la herramienta de corte. Dicho desgaste afecta de forma trascendental a la vida útil de la herramienta, reduciendo el rendimiento económico y afectando al rendimiento funcional del proceso, pudiendo llegar a generar piezas que no cumplan los requisitos de calidad exigidos.

Particularizando para el caso de componentes estructurales de aeronaves, las exigencias de fiabilidad de estas piezas son muy elevadas, por lo que sus requisitos de calidad son altamente exigentes. Si esto se une al uso de técnicas con bajo impacto medioambiental, como es el caso del mecanizado en seco, la monitorización del desgaste de la herramienta se convierte en un factor clave para lograr un equilibrado y mejora de este tipo de procesos, a todos los niveles (funcional, económico, energético y medioambiental).

Este es el contexto actual en el cual se sitúa el presente Trabajo de Fin de Grado, el cual se enfoca en las aleaciones ligeras Ti6Al4V de la familia del titanio, y UNS A97075 de la familia del aluminio, empleadas en la industria aeronáutica. Se ha procedido a estudiar formas de mejora de la eficiencia de los procesos de mecanizado para estas aleaciones de cara a reducir el impacto ambiental, como también de optimizar la economía de la herramienta. Dentro de este contexto se encuentra trabajando el grupo de investigación TEP933 “Ingeniería de Fabricación” de la Universidad de Málaga, en el proyecto de investigación PID2021-125988OBI00, por título “SISTEMA EXPERTO PARA LA MEJORA DE LA INTEGRIDAD SUPERFICIAL EN EL MECANIZADO SOSTENIBLE DE ALEACIONES LIGERAS”, dentro del programa “Proyectos de Generación de Conocimiento” del “Programa Estatal

para Impulsar la Investigación Científico-Técnica y su Transferencia del Plan Estatal de Investigación Científica, Técnica y de Innovación 2021-2023”.

1.2 Objetivos del Trabajo

El objetivo del presente Trabajo de Fin de Grado es desarrollar una metodología experimental que permita automatizar el proceso de medida del desgaste de la herramienta de corte, en operaciones de mecanizado en seco de aleaciones ligeras de uso aeronáutico, mediante la aplicación de técnicas de microscopía óptica estereoscópica (SOM), junto con la utilización de software para programar una inteligencia artificial capaz de procesar digitalmente la imagen obtenida anteriormente y realizar la medida de ciertos parámetros geométricos asociados a dicho desgaste, tales como el área, el ancho y la orientación del fenómeno de abrasión o adherencia de la cara de desprendimiento de la plaquita, como la longitud de medida del desgaste de incidencia, entre otros. La metodología será de aplicación en el mecanizado en seco de distintas aleaciones ligeras de uso aeronáutico, tales como las aleaciones de aluminio UNS A97075, como la aleación de titanio Ti6Al4V.

Para ello se ha llevado a cabo el diseño y elaboración por fabricación aditiva de un soporte en base a la estructura del microscopio ZEISS Discovery V12 que ayuda al operario a simplificar el proceso de medición analógico sobre el microscopio y agiliza el trabajo, acortando el tiempo que se emplearía si se realizara de manera manual.

A su vez, se realizará una verificación y puesta a punto inicial del microscopio, mediante la aplicación de técnicas metrológicas. Se desarrollará una guía rápida para su uso en la medida del desgaste de herramientas de corte, y se detallarán ciertos aspectos del sistema de software que emplea.

Por último, se han implementado un conjunto de operaciones que permitan automatizar la captura de imágenes y el proceso de medida de parámetros de desgaste mediante el uso de un complemento de procesado de imágenes. Para que esto sea posible se ha empleado el software de MatLab para el procesamiento digital que requieren las imágenes para obtener lograr mediciones automáticas de los parámetros de desgaste de las plaquitas [3].

Este campo de investigación posee una componente experimental de gran magnitud, es por ello que se dan algunos objetivos particulares, a parte del motivo principal ya mencionado. Uno de los objetivos del presente trabajo es servir como referencia de un modo u otro para facilitar futuras investigaciones sobre temas relacionados. Del mismo modo que se han tomado como referencia metodologías aplicadas por miembros de grupos de investigación de ámbito internacional, adaptando la misma al objetivo principal a llevar a cabo en este trabajo.

1.3 Estructura de la memoria

La presente memoria está organizada en diferentes capítulos, cada uno de los cuales estará enfocado en abordar aspectos específicos relacionados con la morfología del desgaste de las caras de desprendimiento e incidencia de las plaquitas usadas para trabajar con las aleaciones ligeras UNS A97075 y Ti6Al4V, así como en la aplicación de procesamiento de imágenes digitales para la obtención de parámetros de medición de las plaquitas de manera automatizada. Cada capítulo de la memoria se estructura de forma coherente, proporcionando un enfoque completo del tema a tratar. Esta división de capítulos permite una presentación ordenada de manera clara y concisa.

En este primer capítulo se contextualiza el desarrollo de este Trabajo de Fin de Grado y sus objetivos a cumplir. Por otro lado, se expone las motivaciones por las que se lleva a cabo dicha investigación, que consiste en la aplicación del mecanizado en seco y una inteligencia artificial para el estudio de desgaste de plaquitas que trabajan las aleaciones ligeras ya mencionadas anteriormente.

El segundo capítulo se centra en el aprendizaje de las propiedades básicas de las aleaciones ligeras aeronáuticas estudiadas en este proyecto. El tema principal que abarca este capítulo es comprender los distintos aspectos de los principales metales que constituyen dichas aleaciones, así como tratar de realizar la clasificación entre tipos de aleaciones, y los diferentes usos que se les da en diferentes campos de la industria. Por último, se hace hincapié en el uso de la industria aeronáutica, se señalan las series de aleaciones más usadas y el tipo de componentes que se conforman, correspondiente al campo.

El tercer capítulo está enfocado al establecimiento del estado del arte del desgaste de las piezas en mecanizado en seco. Previamente se habla de las consecuencias a nivel medioambientales del uso de lubricantes para procesos de mecanizado, como también de la evolución en la historia de dicho uso y la fuerte consciencia plasmada en los cambios de normativas que empujan a la sociedad a realizar un cambio en los procesos. Se habla también de los aspectos teóricos fundamentales que engloban el desgaste de una pieza por mecanizado, recogiendo distintos factores causantes del desgaste, como además una identificación de los principales tipos de desgastes conocidos. Por último, se matiza la importancia de la integridad superficial de las herramientas de corte para mantener unos márgenes de calidad excepcionales a la hora de producir en masa.

El cuarto capítulo recoge información sobre los fundamentos del proceso digital de imágenes con el uso de distintos softwares y aplicaciones en la industria.

El quinto capítulo, que es de gran importancia, trata la metodología experimental de este trabajo. Se muestran los datos de partida, se explican los procedimientos llevados desde el manejo del microscopio hasta el procesamiento de imágenes. Se detalla el uso del algoritmo a través de imágenes y terminología del software de MatLab

El sexto capítulo se muestran los resultados obtenidos con la metodología empleada. Se muestran los parámetros geométricos mencionados sobre desgaste de plaquitas, apoyándolo con gráficas y

comparativas entre mediciones realizadas con el algoritmo y metodologías no automatizadas. Con ello se pretende validar la nueva metodología implementada.

Para acabar, se realiza un séptimo capítulo donde se sacan las conclusiones generales del trabajo, como también algunas particulares englobadas al tema, comentando ventajas y desventajas, como también limitaciones del estudio y áreas para investigaciones futuras, con el fin de mejorar el trabajo realizado.

2 Aleaciones Ligeras y sus usos en la aeronáutica

Actualmente la industria aeronáutica está centrada en la consecución de la sostenibilidad y la eficiencia energética como uno de sus principales objetivos. Entre otros, se establecieron objetivos de la industria para lograr la disminución de emisiones de gases nocivos, y lograr un diseño y fabricación que consiga que las piezas sean reciclables. En este marco se están desarrollando nuevos materiales, técnicas de diseño y procesos de fabricación y montaje. Por tanto, los materiales utilizados en la fabricación de aviones juegan un papel muy importante para lograr dichos objetivos.

Las aleaciones de aluminio forjado y fundido se utilizan en la fabricación de una amplia gama de piezas aeronáuticas. Las aleaciones fundidas son generalmente más económicas, pero presentan propiedades mecánicas inferiores a las aleaciones forjadas, debido a la falta de procesamiento de deformación. Por tanto, se utilizan para fabricar componentes no críticos, como poleas, conductos, guías de ondas o cuerpos de válvula hidráulicas. Por otro lado, se prefieren aleaciones de aluminio forjado para fabricar componentes estructurales del fuselaje.

Las aleaciones de titanio exhiben propiedades excepcionales que las convierten en una buena opción para aplicaciones aeronáuticas. Poseen baja densidad, alta relación resistencia-peso y una excelente resistencia a la corrosión a altas temperaturas, ideal para fabricar piezas en condiciones ambientales extremas (álabes de turbinas y cámaras de combustión, entre otros).

2.1 Aluminio y sus propiedades

El aluminio es un metal de aspecto blanquecino brillante, también conocido como elemento químico, de símbolo Al [4]. Se trata de un metal no ferromagnético, ligero y abundante en la corteza terrestre. Presenta un punto de fusión relativamente bajo, además de ser blando y maleable, y es un excelente conductor térmico y eléctrico (Tabla 2.1).

Tabla 2.1 - Propiedades del aluminio.

Símbolo	Al
Número atómico	13
Peso atómico	26,98
Peso específico	2,699
Conductividad eléctrica a 20°C	34,6 m/Ohm mm ²
Resistividad eléctrica a 20°C	2,655 microhms cm ² /cm
Conductividad calorífica a 0°C	0,53 cal/cm X S °C
Punto de fusión	660 °C
Módulo de Elasticidad	7200 kg/mm ²
Resistencia a tracción fundido	9-12 kg/mm ²
Dureza fundido	24-32 HB
Alargamiento fundido	18-25%
Recocido	30-45%

El aluminio posee una densidad aproximada de 2.7 g/cm³ [5]. Esta característica lo hace ideal para aplicaciones donde la reducción de peso es crucial, como en la industria aeroespacial y de transporte [6]. La capa de óxido natural que se forma en la superficie del aluminio confiere resistencia a la corrosión. Esta característica lo hace adecuado para su uso en ambientes húmedos o corrosivos. El aluminio es maleable y dúctil, lo que significa que puede ser conformado en diversas formas sin perder sus propiedades mecánicas. Esto facilita su procesamiento en láminas delgadas, perfiles y otras formas para una amplia variedad de aplicaciones [7].

Pese a ser uno de los elementos más abundantes de la corteza terrestre, componiéndose un 8% de esta, es uno de los metales más caros de obtener. Por ello es altamente reciclable y su proceso de reciclaje consume menos energía en comparación con la producción primaria. Esto lo convierte en un material sostenible y respetuoso con el medio ambiente [8]. El aluminio tiene un aspecto plateado brillante que puede ser pulido para lograr un acabado reflectante. Esto lo hace atractivo estéticamente y es utilizado en productos que requieren una apariencia visual atractiva.

2.2 Aleaciones de Aluminio

A pesar de sus muchas ventajas, es importante tener en cuenta que el aluminio puro no puede ser lo suficientemente resistente para algunas aplicaciones, por lo que se suelen utilizar aleaciones de aluminio para mejorar sus propiedades mecánicas según las necesidades específicas de cada aplicación [5].

Las aleaciones de aluminio son combinaciones de aluminio con otros elementos (Figura 2.1), como cobre (Cu), zinc (Zn), magnesio (Mn), silicio (Si), manganeso (Mn) y otros. Estas aleaciones son ampliamente utilizadas en diversas industrias debido a su versatilidad y la capacidad de ajustar sus propiedades para satisfacer las demandas específicas de diferentes aplicaciones.

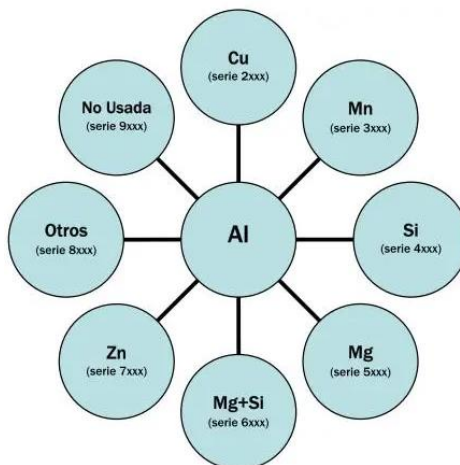


Figura 2.1 - Materiales posibles para la formación de distintas aleaciones de aluminio. [8]

Las aleaciones de aluminio se producen mediante la fundición y luego se pueden conformar mediante procesos como la extrusión, laminación y forja.

Las aleaciones de aluminio se clasifican en series (Figura 2.2 y Figura 2.3), siendo las más comunes las series 1000, 2000, 3000, 5000, 6000, 7000 y 8000. Cada serie tiene sus propias características y aplicaciones específicas [5].

Familia de aluminio	Designación
Aluminio puro, 99% mínimo	1xxx
Aluminio-Cobre	2xxx
Aluminio-Manganeso	3xxx
Aluminio-Silicio	4xxx
Aluminio-Magnesio	5xxx
Aluminio-Magnesio-Silicio	6xxx
Aluminio-Zinc	7xxx
Otros elementos, Al-Sn, etc.	8xxx

Figura 2.2 - Denominación de aleación del aluminio por el material secundario.

Suffix letter (indicates basic treatment or condition)	First suffix digit (indicates secondary treatment)	Second suffix digit (indicates residual hardening)
F, as fabricated		
O, annealed/wrought products only		
H, cold-worked/work-hardened	1, cold-worked only 2, cold-worked and partially annealed 3, cold-worked and stabilized	2, 1/4 hard 4, 1/2 hard 6, 3/4 hard 8, hard 9, extra hard
W, solution heat-treated		
T, heat-treated/stable	1, partial solution plus natural aging 2, annealed cast products only 3, solution plus cold work 4, solution plus natural aging 5, artificially aged only 6, solution plus artificial aging 7, solution plus stabilizing 8, solution plus cold work and artificial aging 9, solution plus artificial, aging and cold work	

*Added as suffix letters and digits to the alloy number.

Figura 2.3 - Sufijos usados para denominar aleaciones de aluminio.

Serie 1000: Contiene un 99% o más de aluminio puro. Son no aleadas y generalmente se utilizan en aplicaciones donde la resistencia a la corrosión es más importante que la resistencia mecánica, como en utensilios de cocina y productos químicos.

Serie 2000: Contiene cobre como principal elemento de aleación. Estas aleaciones tienen una buena resistencia a la corrosión y son conocidas por su resistencia a la fatiga. Se utilizan en aplicaciones aeroespaciales y militares.

Serie 3000: Contiene principalmente manganeso. Son resistentes a la corrosión y se utilizan en aplicaciones que requieren resistencia moderada, como componentes de la industria de la construcción y la fabricación de envases.

Serie 5000: Contiene magnesio como principal elemento de aleación. Estas aleaciones tienen una buena resistencia a la corrosión y son utilizadas en aplicaciones marinas y de procesamiento químico.

Serie 6000: Contiene silicio y magnesio. Son aleaciones versátiles utilizadas en una amplia gama de aplicaciones, incluyendo construcción, automoción y estructuras de ingeniería.

Serie 7000: Contiene zinc como elemento principal de aleación. Estas aleaciones tienen una alta resistencia y son utilizadas en aplicaciones aeroespaciales y estructurales donde se requiere una gran resistencia mecánica.

Serie 8000: Contiene varios elementos, como hierro, litio y otros. Se utilizan en aplicaciones especializadas, como la producción de aluminio-litio para aplicaciones aeroespaciales de alta tecnología.

2.3 Titanio y sus propiedades

El titanio es un metal de transición de color plateado y posee un brillo característico. Posee baja densidad y gran dureza. Es muy resistente a la corrosión por agua y cloro [9]. El titanio es el elemento metálico que posee la mayor proporción dureza-densidad [10]. Es un metal fuerte con baja densidad y alta ductilidad. Su punto de fusión es alto, llegando a los 1668°C, lo que lo hace útil como metal refractario. Es paramagnético y presenta baja conductividad eléctrica y térmica.

El titanio presenta una densidad un 60% mayor que la del aluminio, pero es el doble de fuerte que una aleación de aluminio común 6061-T6 [11]. Algunas aleaciones de titanio consiguen una tensión de rotura sobre los 1400MPa [12]. Las estructuras de titanio tienen un límite de fatiga que garantiza la longevidad de sus aplicaciones.

Es un metal alotrópico dimórfico. Su estructura cristalina en estado alfa tiene forma hexagonal y se torna en una forma cúbica centrada en el cuerpo al pasar en estado beta. Siempre aparece naturalmente unido a otros elementos. Es el noveno elemento y el séptimo metal más abundante en la corteza terrestre, suponiendo un 0,63% de su masa [11].

2.4 Aleaciones de Titanio

El titanio puede formar aleaciones con el hierro, el aluminio, el vanadio y el molibdeno entre otros elementos, idóneas por sus propiedades de ligereza y resistencia para la construcción de maquinaria para aplicaciones aeroespaciales —motores de reacción, misiles y naves espaciales—, militares, industriales —almacenamiento y transporte de productos químicos y petroquímicos, y plantas de desalinización—, en la automoción, para prótesis médicas e implantes ortopédicos, instrumentos e implantes dentales, aparatos deportivos, joyería o teléfonos móviles.

Las aleaciones de Ti destacan entre las aleaciones metálicas estructurales por su baja densidad (4,42-4,76 g cm⁻³, ~45% inferior que la de los aceros), alta resistencia específica (226-282 kN m kg⁻¹) y excepcionalmente alta resistencia frente a la corrosión en la mayoría de los medios acuosos neutros y ácidos. Además, son aptas para aplicaciones hasta una temperatura máxima de servicio de 600°C.

El Ti puro existe en dos formas alotrópicas: fase α , hexagonal compacta (<882°C), y fase β , cúbica centrada en el cuerpo (>882°C). Los elementos aleantes en aleaciones de Ti se clasifican en α -estabilizadores (Al, O, N, C), β -isomorfos (V, Mo, Nb, Ta), β -eutectoides (Fe, Mn, Cr, Ni, Cu, Si, H) y neutros (Zr, Sn) en función de su efecto sobre los rangos de estabilidad de las fases α y β . Asimismo,

en función de las fases presentes, las aleaciones se clasifican en α , $\alpha+\beta$ y β , con una utilización aproximada en el mercado del 26, 70 y 4% respectivamente. La aleación Ti-6Al-4V, siendo la más común de las aleaciones $\alpha+\beta$, ocupa un 56% del mercado total del Ti debido a un equilibrio excepcional entre resistencia mecánica, ductilidad, resistencia a fatiga y tenacidad de fractura y que se mantiene hasta 300°C.

Las propiedades mecánicas de las aleaciones $\alpha+\beta$ tienen una relación compleja con el contenido de soluto β -isomorfo y el tipo de tratamiento térmico (temple, recocido, revenido o envejecimiento). Como se verá en esta sección, las microestructuras resultantes (y por tanto las propiedades mecánicas) vienen determinadas por la transformación de fase β y que a su vez depende de la velocidad de enfriamiento [13].

Las aleaciones de titanio, especialmente las de menor grado, se pueden soldar con gases inertes (TIG, MIG) y forjar en caliente. Se pueden mecanizar por arranque de viruta, pero debes prestar mucha atención al amarrado de la pieza, ya que el titanio es más elástico que el acero, y tiene a doblarse al someterlo a las fuerzas de corte. Es mal conductor del calor, y su mecanizado produce altas temperaturas, así que debes refrigerarlo con mucho caudal y bien filtrado. También lo puedes rectificar, pero las muelas deben estar bien reavivadas, ya que tiende a embotarlas. También debes prestar atención al refrigerado [14].

2.5 Aplicación de las aleaciones para uso aeronáutico

ALUMINIO

El aluminio es un material clave en la industria aeronáutica debido a su combinación de propiedades ligeras, resistentes y duraderas.

Las series 2000 y 7000 de aluminio son las que reúnen los requisitos y exigencias necesarias para la construcción de componentes aeronáuticos [15]. El aluminio, especialmente aleaciones de la serie 7000, se utiliza ampliamente en la construcción del fuselaje de aeronaves. Proporciona una combinación óptima de resistencia y peso ligero, lo que contribuye a mejorar la eficiencia y el rendimiento general de la aeronave.

Las alas y las superficies de control, como los alerones y las superficies de dirección, a menudo están fabricadas con aleaciones de aluminio debido a su resistencia y durabilidad [16]. En el interior de la cabina, se utilizan aleaciones de aluminio para paneles, revestimientos y otras estructuras. El aluminio es apreciado por su resistencia, peso ligero y capacidad para resistir las condiciones del entorno interior de la aeronave. Paneles exteriores y recubrimientos, como láminas y placas de aluminio, son comunes para proteger y mejorar la aerodinámica de la aeronave. Aleaciones de aluminio resistentes al calor se utilizan en las carcasas de motores de aeronaves para resistir las altas temperaturas generadas durante la operación del motor. Componentes como tubos y conductos que transportan fluidos en el sistema del motor pueden estar hechos de aleaciones de

aluminio por su peso ligero y resistencia a la corrosión. Los largueros y montantes, componentes clave en la estructura interna de una aeronave, a menudo están fabricados con aleaciones de aluminio para brindar resistencia estructural sin aumentar significativamente el peso de la aeronave [6].

Cuanto más puro, será más liviano y en algunas piezas de aviación, tendrá una alta resistencia gracias al oxígeno que lo compone. Es conocido como "Aluminio oxigenado o Aero Aluminio".

TITANIO

Gracias a su alta proporción de tensión de ruptura por su densidad, alta resistencia a la corrosión, resistencia a la fatiga y la capacidad de soportar temperaturas moderadamente altas sin deformarse, las aleaciones de titanio habitualmente son empleadas en aeronaves, armadura de vehículos, barcos, naves espaciales y misiles.

Para estas aplicaciones se emplean aleaciones de titanio con aluminio, circonio, níquel y vanadio, entre otros elementos [17]. Casi dos tercios de todo el metal de titanio producido se emplea en motores y estructuras de aeronaves, pero también se emplea en otros componentes diversos como partes estructurales críticas, trenes de aterrizaje, conductos de escape y sistemas hidráulicos. Gracias a su alta resistencia a corrosión por agua de mar, el titanio se emplea en la fabricación de árboles de transmisión y cabos, en intercambiadores de calor de las plantas desalinizadoras, en refrigeradores de agua marina en acuarios, sedales y anzuelos, y en los cuchillos de los buceadores. También se emplea para fabricar carcasas y otros componentes de aparatos de vigilancia y observación marina de uso científico y militar. La antigua Unión Soviética desarrolló técnicas de construcción de submarinos con cascos hechos de aleación de titanio, y para la forja de titanio en tubos de vacío.

La contrapartida es que el mecanizado de esas aleaciones resulta costoso.

3 Mecanizado en seco de aleaciones aeronáuticas

3.1 Impacto medioambiental y económico del uso de fluidos de corte

Tradicionalmente el uso de los lubricantes y refrigerantes se han usado para reducir los efectos negativos del impacto térmico y de rozamiento generado en el mecanizado [18].

Por un lado, el efecto lubricante reduce el rozamiento entre la cara de desprendimiento y la viruta, atenuando el desgaste por abrasión. Por otro, poseen un efecto refrigerante, favoreciendo la evacuación de la viruta, y por tanto la evacuación del calor de la zona de corte. Este efecto aumenta significativamente la vida de la herramienta, reduciendo el desgaste por adhesión y difusión. Además, el uso de lubricantes protege contra la corrosión tanto a la pieza mecanizada como a la herramienta de corte, y previenen la aparición del filo recrecido (BUE) [19]. Existen numerosos

fluidos de corte en el mercado (aceites, emulsiones, soluciones), siendo de carácter genérico el uso de la “taladrina”, un producto compuesto por agua y aceites [20].

A pesar de todas las ventajas que presentan los fluidos de corte, también presentan inconvenientes a nivel económico, medioambiental y de salud laboral [21]. Por lo general el uso continuo de fluidos de corte da lugar a la pérdida de sus propiedades físicas y químicas, y sufren alteraciones en sus características, convirtiéndose en un residuo peligroso que produce graves daños al medio ambiente, pudiendo provocar desastres entre la fauna piscícola debido a su toxicidad.

En los últimos años se ha producido un incremento de la preocupación social que ha dado lugar a un refuerzo en las normativas que limitan su uso y obligan a su reciclaje. Esto hace que se dispare el coste del uso de fluidos de corte, y por ello la tendencia a emplear nuevas técnicas para disminuir el uso (MQL) [22] o incluso eliminarlo por completo están en auge.

La eliminación completa de su uso da lugar a lo que se denomina como mecanizado en seco [23]. En este tipo de mecanizado las condiciones de corte son altamente agresivas tanto para las piezas como para la herramienta usada. Alcanzar un correcto equilibrio entre la integridad superficial y la vida útil de la herramienta es lo que hoy día se busca.

3.2 Desgaste de la herramienta en mecanizado

Durante el proceso de corte en el mecanizado, la herramienta se encuentra sometida a condiciones muy agresivas. La acción combinada de la elevada temperatura y los esfuerzos mecánicos en la que se condiciona la retirada de material dan lugar a una alteración de la geometría y las propiedades físicas y químicas de la herramienta, originándose el desgaste de la misma. Este factor de desgaste es de suma importancia a la hora de definir la vida de la herramienta de corte, siendo esta el tiempo durante el cual la herramienta es capaz de mantener unos valores máximos de geometría y propiedades respecto a los iniciales, de forma que se obtengan piezas que cumplan los requisitos de calidad impuestos por las especificaciones de diseño.

A su vez, en el desgaste de la herramienta se encuentran implícitos los cuatro aspectos a tener en cuenta en la mejora del rendimiento del mecanizado: funcionales, económicos, medioambientales y energéticos.

Por un lado, el desgaste es consecuente de provocar desviaciones con respecto a las especificaciones de diseño en el producto a obtener, que originan la obtención de productos que no cumplen con unos requisitos de calidad. Por otro lado, el desgaste de la herramienta hace que la energía consumida en el mecanizado aumente, agravando el objetivo de mejorar el rendimiento energético y medioambiental. Finalmente, el aumento del desgaste repercutirá en un aumento de número de herramientas a utilizar, afectando de manera negativa al rendimiento desde el punto de vista económico.

Los factores que influyen en el desgaste de la herramienta son numerosos. En primer lugar, depende del material que se esté mecanizando, además de las propias características de la herramienta de corte. Las condiciones de lubricación son también fundamentales, siendo el mecanizado en seco el que origina unas condiciones más agresivas en este sentido. Por último, los valores utilizados en los parámetros de corte juegan un papel muy importante, en especial la velocidad de corte.

En un proceso de mecanizado en seco, no se cuenta con la acción del refrigerante, por lo que es indispensable determinar parámetros de corte que garanticen el buen desempeño de la herramienta de corte y las dimensiones geométricas finales de la pieza de trabajo. Esto implica tener un mejor conocimiento sobre los tipos de virutas que se producen en un mecanizado en seco, así como como las principales fallas que se presentan en las herramientas de corte para poder alargar la vida de las herramientas por medio de parámetros de corte.

El desgaste puede afectar tanto a las herramientas de corte como a la pieza que se está mecanizando [24]. Este desgaste puede ser progresivo en la mayoría de ocasiones, aunque también puede ser catastrófico debido a ciertas condiciones como alta temperatura, rotura frágil o defecto de la pieza. Los mecanismos de desgaste progresivos se pueden clasificar en desgaste por adhesión, abrasión, difusión, fatiga y corrosión (Figura 3.1 y 3.2). Suelen actuar de forma conjunta y pueden tener mayor o menor peso sobre el desgaste final dependiendo del tiempo de mecanizado y la temperatura de corte [25].

- Desgaste por adhesión: Ocurre cuando hay transferencia de material de la pieza a la herramienta de corte debido a altas temperaturas y presiones. Esto puede llevar a la formación de capas adheridas en la herramienta.
- Desgaste por abrasión: Se produce cuando las virutas duras o partículas abrasivas en el material de la pieza entran en contacto con la herramienta, causando desgaste en los filos de corte.
- Desgaste por fricción: La fricción constante entre la herramienta y la pieza puede causar desgaste en los bordes de corte de la herramienta.
- Desgaste por fatiga: Se produce debido a la carga repetida en la herramienta durante el mecanizado, especialmente en áreas de alto estrés, y puede dar lugar a la formación de grietas.

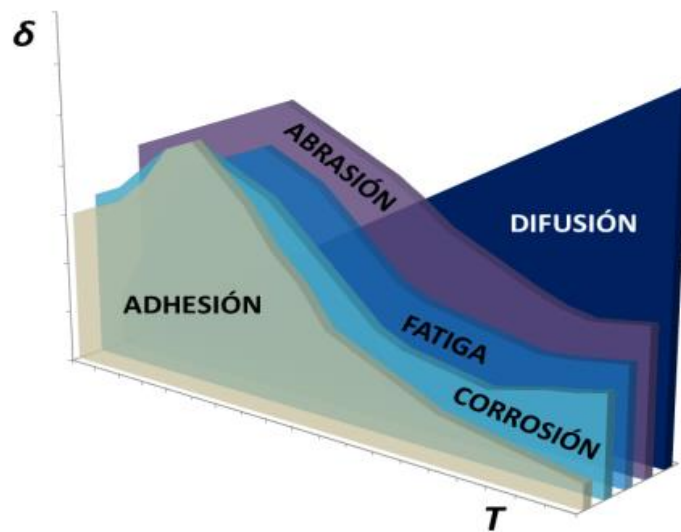


Figura 3.1 - Fenómenos de desgaste de una herramienta de corte [26].

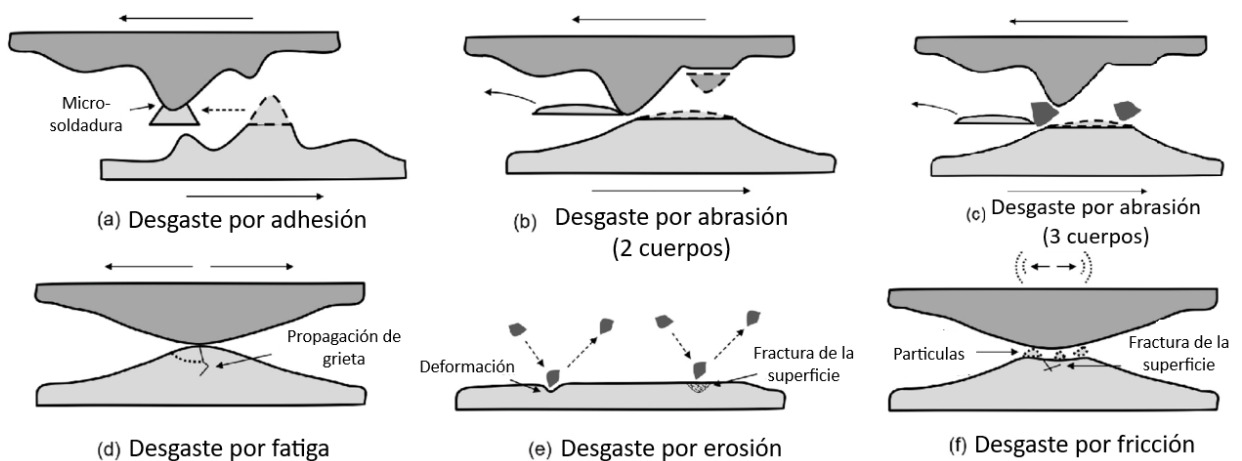


Figura 3.2 - Principales mecanismos de desgaste de una herramienta en mecanizado.

3.3 Proceso de Medida del Desgaste

Además de conocer los mecanismos que dan lugar al desgaste, es necesario conocer las zonas de la herramienta donde tiene lugar (Figura 3.3).

Los parámetros principales que habitualmente se usan para cuantificar el desgaste son: para el desgaste en la cara de incidencia, el ancho medio de la zona de desgaste (VB) o el ancho máximo ($VB_{máx}$). Para el desgaste en desprendimiento se utiliza la profundidad de cráter (KT). También se estudia el desgaste del radio de la herramienta y la formación de filo recocado (BUE), entre otros [27].

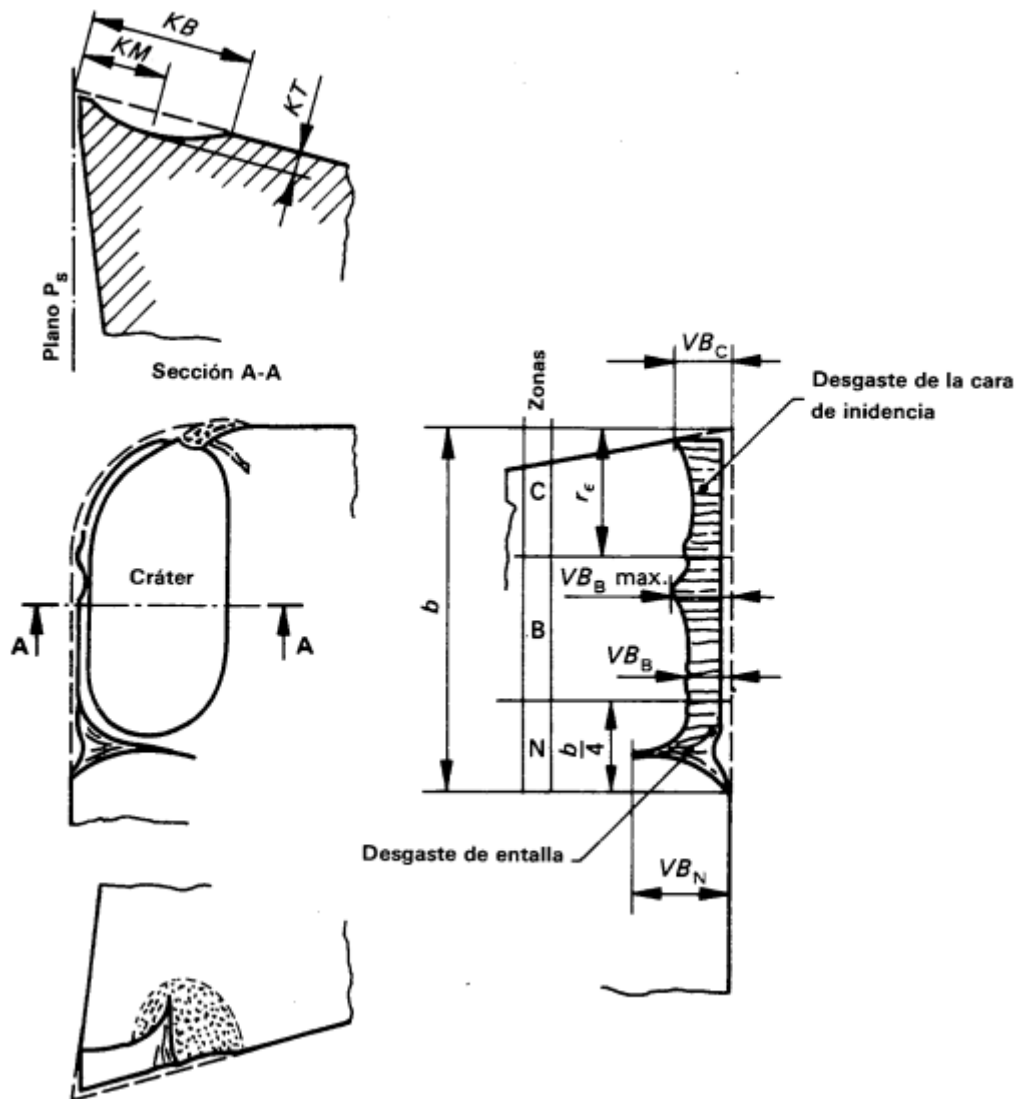


Figura 3.3 - Parámetros geométricos de desgaste en una herramienta de corte [27].

3.3.1 Desgaste en Incidencia

Es un desgaste principalmente abrasivo causado por los elementos duros del material de la pieza. Es el tipo de desgaste más deseable porque confiere a la herramienta una vida útil estable y homogénea. Cuando el desgaste por incidencia es excesivo, se produce un empeoramiento de la calidad superficial y un deterioro de la precisión dimensional debido al cambio de geometría del filo (Figura 3.4) [28].

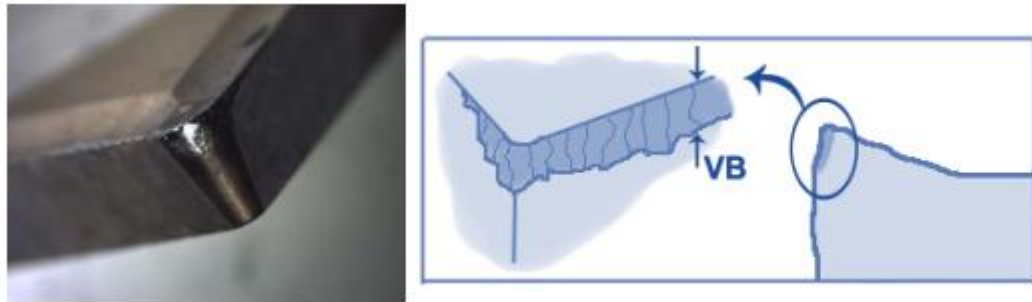


Figura 3.4 - Desgaste en incidencia [28].

3.3.2 Cráteres

Es un desgaste principalmente por adhesión que se localiza en la cara de desprendimiento de la plaquita (Figura 3.5). Se debe a una reacción química entre el material de la pieza y la herramienta, y se ve potenciado por la velocidad de corte. Un desgaste por cráter excesivo puede dar lugar a una incorrecta formación de viruta que cambie las direcciones de la fuerza de corte y, de ese modo, variar la geometría del corte, debilitando el filo y provocando fracturas [28].

Este tipo de desgaste suele darse combinado con el desgaste en incidencia.

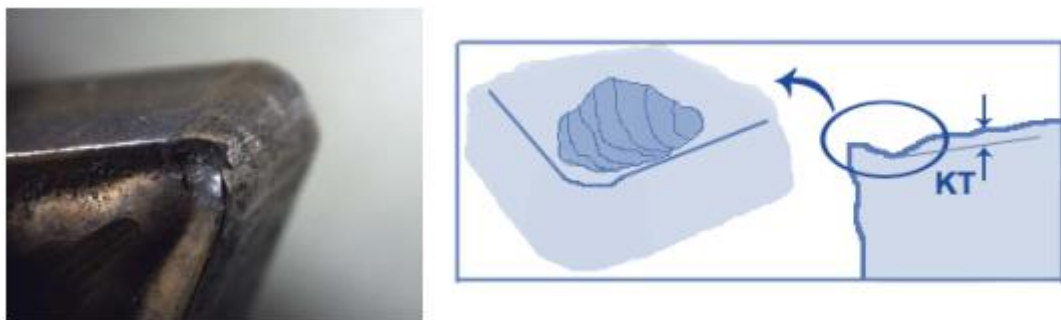


Figura 3.5 - Cráter en la herramienta [28].

3.3.3 Filo recreado (BUE: build-up edge)

Es un desgaste de tipo adhesivo causado por la unión por soldadura de la viruta al filo de la plaquita debido a la presión (Figura 3.6). Suele darse este tipo de desgaste cuando se mecanizan materiales dúctiles, como acero de bajo contenido en carbono, acero inoxidable y aluminio. La formación de filo recreado se acentúa con velocidades de corte bajas, y como todo desgaste afecta a la calidad de acabado superficial de la pieza mecanizada [28].

El material de la viruta se puede adherir al filo de la herramienta o también sobre la superficie de desprendimiento, y ambos fenómenos se consideraban inicialmente como distintas formas de un mismo efecto de adherencia.

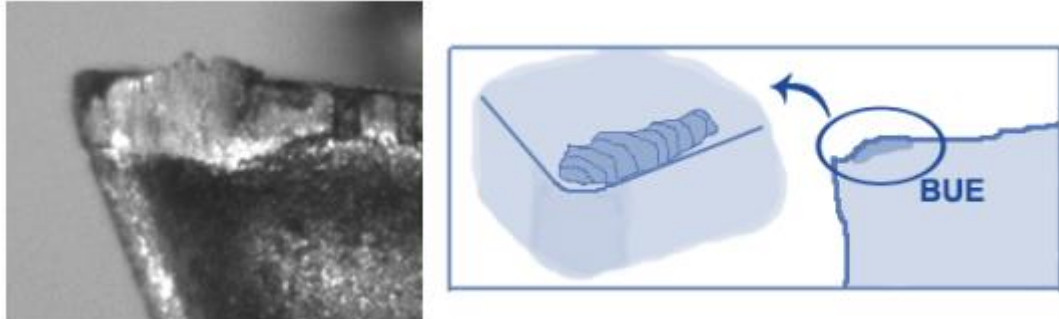


Figura 3.6 - Fenómeno de filo recrecido (BUE) [28].

3.4 Integridad superficial

La integridad superficial en productos se refiere a la condición y calidad de la superficie de un objeto o componente. Es un aspecto crítico en la fabricación de productos y desempeña un papel fundamental en diversas industrias [29].

Para competir en el mercado, todo producto debe cumplir una serie de características y especificaciones técnicas que una pieza mecanizada debe tener para lograr su correcto funcionamiento. La importancia del acabado superficial, la funcionalidad mecánica, resistencia a fatiga o corrosión en la industria aeronáutica es muy comprometida. Es necesario producir componentes de excepcionales exigencias de calidad superficial, con el fin de asegurar un proyecto de tanto coste económico y así garantizar la seguridad del uso de los transportes [30].

De este modo, durante el mecanizado se producen alteraciones de las propiedades de la capa subyacente de la superficie mecanizada que influyen de forma importante en la funcionalidad final de las piezas mecanizadas. Estas alteraciones en la integridad superficial (deformaciones plásticas, fenómenos de recristalización, aparición de tensiones residuales, alteraciones en la dureza, etc.) dependen de las propiedades del material a mecanizar (microestructura, dureza, tratamiento térmico) [25].

Las exigencias impuestas en el sector aeroespacial se evalúan a partir de factores importantes (Figura 3.7):

- Propiedades geométricas de las piezas
 - Desviaciones macrogeométricas (redondez, concentricidad, oscilación radial y total, rectitud, paralelismo, etc.)
 - Desviaciones macrogeométricas (rugosidad superficial y adhesión de partículas)
- Propiedades fisicoquímicas

- Microdureza
- Resistencia a tracción
- Resistencia a corrosión
- Resistencia a Fatiga
- Tensiones residuales

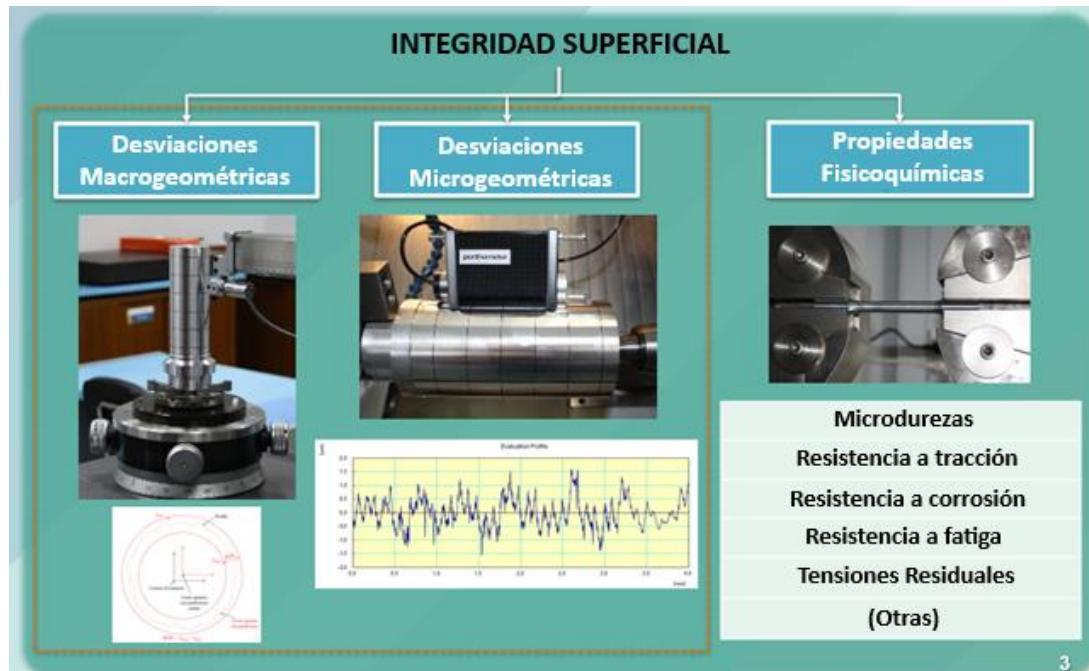


Figura 3.7 - Clasificación de la Integridad Superficial

4 Inteligencia artificial aplicada al proceso digital de imágenes

Se puede decir, por tanto, que, aunque siguen existiendo aspectos por explorar en el mecanizado en seco de estas aleaciones, se tiene un conocimiento bastante amplio del estado del arte en este ámbito. Una de las formas habituales de realizar una transferencia de este conocimiento a la industria es proporcionar una serie de modelos o ecuaciones, de fácil aplicación a nivel industrial, que permitan predecir el comportamiento de las variables de salida del proceso en función de los parámetros de corte, siendo el principal objetivo la mejora del rendimiento del proceso desde diversos puntos de vista (funcional, económico, energético y medioambiental). En este sentido, nuestro grupo de investigación ha realizado distintas aportaciones, usualmente mediante el uso de ecuaciones paramétricas obtenidas por regresión a partir de datos experimental, con el objetivo de predecir parámetros de rugosidad superficial, desgaste, fatiga o desviaciones de forma, en función de los parámetros de corte, para el torneado en seco de aleaciones ligeras. Sin embargo, estos modelos son simplificaciones del comportamiento real y se encuentran acotados a un rango de aplicación concreto, no existiendo modelos de tipo global que tengan en cuenta el mayor número posible de variables de influencia en el proceso, dada la complejidad de su modelización.

No obstante, la gran evolución que han sufrido en los últimos años las técnicas computacionales, aplicadas al campo de la inteligencia artificial, permite desarrollar algoritmos de aprendizaje automático, capaces de ajustar de forma autónoma los parámetros de mecanizado para conseguir un determinado objetivo. Esta generación de algoritmos de aprendizaje forma parte de lo que se denomina “mecanizado inteligente”, que incluye el desarrollo de interacciones con diferentes sistemas (máquinas-herramienta, sensores, controladores, diseños basados en simulación, big data y sistemas de computación en la nube, así como los mencionados algoritmos de control inteligente).

Los algoritmos de aprendizaje automático se pueden dividir en tres categorías, basadas en el sistema de aprendizaje y el tipo de datos de entrada. La primera es aprendizaje supervisado, donde los algoritmos están entrenados para mapear variables de entrada que proporcionen determinadas variables de salida (proporcionadas por expertos humanos). El segundo es el aprendizaje no supervisado, que implica el proceso de desarrollar un modelo o función sin ingresar las salidas conocidas. Este método se utiliza normalmente para encontrar patrones significativos o clasificaciones dentro de un gran conjunto de datos. Por último, está el aprendizaje reforzado, el proceso de aprendizaje a través de una señal de recompensa predefinida que permite a la máquina poder cuantificar su rendimiento. Estos algoritmos intentan realizar dos tareas principales: clasificación o agrupación en clústeres, en que los datos se separan en clases específicas, y regresión, en la que se busca una tendencia o relación continua. Los diferentes métodos utilizados para lograr estas tareas determinarán el tipo de algoritmo utilizado, como máquinas de apoyo vectoriales, redes neuronales artificiales o árboles de decisión, entre otros.

Los algoritmos de aprendizaje automático han sido aplicados ampliamente en procesos de mecanizado. Concretando en operaciones de torneado, su aplicación se ha centrado en la monitorización del estado de la herramienta y en predicciones de rugosidad superficial, mediante el uso de redes neuronales artificiales (ANN, Artificial Neural Networks), algoritmos de regresión de vectores de soporte (SVR, Support Vector Regression) y algoritmos de regresión polinómica [56-60]. Se han analizado otras variables, como la emisión de carbono, la microdureza y las predicciones

del tamaño de grano, utilizando técnicas de árboles de decisión (RF, Random Forest), algoritmos evolutivos (EA, Evolutionary Algorithm) y de aprendizaje multiobjetivo (MOTLBO, Multiobjective teaching learning based optimization). No obstante, no se han encontrado estudios que apliquen estas técnicas a la predicción de las desviaciones de forma o las propiedades físico-químicas de la superficie mecanizada. Existe, por tanto, una necesidad de extender la aplicación de estas técnicas a otras variables de influencia sobre la integridad superficial, así como de generar algoritmos que tengan en cuenta el efecto sinérgico multivariable que caracteriza a los procesos de mecanizado.

Uno de los problemas que tiene la creación y aplicación de algoritmos de aprendizaje automático es la necesidad de recopilar una gran cantidad de datos procedentes de todo tipo de sensores ubicados a lo largo del proceso productivo. Por ello, solo las grandes empresas del sector del mecanizado o los fabricantes de máquinas-herramienta tienen la capacidad para generar este tipo de algoritmos. Sin embargo, las pequeñas y medianas empresas no cuentan con los recursos necesarios para la generación de este tipo de tecnología, lo cual limita la utilización de una herramienta fundamental en la implantación de la industria 4.0 en PYMES del sector del mecanizado.

Con la base de conocimiento generada por el grupo de investigación, así como con todos los datos existentes en la bibliografía, es posible el desarrollo de un sistema experto que pueda ser de utilidad en este sector, teniendo en cuenta las limitaciones y particularidades de estas empresas.

4.1 Concepto de Proceso de filtrado

Hoy en día es bastante común el hecho de encontrarse con distintas técnicas de proceso de imágenes, pues es una técnica de amplia ayuda que posee una gran versatilidad, en muchos artículos científicos, en documentales informativos o por cualquier foro de internet. Este concepto está fuertemente ligado a la inteligencia artificial, ya que se trata de una rama de dicho desarrollo.

El procesamiento de imágenes digitales o filtro de imagen es un conjunto de técnicas englobadas dentro del preprocesamiento de imágenes cuyo objetivo fundamental es obtener, a partir de una imagen origen, otra final cuyo resultado sea más adecuado para una aplicación específica mejorando ciertas características de la misma que posibilite efectuar operaciones del procesado sobre ellas, y así facilitar la búsqueda de resultados. En la adquisición de imágenes digitales, se utilizan dispositivos como cámaras digitales, escáneres, satélites y equipos médicos. Estos dispositivos capturan imágenes del mundo real y las convierten en datos digitales, formados por una matriz de píxeles (Figura 4.1). Cada píxel representa un valor de intensidad o un conjunto de valores de color, dependiendo de si la imagen es en escala de grises o a color. El valor de cada píxel determina su brillo o color, formando una representación digital de la escena capturada.

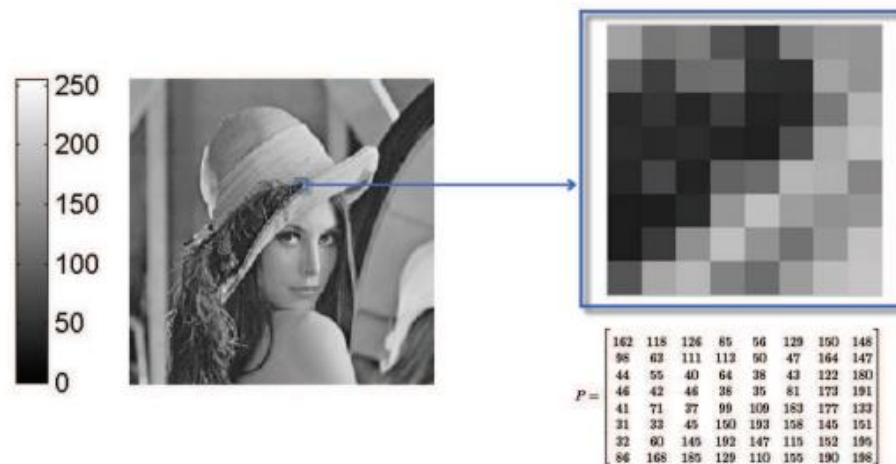


Figura 4.1 - Valor en matriz de la intensidad de los píxeles de una imagen en blanco y negro.

4.2 Diferentes técnicas de procesado

El preprocesamiento es una etapa crucial que prepara las imágenes para su análisis posterior. En esta fase, se aplican técnicas para mejorar la calidad de la imagen, como la eliminación de ruido, la corrección de iluminación y la mejora del contraste. También se realizan rectificaciones geométricas para asegurar que la imagen tenga la forma y tamaño adecuados para su análisis [31].

Una vez preprocesadas, las imágenes pueden ser sometidas a diversas técnicas de procesamiento. Una de las más comunes es el filtrado espacial, que utiliza máscaras o filtros aplicados a la imagen para suavizarla, realzar bordes o eliminar ruido. Por ejemplo, el filtro gaussiano se emplea para suavizado, mientras que el filtro Sobel se usa para la detección de bordes.

Otra técnica fundamental es la transformación de dominio de frecuencia, como la Transformada de Fourier (Figura 4.2). Esta permite analizar las frecuencias presentes en una imagen, lo cual es útil para la eliminación de ruido y la compresión de imágenes. La segmentación, por su parte, divide una imagen en regiones significativas, como objetos o áreas de interés. Métodos como la segmentación por umbral, basada en bordes o en regiones, son esenciales para identificar y aislar elementos importantes dentro de una imagen.



Figura 4.2 - Imagen original y resultantes tras aplicar filtros Laplaciano y Sobel respectivamente.

La morfología matemática es otra técnica relevante en el PDI. Utiliza operaciones como dilatación, erosión, apertura y cierre para procesar estructuras en una imagen binaria, siendo especialmente útil para la manipulación de formas y la eliminación de ruido. El reconocimiento de patrones también juega un papel crucial, implicando la identificación de patrones y objetos dentro de una imagen. Las técnicas de aprendizaje automático y redes neuronales, particularmente las redes neuronales convolucionales (CNN), son muy eficaces para esta tarea, permitiendo avances significativos en el reconocimiento de imágenes.

En resumen, los principales objetivos que persigue una aplicación de filtros pueden ser:

- Suavizar una imagen, reduciendo la cantidad de variaciones de intensidad entre píxeles vecinos.
- Eliminar ruido: eliminar aquellos píxeles cuyo nivel de intensidad es muy diferente al de sus vecinos y cuyo origen puede estar tanto en el proceso de adquisición de la imagen como en el de transmisión.
- Realzar los bordes que se localizan en una imagen.
- Detectar bordes, usando los píxeles donde se produce un cambio brusco en la función intensidad.

4.3 Aplicaciones del procesamiento de imágenes

El procesamiento digital de imágenes (PDI) encuentra aplicaciones en diversos campos debido a su capacidad para manipular, mejorar y analizar imágenes digitales. En medicina, por ejemplo, se utiliza ampliamente en la imagenología médica, donde técnicas como el procesamiento de imágenes de rayos X, resonancias magnéticas (MRI), tomografías computarizadas (CT) y ultrasonidos permiten una mejor visualización de estructuras internas del cuerpo y la detección de anomalías (Figura 4.3). Además, en microscopía digital, el análisis de imágenes microscópicas ayuda a los científicos y médicos a estudiar células y tejidos con gran detalle.

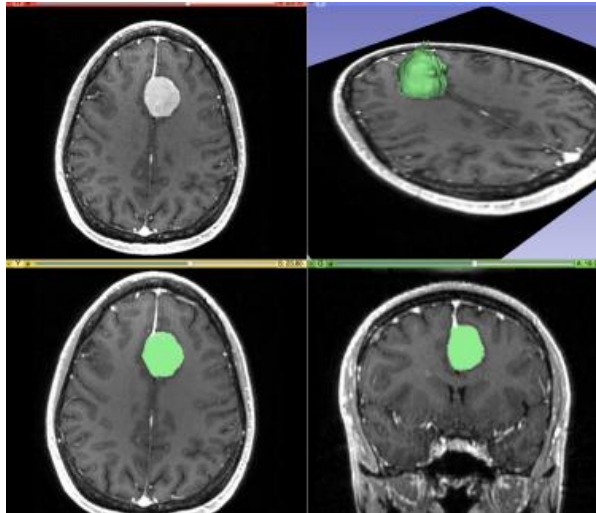


Figura 4.3 - Uso de procesamiento de imágenes para visualizar distintos cortes de un cerebro humano [30].

En la industria automotriz, los sistemas de asistencia al conductor (ADAS) se benefician del PDI mediante la detección de carriles, señales de tráfico, peatones y otros vehículos, lo que es esencial para el desarrollo de vehículos autónomos. También se emplea en la inspección de calidad en las líneas de producción, donde las cámaras verifican la integridad y precisión de las piezas manufacturadas.

El ámbito de la seguridad y vigilancia ha visto un notable avance gracias al procesamiento digital de imágenes. Las tecnologías de reconocimiento facial y detección de movimiento son fundamentales en sistemas de seguridad y control de acceso, permitiendo identificar y verificar la identidad de las personas, así como monitorear áreas para detectar movimientos sospechosos o intrusos.

En agricultura, el PDI facilita el monitoreo de cultivos mediante el uso de drones y cámaras, lo que permite a los agricultores evaluar la salud de los cultivos, detectar plagas y optimizar el riego. Asimismo, en la clasificación de productos agrícolas, la visión por computadora se utiliza para clasificar frutas y verduras según su madurez y calidad.

El reconocimiento de patrones es otra área clave, con aplicaciones como el OCR (reconocimiento óptico de caracteres), que convierte texto impreso o escrito a mano en datos digitales, y la detección de objetos, que identifica y sigue objetos en imágenes y videos. En las ciencias forenses, el procesamiento de imágenes mejora y compara huellas dactilares para la identificación de individuos y ayuda en la reconstrucción de escenas de crimen en 3D.

El entretenimiento y los medios también se benefician del PDI, especialmente en la postproducción de video, donde se aplican efectos especiales, se mejora la calidad de la imagen y se corrige el color. Además, en la creación de experiencias de realidad aumentada y virtual, se integran objetos virtuales en el mundo real y se crean entornos virtuales inmersivos.

La astrofotografía y la teledetección son otros campos donde el PDI es crucial. En la astrofotografía, el procesamiento de imágenes capturadas por telescopios y satélites permite estudiar cuerpos celestes y fenómenos astronómicos. En la teledetección, las imágenes satelitales se utilizan para el análisis de la superficie terrestre, el monitoreo ambiental y la cartografía. Los sistemas de información geográfica (SIG) también integran y analizan imágenes geoespaciales para la planificación urbana, la gestión de recursos y el análisis ambiental [32].

Finalmente, la restauración y mejora de imágenes es una aplicación importante del PDI. Esto incluye la restauración de fotografías antiguas, eliminando manchas, arañazos y otros defectos, así como el aumento de la resolución de imágenes de baja calidad para mejorar su detalle y claridad.

En resumen, el procesamiento digital de imágenes es una herramienta versátil y poderosa que impacta numerosos campos, mejorando la calidad de vida y la eficiencia en diversas industrias y disciplinas.

4.4 Proceso de imágenes para la detección del desgaste de herramientas de corte.

Como hemos mencionado en el apartado anterior, el procesado de imágenes es una herramienta en auge utilizada en diversos campos con el fin de facilitar un reconocimiento o una interpretación de los datos. Uno de los criterios más importantes en el mecanizado es la vida útil de la herramienta. Muchos estudios han desarrollado técnica para predecir la vida útil de una herramienta, basada en datos anteriores o una experimentación de la misma. Tradicionalmente, la forma de hallar sistemas de monitoreo de la condición de la herramienta a través de técnicas de medición directas se ha desarrollado en las últimas décadas. El método directo sin contacto basado en sistemas sensoriales usando el procesado de imágenes en el mecanizado ha estado adquiriendo importancia, y a abierto posibilidades del uso de la inteligencia artificial para suplantar métodos más ortodoxos [33].

Para obtener las imágenes del desgaste, cada parámetro de procesamiento de la plaquita debe tenerse en cuenta, y el microscopio debe estar posicionado cerca de la maquinaria desde el mismo punto para asegurar tiempos de reinstalación y distancias de imágenes similares. Estas imágenes se llevan por una serie de operaciones matemáticas hasta obtener una imagen binarizada de la que se es capaz de sacar datos numéricos. Existen también técnicas para mediciones indirectas de la condición de la herramienta, incluyendo datos de la temperatura de la herramienta, vibraciones de la máquina, fuerzas de corte, y acabado superficial de la cara de la pieza, entre otros.

El software de procesado de imágenes permite mediciones directas de parámetros en unidades de píxeles, o unidades de longitud estándares gracias a sistemas de conversión. Una macro se inscribe en el lenguaje del script del desgaste de la herramienta para capturar los parámetros automáticamente. Estas aplicaciones facilitan la selección de imágenes y su interpretación, permitiendo observaciones en tiempo real de las dimensiones (Figura 4.4).

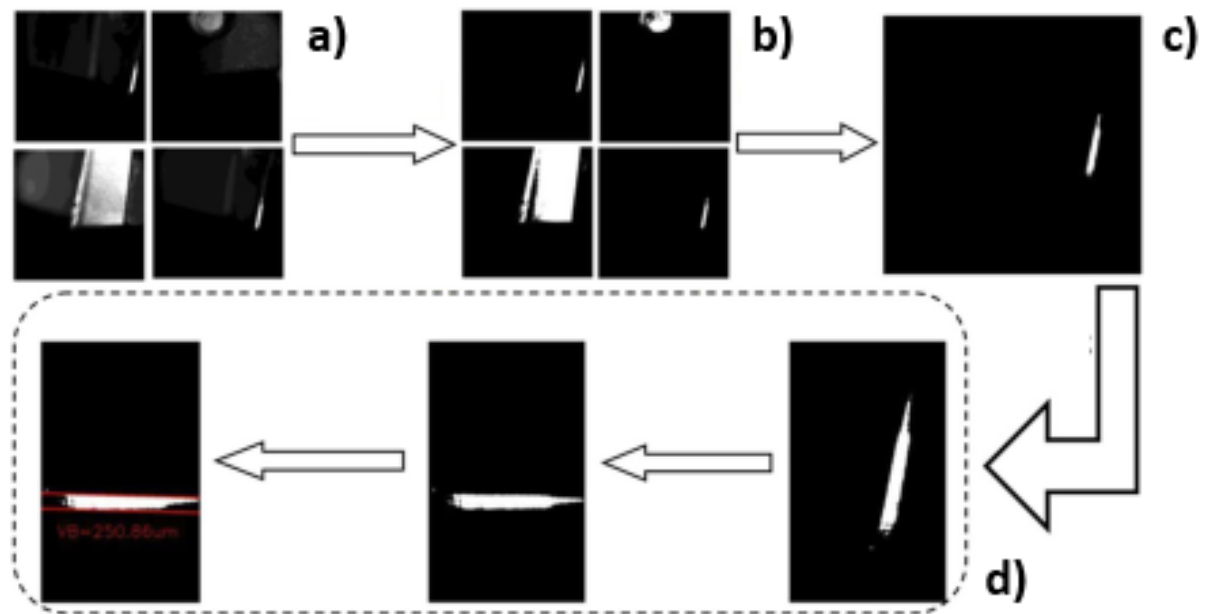


Figura 4.4 - Procesamiento de la imagen de la cara de incidencia de una plaquita. a) Imagen sin alterar. b) Imagen procesada. c) Selección de la zona de interés. d) Imagen recortada [34].

Las máscaras de imagen también son comúnmente usadas en la segmentación de la imagen para separar objetos del fondo, u objetos con diferentes niveles de gris. Las máscaras globales y las locales son dos categorías de esta técnica. El enmascarado local determina un valor de máscara por cada pixel basado en detalles específicos dentro de la imagen. En contraste, un enmascarado global emplea un solo valor de máscara para diferenciar todo el fondo de la imagen. Existen muchos tipos de técnicas de enmascarado, como la de Otsu o K-means, junto con otros métodos [34].

5 Metodología experimental

5.1 Desarrollo de la metodología empleada

El objetivo de este capítulo es explicar detalladamente el procedimiento empleado para realizar la automatización del procesamiento de imágenes del desgaste observado en los dos tipos de plaquitas con las que se ha tratado en este trabajo, todo ello partiendo desde una serie de datos iniciales.

- Fase 1. Fase Preliminar: Previo al comienzo de medición del desgaste.
 - I. Recopilación de información, recogida de documentación, toma de contacto con la maquinaria.

- II. Planificación de los ensayos. Selección de parámetros de desgaste a estudiar tales como longitud del desgaste de incidencia, área de desgaste en desprendimiento, etc.
 - III. Tareas Previas a la medición. Diseño y construcción de un soporte específico para automatizar y simplificar el proceso de medición analógica, preparación preliminar de las herramientas de corte a estudiar, preparación de utensilios, maquinaria, bloques patrón, herramientas de toma de datos, software, etc.
- Fase 2. Técnica de microscopía óptica
 - I. Puesta a punto y verificación del microscopio ZEISS Discovery V12.
 - II. Encuadre y captura de imágenes a través del software del microscopio por procedimiento EDF. Guardado de imágenes en ruta específica para posterior procesado en MatLab.
 - III. Toma manual de mediciones fundamentales de desgaste
 - Fase 3. Medición y Análisis
 - I. Toma de datos y análisis automatizado. Uso de programación en Matlab para conformar un algoritmo capaz de filtrar, segmentar y extraer las características fundamentales de la imagen con objeto de mejorar la calidad de las imágenes y facilitar la extracción de información relevante.
 - II. Generación de informes, comparativa con análisis manual.
 - III. Tratamiento de los resultados obtenidos.
 - Fase 4. Conclusión Final
 - I. Desarrollo de una APP (aplicación) en el entorno Matlab que permite realizar lo anteriormente mencionado de una forma mucho más cómoda e intuitiva para el operario.
 - II. Conclusiones finales ante la metodología empleada, puntos a favor y en contra, objetivos a futuro, condiciones que mejorar, etc.

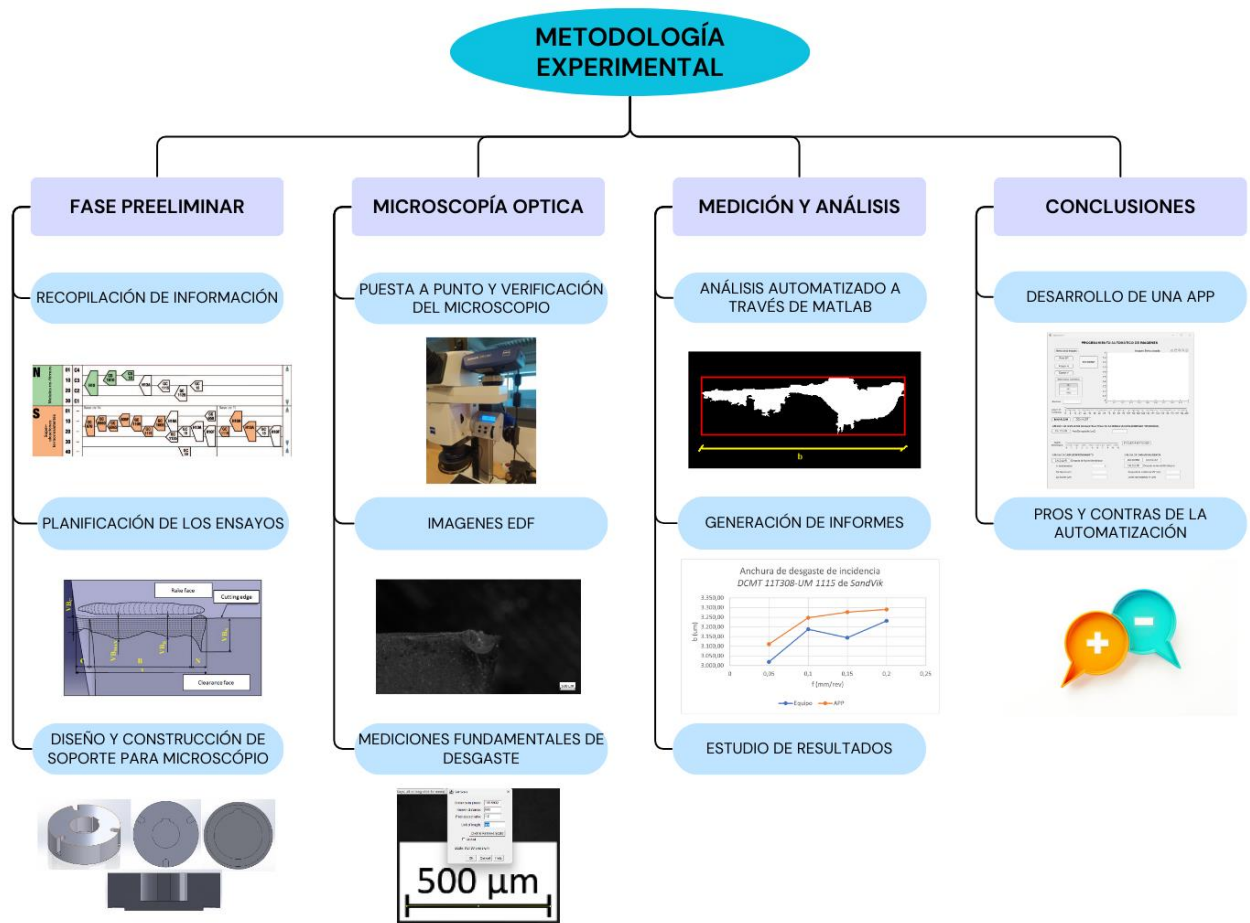


Figura 5.1 - Metodología experimental empleada.

5.2 Datos de partida

El objetivo principal de este trabajo de fin de grado, el objetivo principal se trata del desarrollo de la automatización del proceso de medida del desgaste de la herramienta de corte, en operaciones de mecanizado en seco de aleaciones ligeras de uso aeronáutico, mediante la aplicación de técnicas SOM y la inteligencia artificial adecuada para procesar una imagen digital, obteniendo ciertos resultados relacionados. Para hacer esto posible, se ha partido de una sólida base de datos iniciales, entre los cuales hay imágenes, libros, artículos científicos, así como otras investigaciones relacionadas con el trabajo. Gracias a esto ha sido posible establecer ciertos fundamentos a partir de los cuales se ha construido el presente trabajo. La calidad de esta base de datos ha resultado ser un recurso de gran valor para obtener resultados sólidos en el procesamiento de imágenes. Entre todos los datos, se podrían destacar los que se detallan a continuación. Cabe resaltar que parte de los datos de partidas han sido obtenidos a partir de los trabajos realizados por el grupo de investigación TEP933 "Ingeniería de Fabricación" de la Universidad de Málaga, a lo largo de más de 15 años de trabajo en su principal línea de investigación, el mecanizado sostenible de aleaciones ligeras de uso aeronáutico.

Biblioteca de Imágenes

Un recurso fundamental para hacer posible el desarrollo de este trabajo es poseer una buena cantidad de imágenes, pues sin ellas no sería posible realizar una verificación que acredite que la metodología empleada es válida para reconocer imágenes que puedan ser procesadas por el software de inteligencia artificial. Gracias al trabajo de mecanizado que ha realizado el grupo de investigación TEP933 “Ingeniería de Fabricación” de la Universidad de Málaga; se ha contado con la colección de diversas cajas de plaquitas enumeradas y sus parámetros de corte correspondiente que fueron utilizados a la hora de trabajar con ellas. También dicho grupo ha ofrecido el microscopio ZEISS Discovery V12 para la toma de imágenes resultante.

Bibliografía

“Influence of Tool Wear on Form Deviations in Dry Machining of UNS A97075 Alloy”. Un artículo científico realizado por Francisco Javier Trujillo Vilches, Sergio Martín Béjar, Carolina Bermudo Gamboa, Manuel Herrera Fernández y Lorenzo Sevilla Hurtado, en el cual se muestra el desgaste provocado por la realización de mecanizado en seco de una plaquita y sus modificaciones geométricas y químicas provocadas por la adhesión de material de la pieza.

“Experimental Parametric Model for Indirect Adhesion Wear Measurement in the Dry Turning of UNS A97095 (Al-Zn) Alloy”. Un artículo realizado por Francisco Javier Trujillo, Lorenzo Sevilla y Mariano Marcos en el cual se muestra la influencia de los parámetros de corte en el desgaste de la plaquita usando técnicas de mecanizado en seco. En él se ha podido recoger una gran cantidad de imágenes y una comprensión de la relación entre parámetros y desgaste en las distintas caras de la herramienta.

Páginas Web

Además de toda la información y datos de partida aportados por la Universidad de Málaga, ha sido necesario obtener información sobre la automatización por software para procesado de imágenes digitales. Las más destacadas son:

- Centro de ayuda de MATLAB. Sin este recurso la búsqueda de conocimiento desde los aspectos generales del software y la existencia de numerosos comandos que han sido de gran utilidad habrían sido tediosos de encontrar. Las funciones recogidas y usadas en el programa para la elaboración del procesamiento de imágenes digitales se han encontrado

de manera detallada con explicaciones sobre su funcionamiento y ejemplos aplicados en el campo.

- MatLab Add-On Explorer. Para llevar a cabo el procesamiento digital de imágenes, es necesario instalar algunos Addons sin los cuales no es posible avanzar. Tanto *Image Processing ToolBox* como *VisLabels* fueron usados para esta parte del proyecto.

5.3 Herramienta de Corte. Tipo, Material y Geometría.

Debido a la ausencia de fluidos de corte durante las operaciones de mecanizado en aleaciones aeronáuticas, es fundamental realizar una correcta selección de las herramientas de corte a utilizar. Ante los dos principales tipos de aleaciones de aluminio y titanio descritas anteriormente, se ha trabajado con dos herramientas de corte distintas. Dichas herramientas deberán soportar condiciones extremas de carácter térmico y mecánico, y supondrán un coste y un tiempo de colocación en la maquinaria.

Se han estudiado insertos o plaquitas intercambiables utilizadas correspondientes a los estándares de la norma *ISO 1832* [35]. De este modo, las herramientas que mejor se ajustan a nuestros requerimientos y que se han utilizado para el posterior estudio de su desgaste son la *DCMT 11T308-F2 HX* de *SECO* [36] para mecanizar aleaciones de aluminio y la *DCMT 11T308-UM 1115* de *SandVik* [37] para aleaciones de titanio.

De este tipo concreto de plaquitas, siguiendo la codificación establecida por la *ISO 1832* previamente introducida se obtienen en catálogo los parámetros característicos de tamaño, forma y geometría que se presentan a continuación, como queda ilustrada en la Figura 5.2 [38].

- Forma del inserto rómbica de 55° (D)
- Ángulo de alivio frontal de incidencia de 7° (C)
- Tolerancias dimensionales mínimas y máximas del círculo inscrito desde 0,05 a 0,15 mm (M)
- Sistema de sujeción por agujero, avellanado por un lado (D1) y rompevirutas en una sola cara (T)
- Longitud de la arista de filo o tamaño del círculo inscrito (CI) mayor de 11 mm (11)
- Espesor del inserto de 3,97 mm (T3)
- Radio de la punta de 0,8 mm (08)

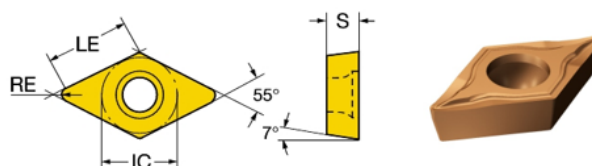


Figura 5.2 - Parámetros geométricos de la plaquita usada.

sus datos se han obtenido del trabajo de fin de grado “Análisis de la influencia de los parámetros de corte sobre el comportamiento a fatiga de piezas torneadas en seco de la aleación de titanio Ti6Al4V de uso aeronáutico” de Andrea González García publicado en 2022 (Tabla 5.2). Ambos documentos están disponibles en el repertorio de la página web de Riuma.

Tabla 5.1 - Valores de los parámetros de corte utilizados para los ensayos de la plaquita DCMT 11T308-F2 HX de SECO.

Velocidad de corte, V_c (m/min)	Avance, f (mm/rev)	Profundidad de corte, a_p (mm)
40	0,05	0,5
80	0,1	1
170	0,15	2
200	0,2	

Tabla 5.2 - Valores de los parámetros de corte utilizados para los ensayos de la plaquita DCMT 11T308-UM 1115 de SandVik.

Velocidad de corte, V_c (m/min)	Avance, a (mm/rev)	Profundidad de corte, p (mm)
50	0,05	1
75	0,1	
100	0,15	
	0,20	

5.4 Descripción del Microscopio ZEISS Discovery V12

Con el propósito de realizar una medición exhaustiva en 3D de la herramienta de corte para este Trabajo de Fin de Estudios, el grupo de investigación TEP933 ha proporcionado un microscopio óptico estereoscópico dotando de software de medida. El microscopio estereoscópico es un tipo de microscopio óptico que permite observar la muestra generando una imagen en tres dimensiones. En los microscopios binoculares convencionales la muestra siempre es observada a través de un solo objetivo. Esto implica que la imagen que llega a los dos ojos es exactamente la misma y no puede generarse una visión tridimensional.

Los microscopios estereoscópicos son en general microscopios de luz reflejada. Es decir, un foco ilumina la muestra y la luz reflejada por la muestra es observada a través de los objetivos y oculares

(Figura 5.5). De este modo se pueden observar muestras sin necesidad de laminarlas como en el caso de los microscopios de luz transmitida, donde la luz atraviesa la muestra antes de llegar al objetivo. Este es el motivo por el cual generalmente los microscopios estereoscópicos tampoco tienen ni condensador ni diafragma. El aumento que puede alcanzar un microscopio estereoscópico es siempre menor que el que se consigue con los microscopios ópticos convencionales. Esto es debido a las aberraciones ópticas introducidas en este tipo de microscopios.

A medida que la luz se refleja en el objeto, los ojos izquierdo y derecho del espectador ven diferentes ángulos de la misma muestra, creando una imagen tridimensional que es más informativa para ver los detalles y la estructura de la superficie que un microscopio con un solo objetivo [40].

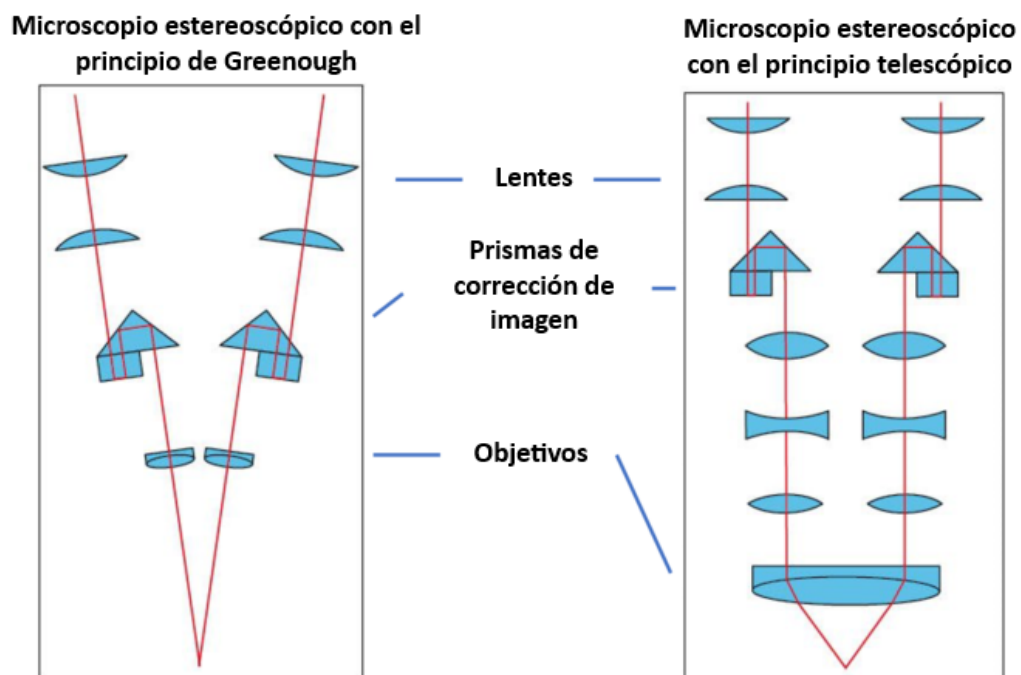


Figura 5.5 - Comparación esquemática de los dos principales diseños de microscopios estereoscópicos.

Los microscopios estereoscópicos más habituales tienen objetivos de 2 o 4 aumentos, combinados con lentes oculares de entre 5 y 20 aumentos. En consecuencia, el aumento total está comprendido entre 10 y 80 aumentos. Es verdad que existen microscopios estereoscópicos que pueden proporcionar un aumento de hasta 300x. Sin embargo, esto es poco habitual ya que tampoco existen muchas aplicaciones para las cuales sea necesario este poder de aumento en un microscopio estereoscópico [41].

El modelo del microscopio utilizado en este Trabajo de Fin de Estudio es el modelo ZEISS Discovery V12 (Figura 5.6) [42].



Figura 5.6 - Imagen del microscopio ZEISS Discovery 12 con las partes a destacar señalizadas.

1. Tubo de Observación Binocular.
2. Cámara digital Axiocam 208 color.
3. Cuerpo de microscopio SteREO Discovery V12.
4. Óptica ZEISS Plan S 1.0x FWD 81mm con anillo de fuente de luz adaptable LED.
5. Soportes manuales para el desplazamiento del objetivo.
6. Tirador para cambio a visión manual/cámara, ambos.
7. Base del microscopio.
8. Botón de encendido de LED.
9. Rueda para cambio de segmentación de luz LED.
10. Rueda para cambio de intensidad lumínica de luces LED.
11. Rueda para desacoplar el anillo de luz LED.
12. Rueda para cambio de receptor intensidad lumínica del cuerpo del microscopio.

5.5 Descripción del soporte creado para la sujeción de la plaquita

Uno de los principales contratiempos a la hora de estudiar el desgaste de las herramientas de corte por técnicas de microscopía óptica se halla en la dificultad de su posicionamiento en la superficie del microscopio. La repetición del proceso de observación de una plaquita bajo la óptica del microscopio puede llegar a ser tediosa si el operario no cuenta con un punto de referencia estático a la hora de realizar el cambio entre diferentes plaquitas.

Es fundamental que las plaquitas a estudiar se coloquen en la base de observación del microscopio y se introduzcan en coordenadas cartesianas estáticas establecidas, para obtener imágenes centradas e idénticas entre sí y así lograr la automatización del posterior método de análisis de desgaste. Logrando esto no sólo da luz verde a la futura computación de una macro capaz de tomar medidas con suma rapidez, sino que libra al operario de volver a modificar los parámetros impuestos en la puesta a punto del microscopio para una sucesiva toma de imágenes, disminuyendo drásticamente el error de la mano humana.

Como gran parte del objetivo de este Trabajo de Fin de Grado, se ha propuesto el diseño y elaboración de un soporte específico para el microscopio ZEISS Discovery V12 con el fin de acelerar enormemente la parte manual del proceso de medición de desgaste de las herramientas de corte.

El soporte está conformado por tres elementos unidos por distintos métodos de sujeción:

BASE DE SUJECIÓN.

Encargado de proporcionar estabilidad y estanqueidad. Se trata de una pieza cilíndrica diseñada con las dimensiones exactas para un correcto encaje en la base del microscopio y una firme sujeción por tornillos. Es la pieza hembra que complementa a la cabeza de sujeción (Figura 5.8 y 5.9).

Se ha realizado su diseño mediante SOLIDWORKS. El diseño del chavetero está normalizado según la norma *DIN 6885 – ISO 3912* [43] y las tolerancias del eje/agujero medidas para un juego óptimo *UNE-EN ISO 286-1:2011* y *UNE-EN ISO 286-2:2011* [44].

Se ha elaborado a través de fabricación aditiva en impresoras RAISE3D E2 (Figura 5.7), fabricado con PLA 1,5mm a temperatura de cama y de extrusor de 60°C y 210°C respectivamente.



Figura 5.7 - Impresora 3D RAISE3D E2

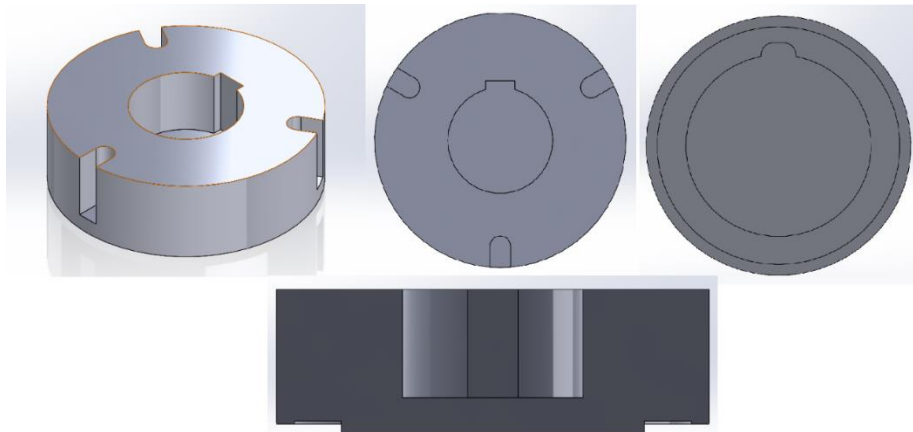


Figura 5.8 - Base del soporte para el microscopio en diferentes vistas dentro del programa SOLIDWORKS.

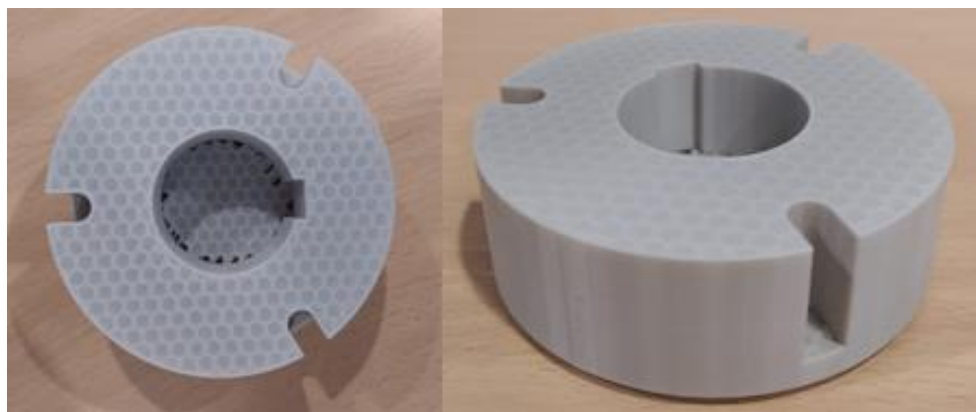


Figura 5.9 - Imágenes de la base del soporte del microscopio procesado por fabricación aditiva.

CABEZA DE SUJECCIÓN.

Encargada de proporcionar concentricidad y planitud a la hora de tomar las imágenes. Se ha diseñado tres distintas cabezas dependiendo del área de la herramienta que se desee estudiar: cara de incidencia principal, cara de desprendimiento y cara de incidencia secundaria. Es la pieza macho que complementa a la base de sujeción, sobre donde se colocarán los porta herramientas (Figura 5.10 – 5.13).

Se ha realizado su diseño mediante SOLIDWORKS. El diseño del chavetero está normalizado según la norma *DIN 6885 A – ISO 3912* [43] y las tolerancias del eje/agujero medidas para un juego óptimo *UNE-EN ISO 286-1:2011* y *UNE-EN ISO 286-2:2011* [44].

Se ha elaborado a través de fabricación aditiva en impresoras RAISE3D E2, fabricado con PLA 1,5mm a temperatura de cama y de extrusor de 60°C y 210°C respectivamente.

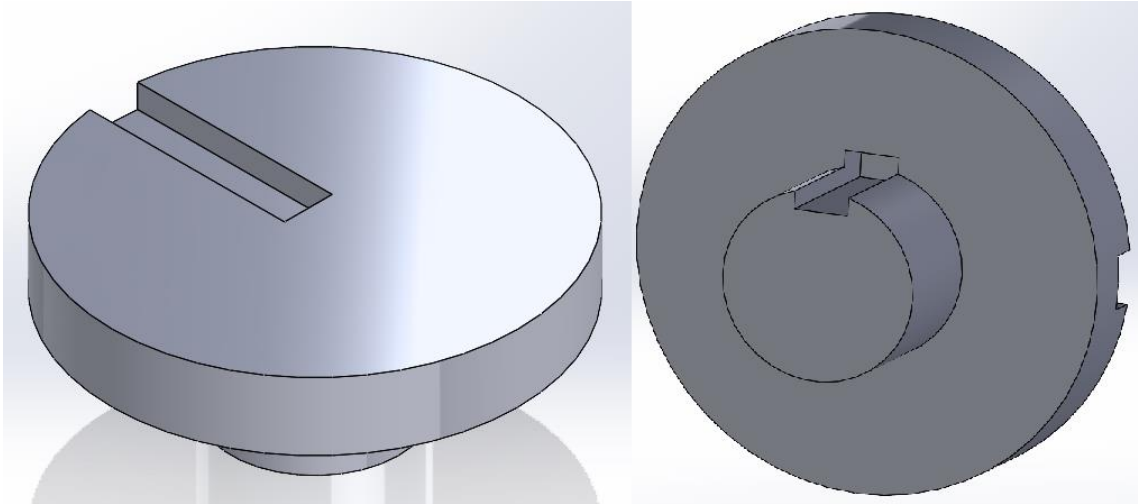


Figura 5.10 - Cabeza del soporte para el microscopio (cara de desprendimiento) en diferentes vistas dentro del programa SOLIDWORKS.



Figura 5.11 - Imágenes de la cabeza del soporte del microscopio (cara de desprendimiento) procesado por fabricación aditiva.

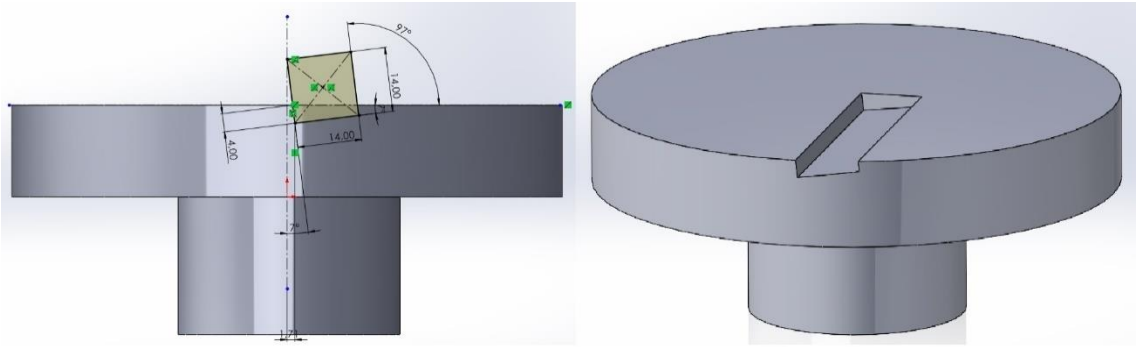


Figura 5.12 - Cabeza del soporte para el microscopio (cara de incidencia) en diferentes vistas dentro del programa SOLIDWORKS.

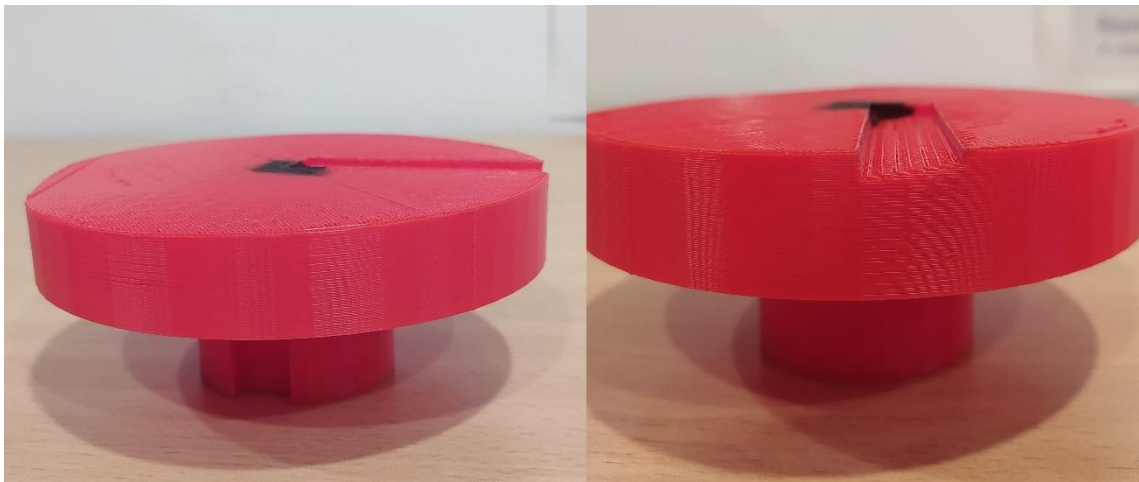


Figura 5.13 - Imágenes de la cabeza del soporte del microscopio (cara de incidencia) procesado por fabricación aditiva.

PORTA-HERRAMIENTAS.

Para proporcionar una estabilidad total a la hora de tomar las imágenes de la plaquita, se ha diseñado y fabricado un porta-herramientas capaz de encajar de manera cómoda encima de las cabezas de sujeción del soporte creado para el microscopio. El mecanizado de la pieza se ha realizado gracias a la maquinaria procedente del Laboratorio de Fabricación de la Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Málaga. Se han usado técnicas de mecanizado CNC para la mayoría del proceso, y algunas pasadas por un torno manual para el acabado (Figura 5.14).

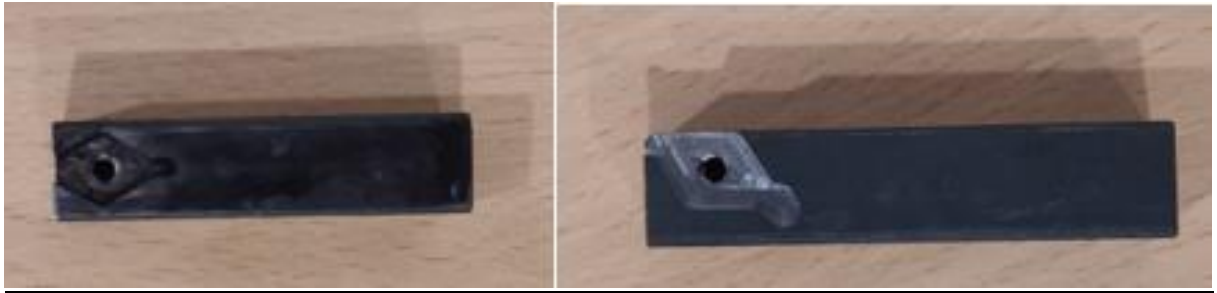


Figura 5.14 - Portaherramientas creados para estudiar las caras de desprendimiento (izquierda) e incidencia (derecha) con mecanizado CNC.

Los distintos elementos del soporte se han diseñado con ángulos correspondientes para compensar los ya marcados por el fabricante de la herramienta y así conseguir observar las caras de la plaquita sobre un plano totalmente horizontal, con el propósito de tomar las medidas en verdadera magnitud.

El ensamblaje de las piezas se logra con una leve presión manual, y consta de un posible grado de libertad gracias a la chaveta dispuesta. De esa forma se pueden tomar imágenes de distintas caras de la plaquita a distintos ángulos (Figura 5.15 y 5.16).

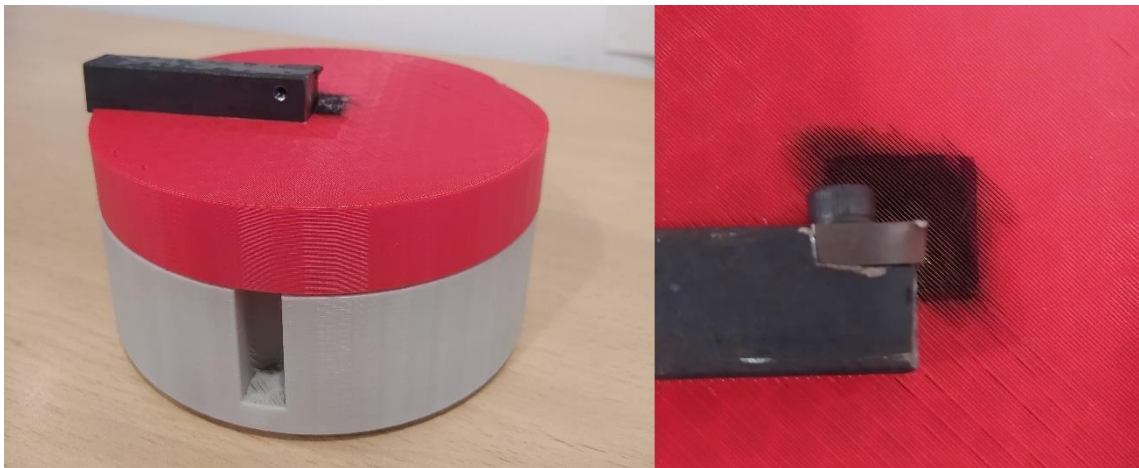


Figura 5.15 - Resultado de la unión de los elementos de sujeción.

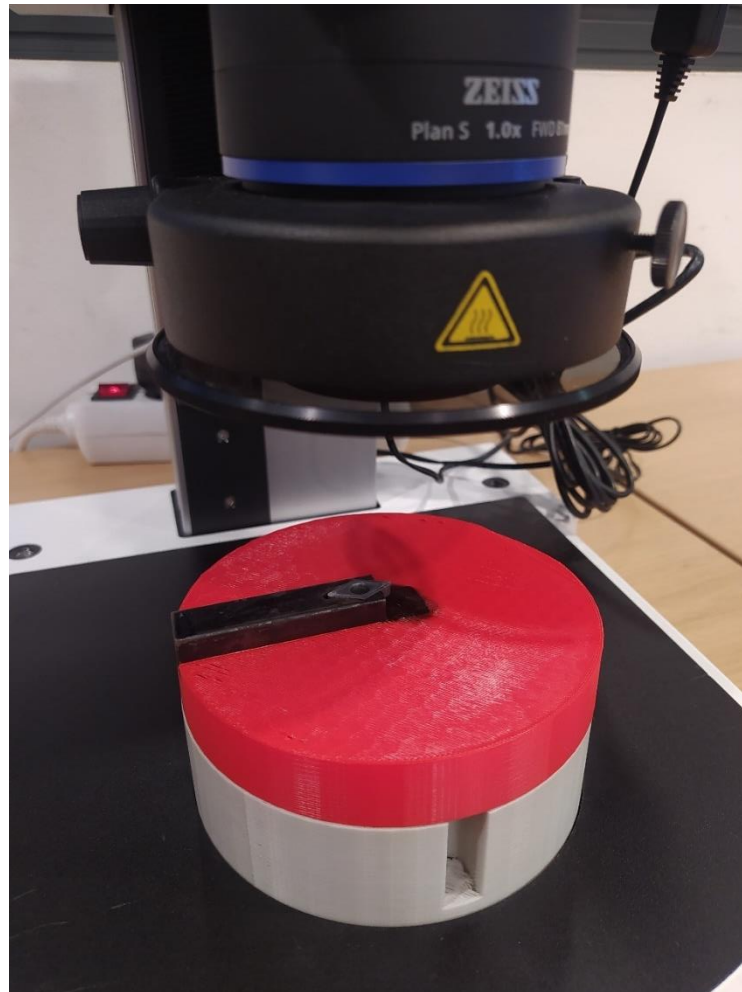


Figura 5.16 - Montaje de la sujeción de la herramienta para el estudio en el microscopio.

5.6 Verificación y Puesta a Punto del Microscopio ZEISS Discovery V12

Para realizar una correcta medición del desgaste el operario debe verificar que todos los componentes del microscopio se encuentren en funcionamiento y respondan correctamente.

Para ello se enumerará por orden una lista de pasos a seguir con el fin de obtener una imagen nítida y clara de la superficie de la herramienta:

1. Elevar el cuerpo del microscopio con ayuda de los soportes manuales para el desplazamiento del objetivo (5).
2. Retirar soporte cerámico de la base del microscopio (7).
3. Colocar base del soporte de plaquita y atornillar.
4. Colocar cabeza del soporte de plaquita correspondiente según la cara a estudiar.
5. Conectar Fuente de Alimentación.
6. Encender el cuerpo del microscopio, AxioCam 208 color y anillo de luz LED.

7. Verificar el tirador para vista mixta. (3ª posición)
8. Enfocar plaquita observando desde oculares, ajustando altura con ayuda de los soportes manuales (5).
9. Ajustar magnificación del cuerpo del microscopio con ayuda de la rueda del panel (3) hasta un valor de 25.0x
10. Ejecutar software ZEN core v3.5 desde el ordenador conectado a la cámara.
11. Seleccionar “Free Mode” y utilizar herramienta “2D Acquisition”
12. En “Manual Microscope Configuration” establecer los siguientes valores:
 - *Objective*: 0,1x
 - *Zoom*: 25x
 - *Camera Adapter*: 0,5x
13. En “Extended Camera” establecer un **tiempo de exposición** de 80ms y una resolución adecuada a la de la pantalla.
14. En los subapartados de “Extended Camera” establecer los siguientes valores:
 - *Analog Gain*: 15
 - *Enable Noise Filter* con ganancia de *Threshold* 1,2
 - *Color Mode*: B/W
 - *Orientation*: Rotate 180º
 - *Gamma*: 0,47
 - *Transfer Format*: YUV420
 - *Noise Correction*: ON
 - *Sharpness Correction*: ON
15. En “Camera” establecer mismos valores de tiempo de exposición y modo de color.
16. Reajustar el enfoque de la plaquita observando la imagen digital recibida de la cámara AxioCam, haciendo uso de los soportes manuales (5)
17. Ajustar el anillo de luz LED para deshacerse de la mayor cantidad de sombras posibles.

Una vez obtenida una imagen nítida en blanco y negro de la plaquita, se procede a verificar la calibración del microscopio.

5.6.1 Técnicas Metrológicas en la Verificación del Microscopio ZEISS Discovery V12

Previo al análisis del desgaste, se debe verificar que el microscopio capte la imagen analógica y la transforme a digital correctamente, sin errores en la medición. Para ello debemos realizar la simple tarea de tomar medidas de un bloque patrón a través del software del microscopio.

Teniendo como referencia las medidas del bloque patrón (Figura 5.17) junto con su tolerancia, colocamos este sobre la base del microscopio, enfocamos la imagen y tomamos capturas, que pueden ser medidas al instante usando la herramienta del software “Interactive Measurements” (Figura 5.18 y 5.19).

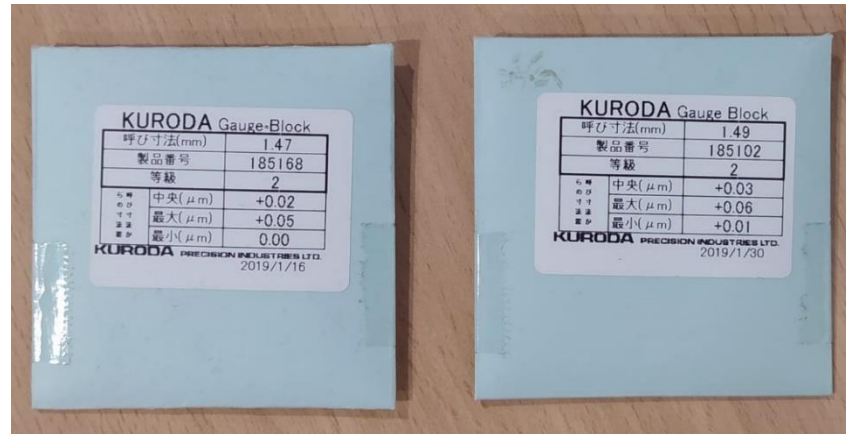


Figura 5.17 - Compartimentos de los bloques patrón con sus medidas y su tolerancia.

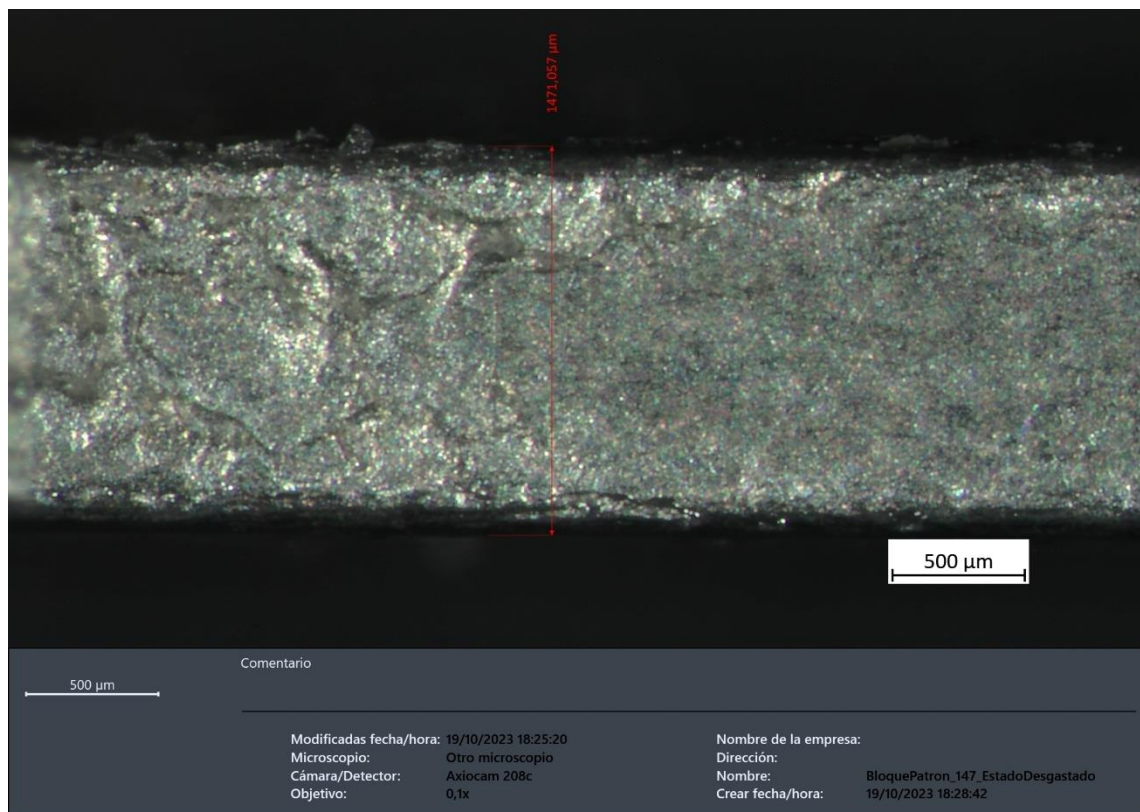


Figura 5.18 - Imagen del bloque patrón de 1.47 mm tomada y medida desde el microscopio ZEISS Discovery V12.

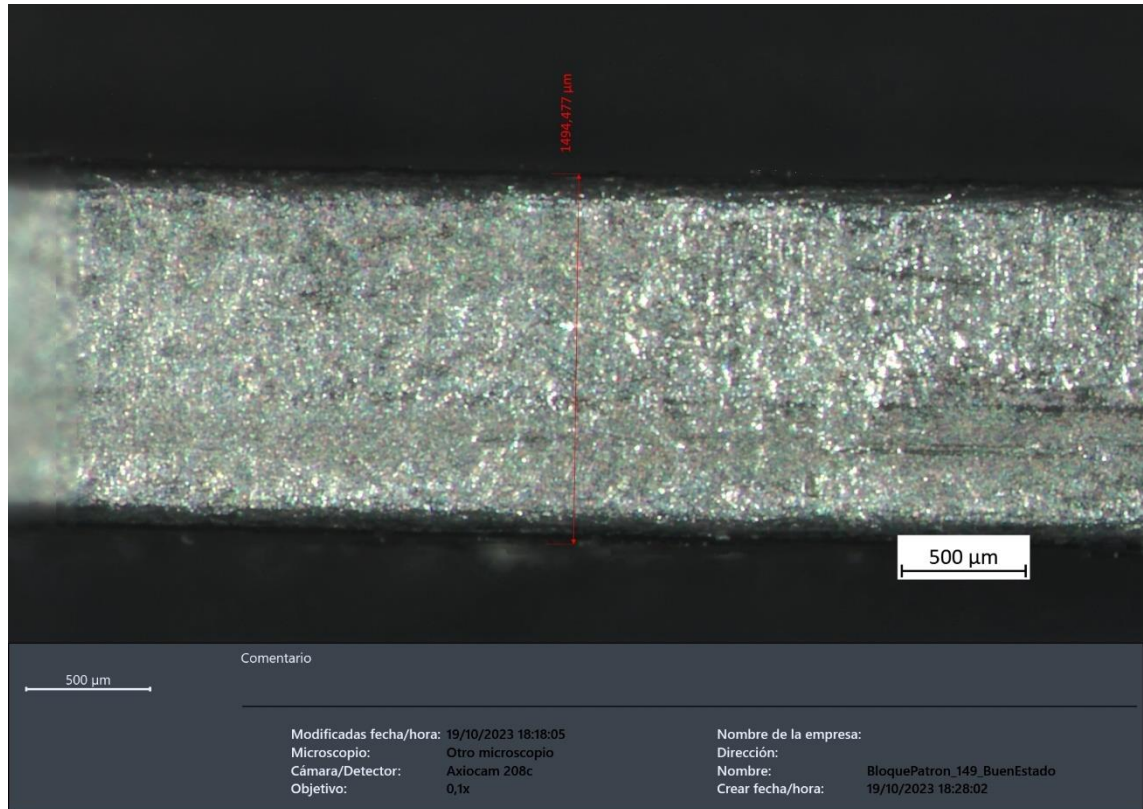


Figura 5.19 - Imagen del bloque patrón de 1.49 mm tomada y medida desde el microscopio ZEISS Discovery V12.

5.7 Análisis del Software ZEN CORE v.5

ZEN core es un paquete exhaustivo de herramientas de captura de imágenes, segmentación, análisis y conectividad de datos para la microscopía multimodal en laboratorios. Es el software usado para este Trabajo de Fin de Estudio (Figura 5.20).

Gracias a las diferentes herramientas que nos proporciona el software, podremos obtener una imagen a tiempo real de nuestra plaquita a estudiar. El software cuenta con numerosos ajustes con los que poder adaptar la imagen como el operario vea conveniente [45].



Figura 5.20 - Interfaz del software ZEN CORE v.5.

La función estrella de este software reside en su capacidad de capturar imágenes obteniendo una profundidad de campo extendida (Extended Depth of Field, EDF), que nos facilitará el estudio con una mayor precisión gracias a una excelente nitidez en todo el recorrido del plano de la herramienta (Figura 5.21).

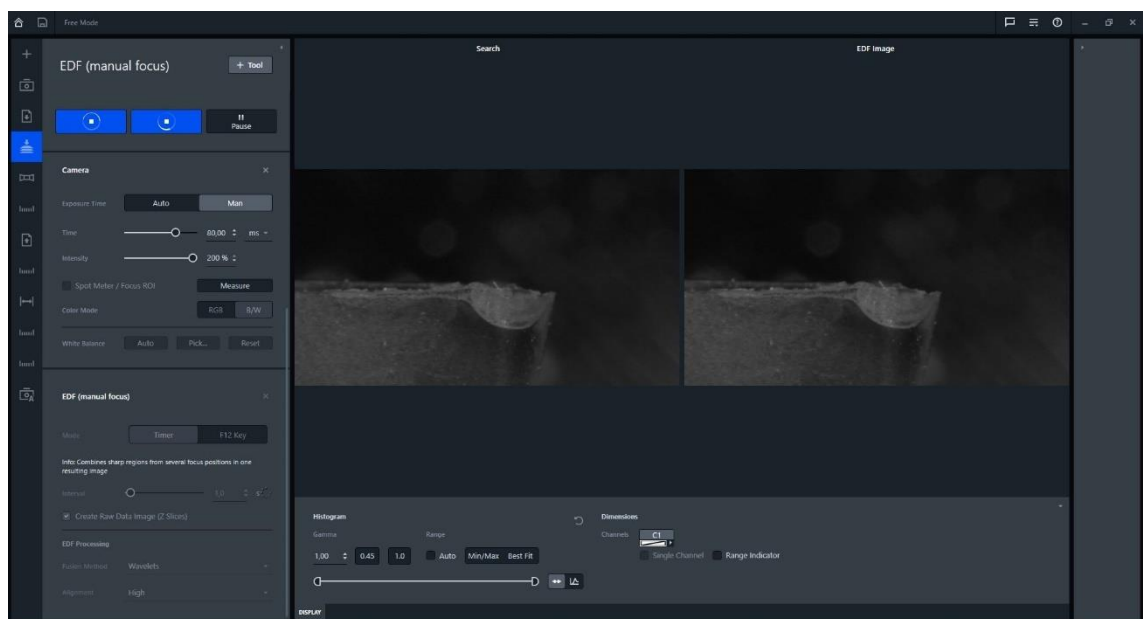


Figura 5.21 - Función del software para capturar imágenes EDF.

El software también dispone de herramientas de medición directas de las capturas tomadas para una medición manual rápida y eficaz como se indica en la Figura 5.22.

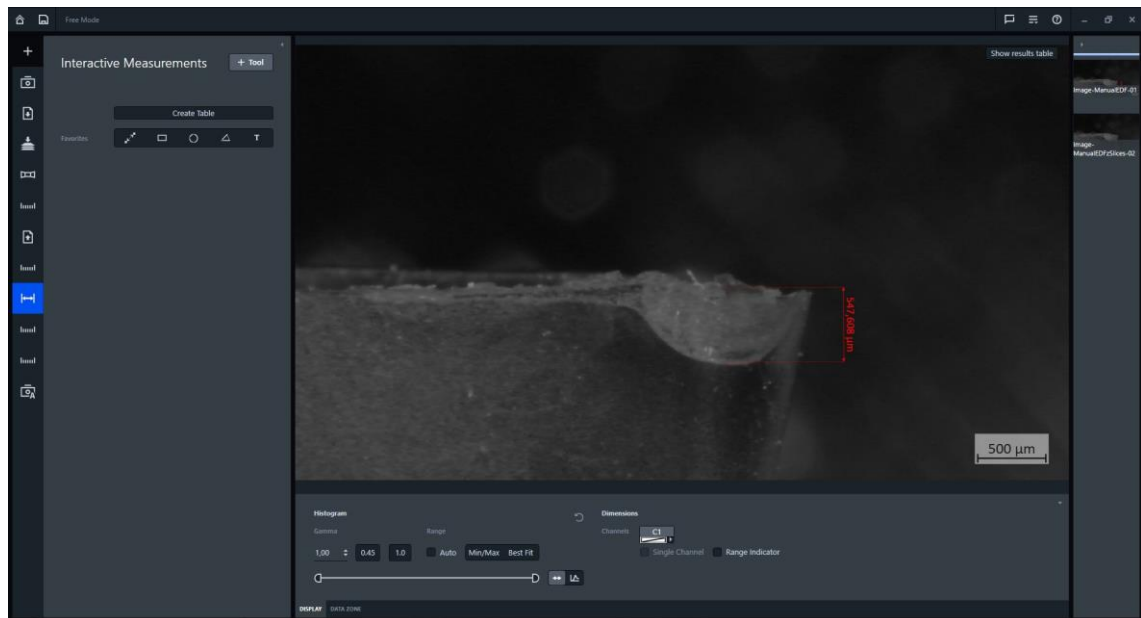


Figura 5.22 - Medición del desgaste de incidencia de una plaquita desde el software ZEN CORE v.5.

5.8 Aplicación de Técnicas SOM

La microscopía óptica estereoscópica (SOM), también conocida como microscopía de luz estereoscópica o microscopía binocular, es una técnica que proporciona una visión tridimensional de objetos a través de un sistema de dos objetivos y la observación de imágenes ligeramente diferentes de un objeto.

Las técnicas de microscopía óptica estereoscópica son valiosas herramientas utilizadas para observar y analizar el filo de corte de herramientas en procesos de mecanizado. Estas técnicas ofrecen una visión tridimensional y detallada de la geometría del filo, lo que es esencial para evaluar su estado y desempeño. Los microscopios estereoscópicos proporcionan una visión tridimensional del objeto observado. Esto se logra mediante la visualización de dos imágenes ligeramente diferentes, simulando la visión binocular humana. Además, tienen una mayor profundidad de campo en comparación con los microscopios convencionales. Esto significa que pueden enfocar una gama más amplia de alturas en el objeto, lo que es especialmente beneficioso al observar superficies tridimensionales como el filo de corte [41].

La iluminación oblicua es común en los microscopios estereoscópicos y ayuda a resaltar los detalles superficiales. Al iluminar el objeto desde un ángulo, se generan sombras que realzan las características tridimensionales. La aplicación de técnicas SOM permite una evaluación detallada del estado del filo de corte de herramientas. Se pueden identificar desgastes, astillados, deformaciones y otros detalles que afectan el rendimiento. Una correcta aplicación de esta técnica da pie a la investigación y desarrollo de nuevas herramientas de corte para comprender mejor su comportamiento en condiciones específicas de mecanizado.

5.8.1 Técnicas de Imagen EDF

La profundidad de campo extendida, también conocida como apilamiento de enfoque, es una técnica de procesamiento de imágenes digitales que combina múltiples imágenes tomadas a diferentes distancias de enfoque para dar una imagen resultante con una mayor profundidad de campo (DOF) que cualquiera de las imágenes de origen individuales [46].

Cuando se trabaja con cámaras, microscopios o sistemas de visualización, hay situaciones en las que se desea que más partes de la escena estén enfocadas al mismo tiempo. Esto es especialmente útil en la fotografía de macro, microscopía y en situaciones donde hay objetos ubicados a diferentes distancias del punto de enfoque.

La profundidad de campo extendida es particularmente valiosa en situaciones donde es necesario que múltiples planos en la escena estén enfocados simultáneamente. Sin embargo, también es importante tener en cuenta que, al usar aperturas más pequeñas, puede haber una reducción en la cantidad de luz que llega al sensor, lo que puede requerir ajustes en otros parámetros de la cámara o sistemas ópticos para mantener una exposición adecuada. Además, enfoque apilado y otras técnicas pueden requerir más tiempo y procesamiento en comparación con una captura de imagen única [47].

5.9 Procesamiento digital de imágenes

La automatización de capturas de imagen y procesos de medida se refiere a la implementación de sistemas automáticos que pueden adquirir imágenes de forma programada y realizar mediciones precisas en esas imágenes. Esta automatización tiene aplicaciones en diversas áreas, como la inspección de calidad en la fabricación, la investigación científica, la medicina y más.

La automatización de capturas de imagen y procesos de medida no solo mejora la eficiencia, sino que también reduce errores y proporciona mediciones más precisas y consistentes, lo que es esencial en numerosas aplicaciones industriales y científicas. Se hace uso de cámaras y algoritmos de procesamiento de imágenes para capturar información visual. Estos sistemas pueden ser

programados para realizar tareas específicas, como la identificación de defectos en productos o la captura de características específicas.

En este Trabajo de Fin de Estudio se obtiene una metodología automatizada basada en el filtrado, la segmentación, la extracción de características y otras técnicas para mejorar la calidad de las imágenes y facilitar la extracción de información relevante. Para desarrollar una automatización del estudio de desgaste de las herramientas, se ha de llevar a cabo un procesamiento digital de las imágenes tomadas anteriormente. Por lo cual se ha seguido una serie de pasos realizados de estricto orden que se detallarán a continuación. El procesado se ha llevado a cabo mediante el software de Matlab, junto con los *Addons* de *Image Processing Toolbox* y *VisLabels* que la propia aplicación permite instalar. Todas las funciones mencionadas a continuación son referidas a dicho software.

En primer lugar, se debe recalcar que el desarrollo del procesamiento de imágenes es prácticamente idéntico tanto para la cara de desprendimiento como para la cara de incidencia. En este caso, se ha tomado como ejemplo las imágenes de la cara de desprendimiento de las plaquitas serie *DCMT 11T308-F2 HX* de *SECO* y de la cara de incidencia de las plaquitas *DCMT 11T308-UM 1115* de *SandVik* para mostrar los pasos seguidos, aunque para el caso de otra serie de plaquitas con las mismas propiedades geométricas, el proceso es exactamente el mismo.

Selección de la superficie en la imagen

En un primer acercamiento con la programación, se debe tener bien localizadas las imágenes obtenidas por el microscopio dentro de una carpeta para que MatLab tenga siempre la misma ruta. Las imágenes se deben leer y mostrar a través de funciones como *"imread"* y *"imshow"* respectivamente.

Cuando se comience el trabajo del estudio de la plaquita, puede haber ocasiones en las que sea necesario para el operario tratar con un área específica de la imagen (Figura 5.23). Esto se debe a que se quiera observar valores de una zona concreta de la plaquita, o porque a partir de cierto límite el procesado no sea óptimo para el análisis de resultados. Es por ello que el primer paso que se ha llevado a cabo ha sido la posibilidad de seleccionar una zona concreta de trabajo sin perder las propiedades de píxeles de la imagen. Para ello se ha empleado la función *"imcrop"*.

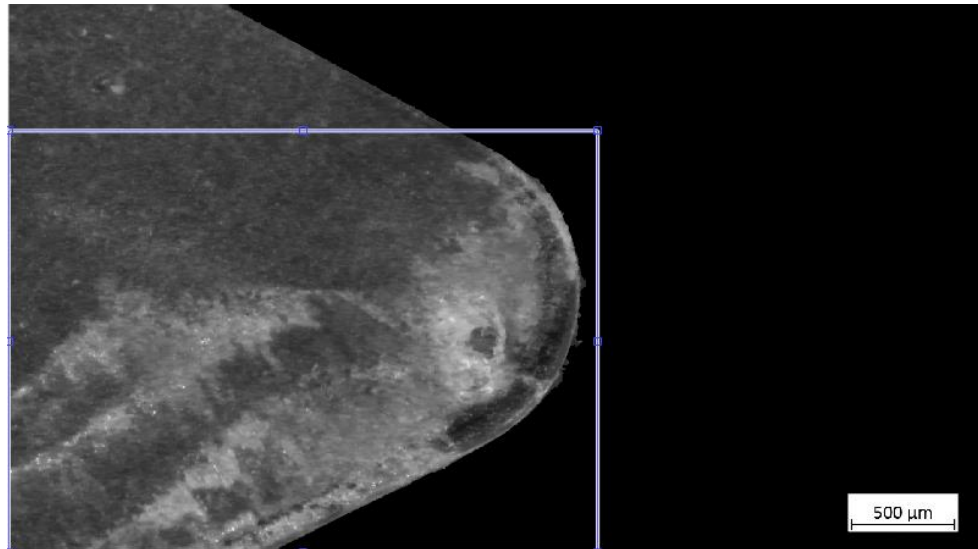


Figura 5.23 - Selección de un área específica en la imagen de la cara.

La imagen en escala de grises

Al trabajar con una imagen a color, obtenida de un microscopio, es necesario saber que dicha imagen está en escala RGB (Red, Green, Blue). Esta imagen está compuesta de tres matrices de cada correspondiente color (Figura 5.24). La superposición de estas tres matrices, con diferentes valores numéricos de cada uno de los tres colores en cada pixel existente de la imagen, da lugar a todos los colores que se pueden apreciar en dicha imagen.

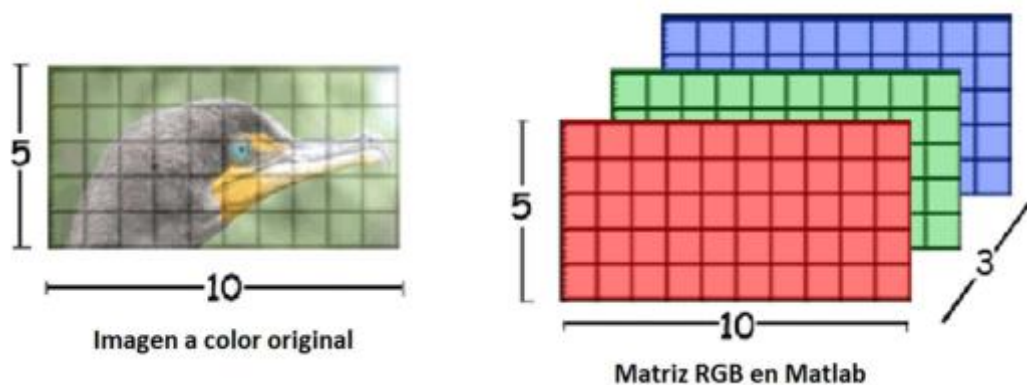


Figura 5.24 - Matriz RGB de una imagen a color.

Para realizar las futuras operaciones, necesitamos que nuestra imagen quede libre de colores, como la mostrada en la Figura 5.25. Pese a que el microscopio usado tiene la función de devolvernos una imagen monocromática, en MatLab con el uso de la función “*rgb2gray*” también podemos lograrlo.

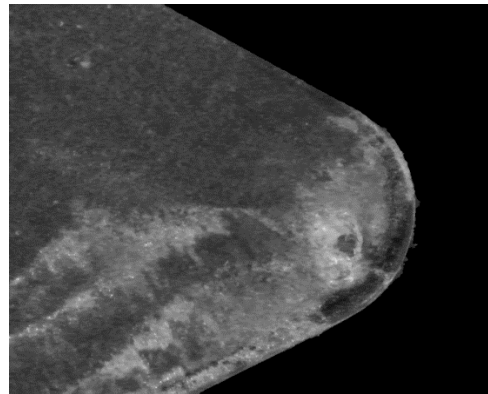


Figura 5.25 - Imagen de la cara de desprendimiento en escala de grises.

Mejora del contraste de la imagen

Dependiendo de la calidad obtenida de la imagen, la distribución de intensidades de los píxeles de la imagen puede variar. Se recomienda tener un fondo totalmente oscuro, y si no es posible llegar a ello, entonces se deberá remover el fondo de la imagen con programas externos. El histograma de una imagen indica el intervalo de intensidad de la imagen, que puede llegar a ser muy estrecho en algunas ocasiones. Si el rango no cubre el rango potencial de $[0,255]$ y a la imagen le faltan los valores altos y bajos que darían lugar a un buen contraste, procederemos a mejorar dicho contraste con la función *“imhist”*, seguida de *“histeq”*.

En la siguiente figura se puede ver la comparación del antes y después de la mejora de contraste.

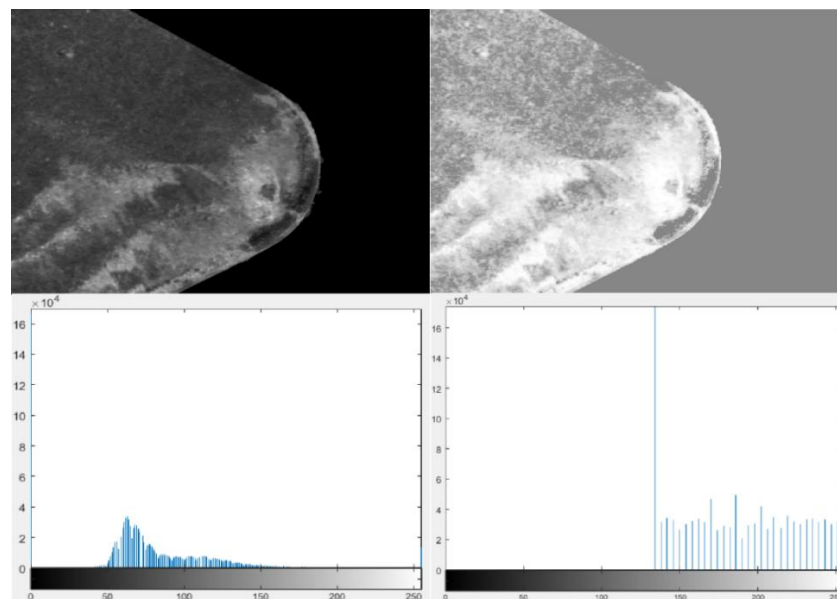


Figura 5.26 - Ajuste del contraste de la imagen para conseguir un espectro del histograma más ancho.

Binarizado de la imagen

Para facilitar aún más el trabajo posterior, al estar trabajando sobre una única matriz, podemos realizar un binarizado de la imagen. Binarizar una imagen consiste en tomar esa única matriz obtenida anteriormente en escala de grises, y simplificar los valores de cada pixel por unos y ceros. Como resultado, la imagen solo posee pixeles de blanco puro (1) y negro puro (0), como se detalla en la Figura 5.27. Para ello se ha empleado la función “*imbinarize*” dando como resultado lo mostrado en la siguiente figura.

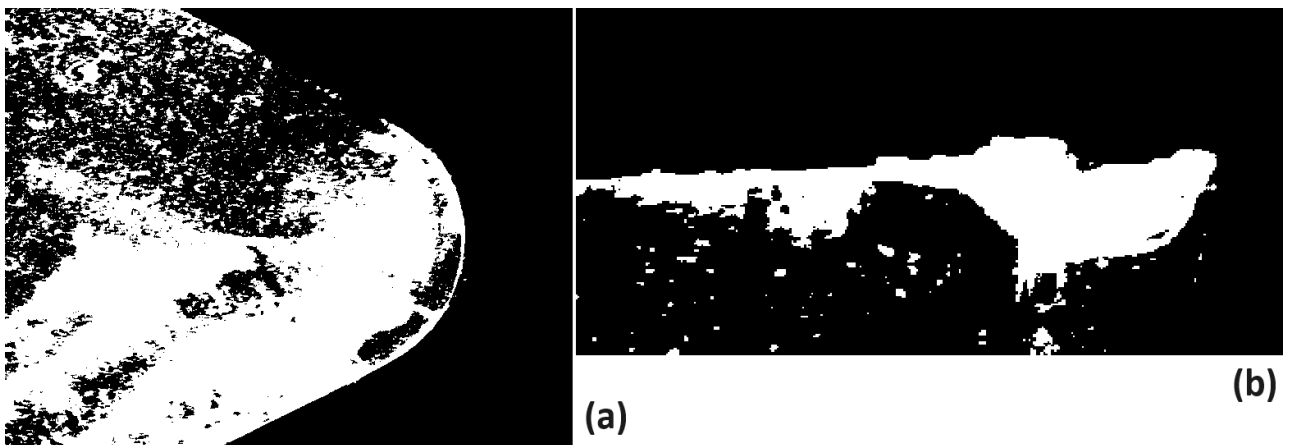


Figura 5.27 - Imagen de la cara de desprendimiento (a) y de incidencia (b) en escala binaria.

Operaciones Morfológicas

Una vez tenemos la imagen binarizada, podríamos comenzar a extraer datos de ella, pero esta se encuentra llena de irregularidades. Pese a que en ciertos aspectos una imagen así pueda ser la mejor opción para sacar resultados globales como el área total afectada por abrasamiento de viruta, en general es recomendable pasar la imagen por operaciones morfológicas de erosión y dilatación, así como eliminación de ruido que pueda causar variaciones en valores, así la imagen puede quedar más “limpia”.

Usaremos la primera función llamada “*strel*”, que representa un elemento estructurante morfológicamente plano que es parte esencial de las operaciones de dilatación y erosión. Un elemento estructurante plano es un entorno que asume valores binarios, que puede ser 2D o multidimensional y en el que los píxeles con el valor verdadero se incluyen en el cómputo morfológico, en tanto que los píxeles denominados con el valor falso, no. El elemento puede tener distintas formas geométricas. Para este paso hemos usado formas cuadradas y de diamante. De

dicha forma convierte agrupaciones pequeñas de píxeles negros en blancos, siempre y cuando sea el color blanco el predominante.

A continuación, se aplica la función *"imclose"* que se encarga de erosionar y dilatar la imagen. Por último, es posible usar la función *"imfill"* para rellenar posibles irregularidades y simplificar aún más el binarizado de la imagen.

Por último, es posible ordenar al programa que se deshaga de las entidades con un número menor de píxeles que el que se le indique con la función *"bwareaopen"* (Figura 5.28).

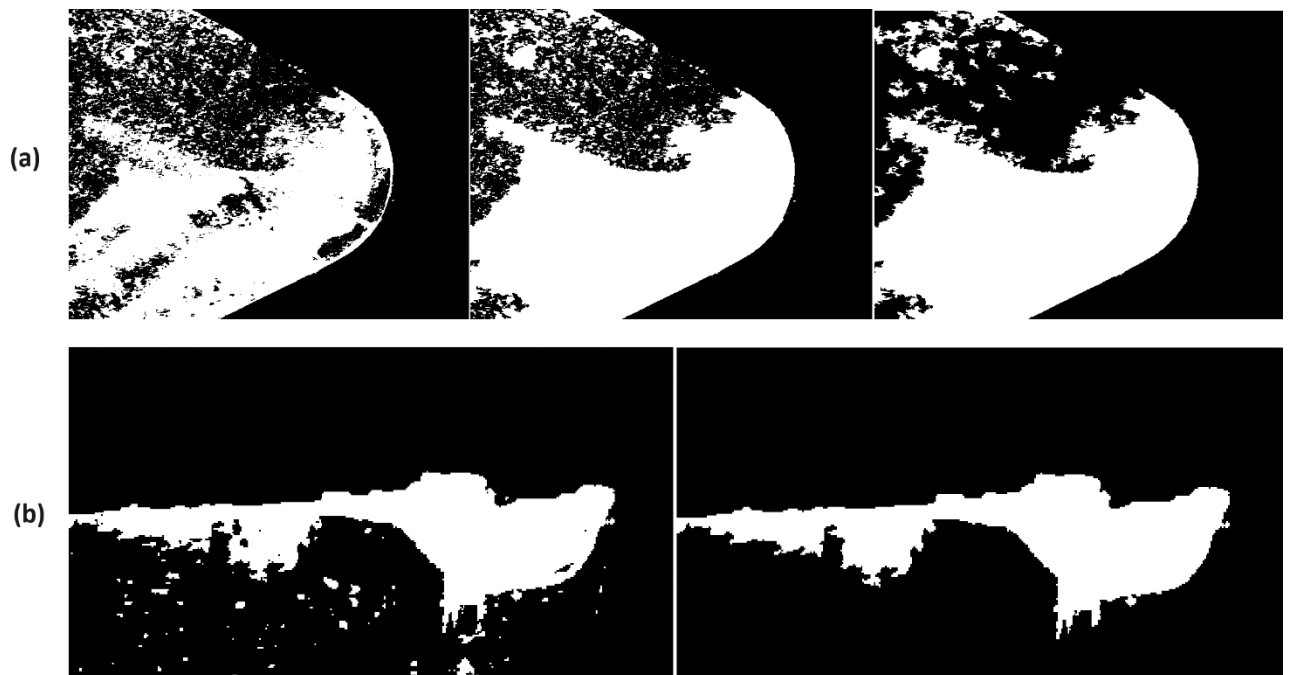


Figura 5.28 - Imagen de la cara de desprendimiento (a) y la cara de incidencia (b) tras realizar un ajuste morfológico y limpiar partículas pequeñas.

Identificación de objetos y obtención de parámetros

Una vez realizados todos los pasos anteriores, se debe finalizar el procesamiento de la imagen con una identificación de las entidades presentes, y la obtención de parámetros básicos necesarios para el estudio del desgaste.

Para el operario, es importante identificar en la imagen las zonas de interés que desea estudiar, es por eso que con la implementación de la función *"vislabels"*, que enumera todas las entidades conocidas (Figura 5.29).

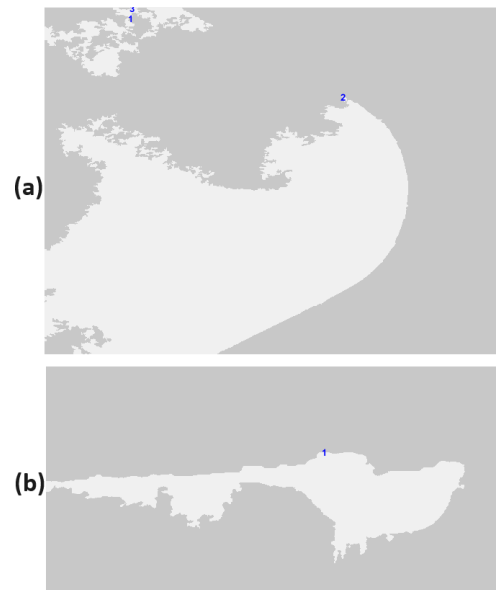


Figura 5.29 - Numeración de las entidades de la imagen binarizada para la cara de desprendimiento (a) y la cara de incidencia (b).

Una vez tengamos la imagen “limpia”, es posible obtener diferentes resultados numéricos mediante la función “*regionprops*”. Dicha función encuentra objetos únicos en imágenes binarias utilizando entornos de conectividad 8 para imágenes 2D, y es capaz de calcular una lista extensa de propiedades, como el área, la posición y tamaño de las entidades enmarcadas por cuadros denominados “*BoundingBox*” (Figura 5.30) que nos servirá más adelante para sacar medidas de suma importancia como la longitud de degaste de la cara de incidencia (VB), la longitud del eje mayor y menor, la orientación en grados, el perímetro, etc (Figura 5.31).

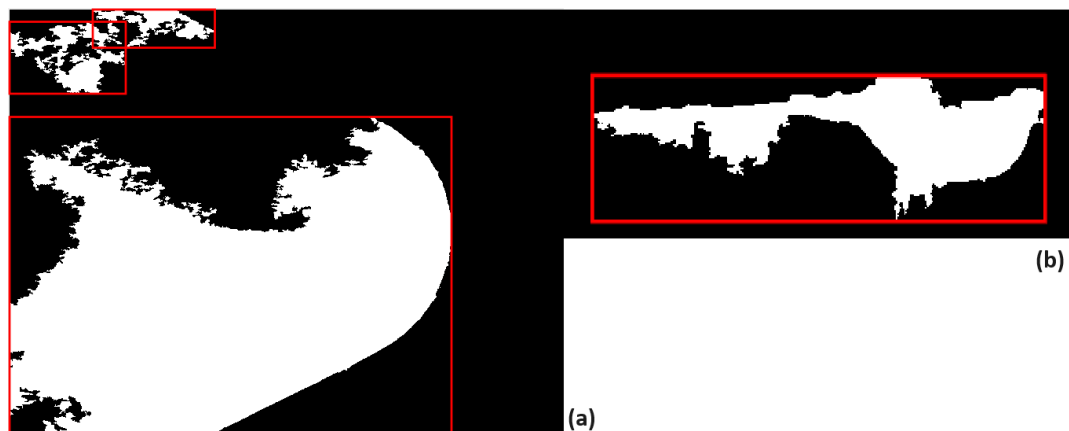


Figura 5.30 - Imagen de la cara de desprendimiento (a) y cara de incidencia (b) binarizada con las entidades enmarcadas en “*Bounding Boxes*”.

Fields	BoundingBox	Area	MajorAxisLength	MinorAxisLength
1	[0.5000,31.5000,296,183]	20081	277.0528	187.3049
2	[0.5000,273.5000,1126,807]	580430	1.2516e+03	678.2461
3	[212.5000,0.5000,311,97]	10561	290.7850	85.7231

Figura 5.31 - Resultados recogidos en MatLab de diferentes parámetros de las entidades.

5.10 Desarrollo de la APP

5.10.1 Introducción

Dentro de los objetivos de este trabajo, hasta el momento se ha diseñado un soporte específico para el microscopio ZEISS Discovery V12 adquirido por el grupo de investigación TEP-933 “Ingeniería de Fabricación de la Universidad de Málaga”, que cuenta con diferentes cabezales para las distintas caras de la plaquita a estudiar, así como un proceso de verificación y puesta a punto de microscopio mencionado. Además, se ha llevado a cabo un algoritmo diseñado para procesar digitalmente la imagen y proporcionar resultados numéricos cuantitativos sobre aspectos geométricos de interés relacionado al desgaste de la herramienta, como lo es la longitud de desgaste de incidencia (VB), el ancho y superficie de la zona afectada por abrasión o adhesión en ambas caras.

No obstante, uno de los inconvenientes de realizar un algoritmo en software de MatLab es la posible complejidad para los usuarios a la hora de comprender y utilizar las funciones correctamente. Con el objetivo de solventar este problema y hacer que la aplicación de estos algoritmos sea más accesible a nivel del operario, se ha creado una aplicación con interfaz gráfica. Esta aplicación, desarrollada en el entorno de App Designer de MatLab, simplifica significativamente la sucesión de pasos durante el procesamiento digital de las imágenes a investigar.

La creación de una aplicación trae consigo una serie de ventajas a destacar, como es la facilidad de uso para el operario, por la interfaz simple e intuitiva, lo que permite a cualquier usuario, aunque no posea experiencia previa en programación, utilizarla de manera efectiva. Además de la facilidad de uso, la aplicación proporciona una ventajosa eficiencia en términos de velocidad. Elimina la necesidad del operario de ejecutar manualmente los códigos y de cambiar valores repetidas veces con el fin de reemplazar características del procesamiento de imágenes, lo que en gran medida agiliza el proceso de análisis y permite una obtención de resultados y una toma posterior de decisiones más rápida.

En resumen, esta aplicación desarrollada en el entorno de App Designer de MatLab impulsa el proyecto aún más hacia la simplificación y la accesibilidad a cualquier usuario, acortando aún más uno de los factores de mayor importancia que se han dado en este proyecto: el tiempo.

5.10.2 Funcionamiento de la App

Una vez realizada la introducción sobre los fundamentos esenciales para los cuales se ha llevado a cabo la creación de una aplicación, se procede a explicar el funcionamiento de esta, detallando los diferentes elementos de la interfaz que esta posee. La App diseñada cuenta con una interfaz gráfica totalmente intuitiva y minimalista, lo cual facilita la interacción del usuario. Tal y como se puede apreciar en la (Figura 5.32), la interfaz presenta una estructura ordenada de elementos interactivos, que permiten una navegación fluida y accesible. Esto no solo mejora la experiencia del usuario, sino que también contribuye al uso de la aplicación, asegurando que se pueda aprovechar al máximo todas las características que ofrece.

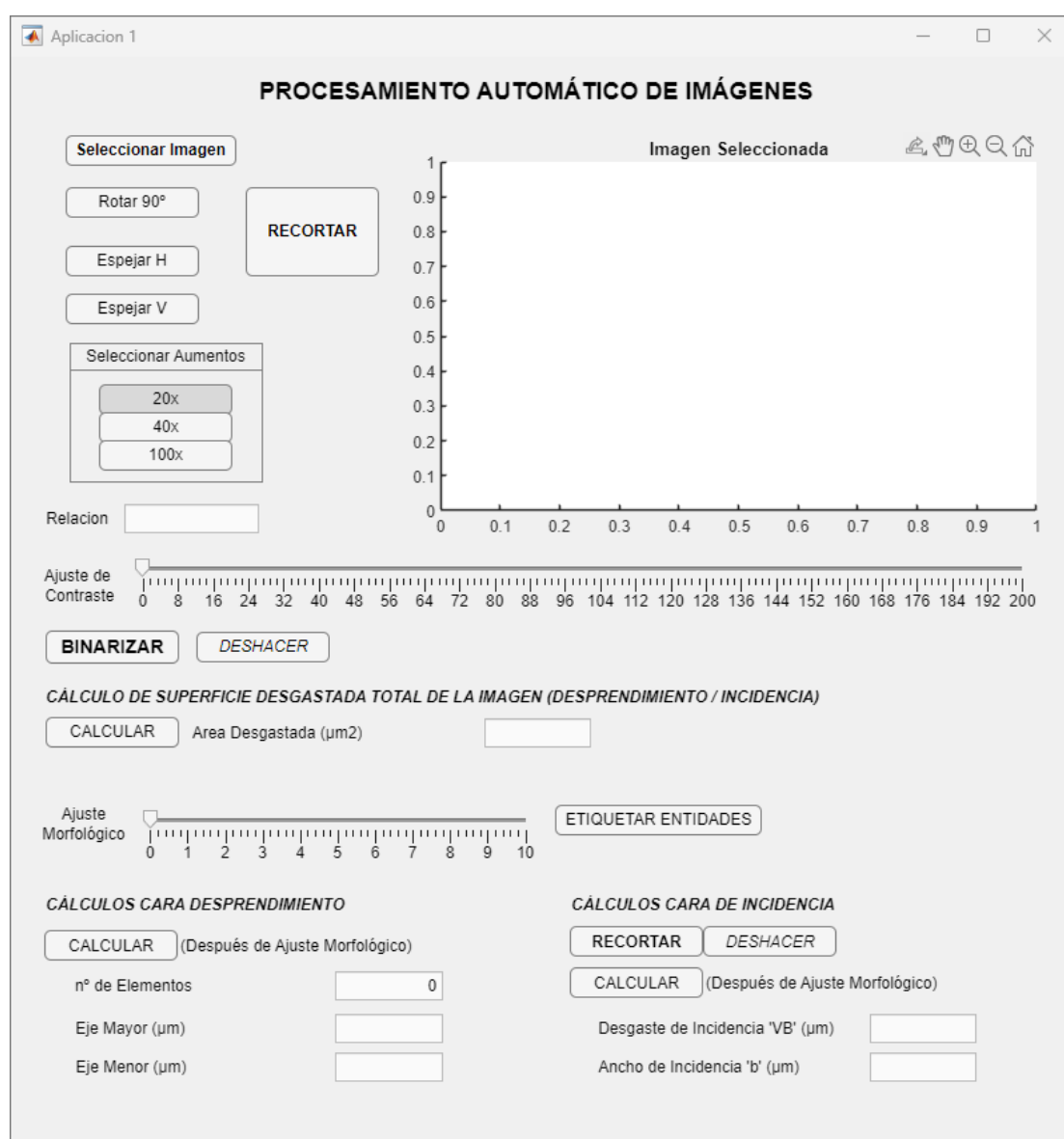


Figura 5.32 - Interfaz general de la App.

Para simplificar la comprensión detallada de las características y el funcionamiento de la aplicación, se ha dividido su interfaz en distintas zonas como se indica en la (Figura 5.33).

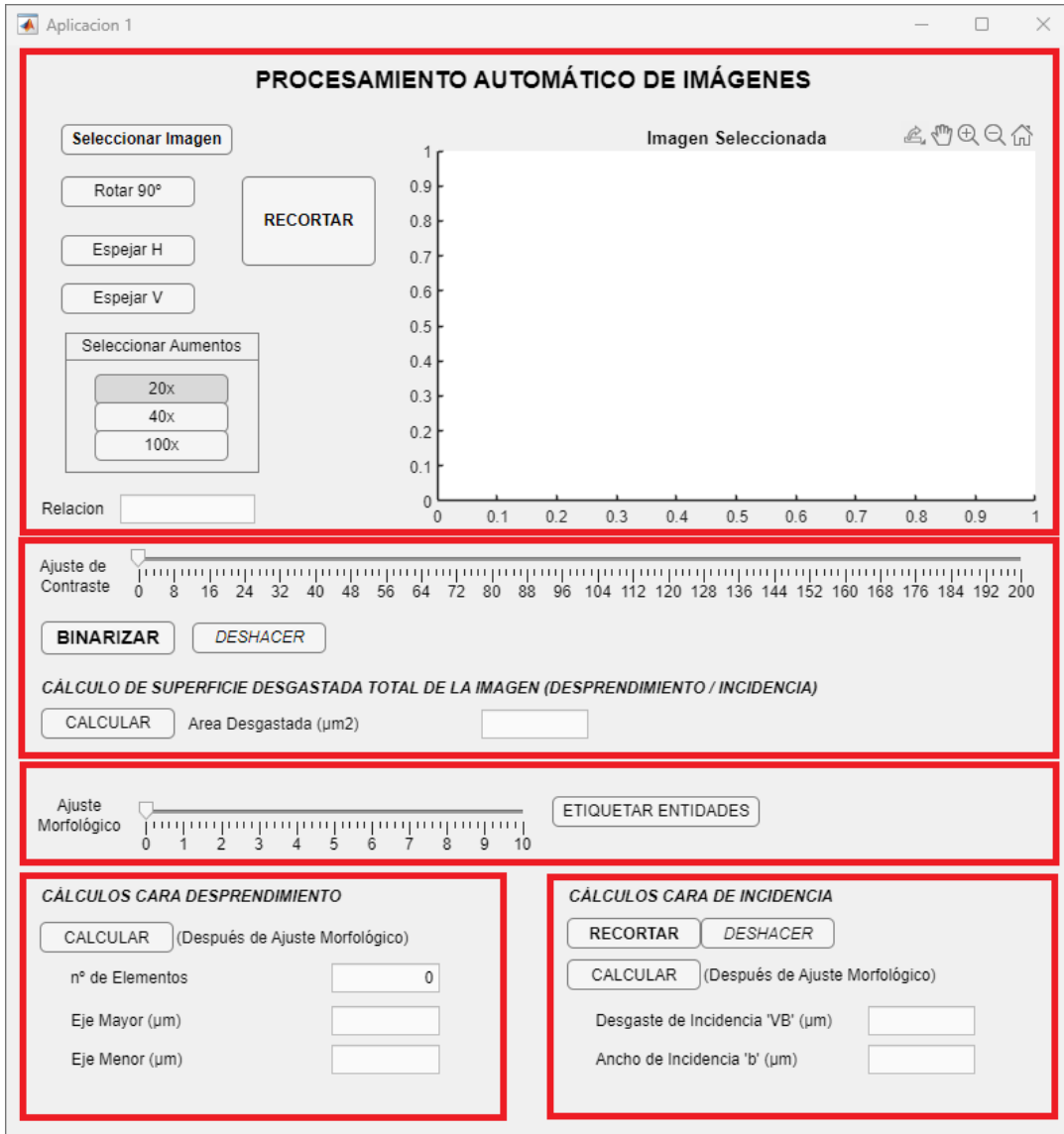
En primer lugar, la Zona 1 se ha destinado a la selección y visualización de la imagen a estudiar, que permanecerá dibujada junto con los cambios de procesamiento que se hagan, permitiendo además una primera configuración rápida sobre aspectos de orientación y recorte de la imagen, para ajustar a gusto del operario. Además, se encuentra la opción de predefinir el número de aumentos según hayan sido seleccionados previamente en el microscopio y el indicativo de la relación que realiza para las medidas futuras.

Seguido, la Zona 2 se ha enfocado en el ajuste de contraste de la imagen ya importada, y el paso al binarizado de la imagen, que transforma toda la matriz de valores de los píxeles de la imagen en 1 y 0. También se da el primer dato fundamental obtenido a partir de dicho procesado, que es el área afectada por desgaste (área de píxeles blancos) de la imagen en micrómetros cuadrados (μm^2).

A continuación, la Zona 3 tiene como objetivo realizar operaciones de ámbito morfológico, paso previo fundamental para simplificar el número de entidades detectadas por el software y facilitar las futuras mediciones, así como facilitar su observación en la interfaz de imagen. Además, cuenta con la capacidad de ver cuantas entidades han quedado después de la transformación, así como de etiquetarlas.

La Zona 4 está destinada al cálculo de los parámetros geométricos de desgaste en la cara de desprendimiento de la plaquita. Posee un botón de cálculo correspondiente, con el cual sacar valores de ancho y profundidad de desgaste de la herramienta.

Por último, la Zona 5 está destinada al cálculo de los parámetros geométricos de desgaste en la cara de incidencia de la plaquita. Similar a la Zona 4, esta recoge resultados del desgaste de incidencia y anchura. Cuenta con una función de recorte para tomar una mejor zona de incidencia.



ZONA 4

ZONA 5

Figura 5.33 - Zonas de división de la interfaz de la App.

A continuación, se explica el funcionamiento de todas las herramientas disponibles de cada una de estas zonas mencionadas, con el objetivo de proporcionar al operario una comprensión absoluta de cómo aprovechar al máximo la aplicación. Conforme se explore cada zona, se hará hincapié en funcionalidades específicas las cuales permiten llevar a cabo análisis precisos y eficientes en los distintos contextos de procesamiento de imágenes de viruta.

Zona 1. Selección de Imagen

En primer lugar, en la interfaz se encuentra el botón de “Seleccionar Imagen”, fundamental para el comienzo del estudio. Este botón despliega el navegador de archivos de Windows y permite al operario seleccionar la imagen deseada desde la comodidad de su dispositivo. Las imágenes aceptadas deben ser en formato “.png”. En la parte derecha de la Zona 1 se encuentra una ventana de visualización donde se muestra el estado de la imagen en todo momento de manera inmediata tras su cambio en el procesado.

Justo debajo de “Seleccionar Imagen” se encuentran las distintas funciones de edición con el fin de cambiar de orientación la imagen para que el operario mantenga siempre un enfoque único en todas las plaquitas estudiadas. Las funciones de edición son “Rotar 90°”, que permite al usuario girar la imagen seleccionada en incrementos de 90°, “Espejar Horizontalmente”, que ofrece la posibilidad de crear una versión espejada de la imagen respecto a su eje horizontal, “Espejar Verticalmente”, que da la posibilidad de crear una versión espejada de la imagen respecto a su eje vertical y “Recortar”. Esta última supone de gran importancia ya que, si se desea estudiar zonas concretas de la imagen, el binarizado es más efectivo cuando la imagen seleccionada está más focalizada (Figura 5.34).

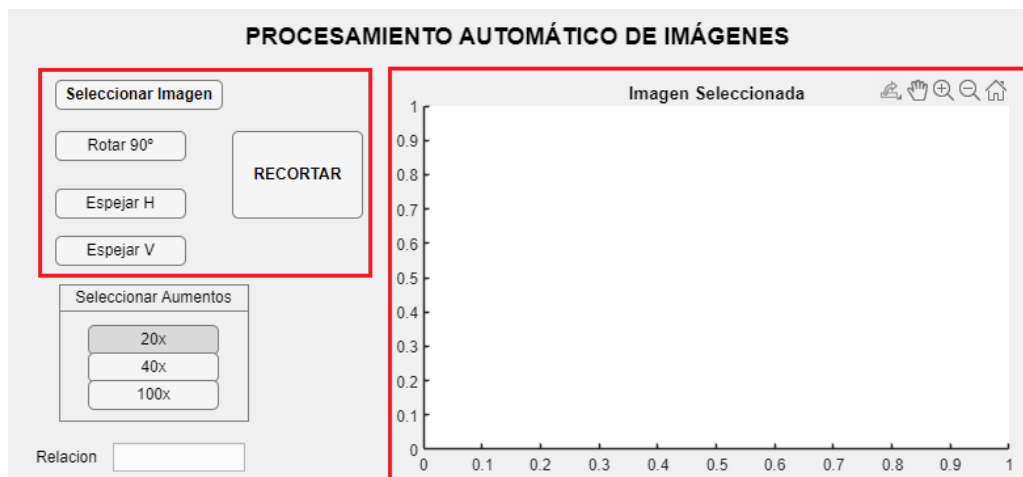


Figura 5.34 - Componentes de selección y ajustes de la imagen.

Por último, se encuentra el menú de “Seleccionar Aumentos”, el cual permite seleccionar los aumentos de la imagen según corresponda, acompañado de un cuadro que indica la relación numérica que se aplica a las futuras conversiones de parámetros geométricos (Figura 5.35).

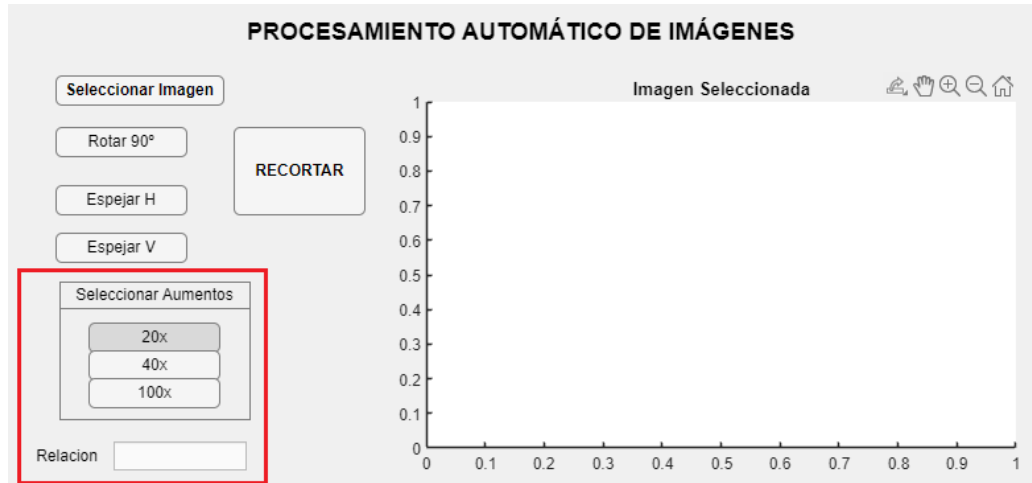


Figura 5.35 - Selección de aumentos y relación.

Zona 2. Binarizado y Área de Desgaste

En primer lugar, se encuentra la deslizador de “Ajuste de Contraste”, la cual calcula la apertura morfológica de la imagen seleccionada y, después, la resta de la imagen original, pudiendo así controlar la mejora del contraste de la imagen a voluntad propia del operario. Justo debajo se encuentra el botón esencial del procesado denominado “Binarizar”, cuya función es realizar el binarizado de la imagen sin ningún tipo de operación morfológica previa, para conservar todos los valores encontrados de desgaste, totalmente detallados. La función de binarizado simple sirve para tener una aproximación bastante cercana del área total de desgaste que las herramientas han sufrido en sus respectivas caras (Figura 5.36).

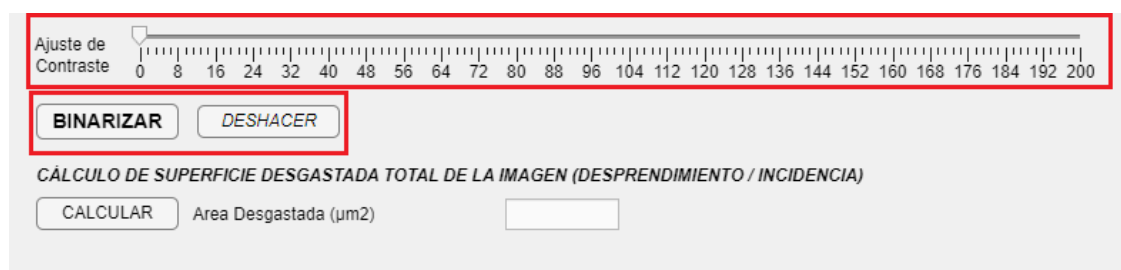


Figura 5.36 - Deslizador de ajuste de contraste y botones de binarizar y deshacer binarizado.

El botón “Calcular” que se encuentra justo debajo (Figura 5.37), procesa la cantidad de píxeles blancos encontrados (zona desgastada), y muestra, con la relación mencionada anteriormente, la medición del área en micrómetros cuadrados (μm^2).

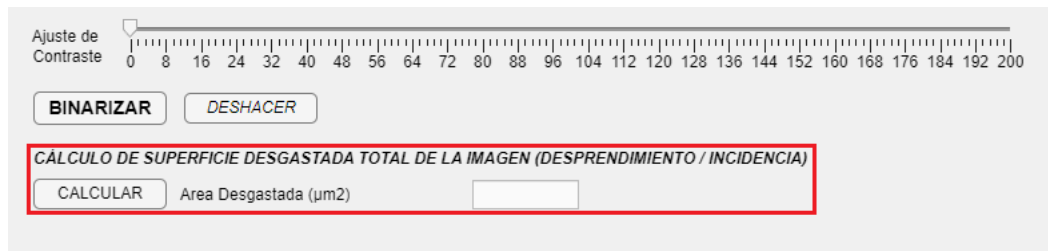


Figura 5.37 - Apartado de cálculo de superficie afectada por desgaste.

Zona 3. Aplicaciones Morfológicas

En dicha zona, se encuentra la deslizadera “Ajuste Morfológico” que tiene como objetivo configurar los elementos estructurales morfológicos planos, con el fin de realizar operaciones morfológicas de dilatación, erosión, y relleno de huecos, para así obtener una imagen binarizada más compacta donde sea más sencillo para el programa identificar los futuros parámetros geométricos (Figura 5.38). Además de realizar dichas operaciones, la deslizadera aplica automáticamente un filtro de ruido para eliminar elementos granulares que se hayan formado por el binarizado en crudo anterior.

También se ha incorporado un botón denominado “Etiquetar Entidades” el cual abre una ventana emergente donde muestra el número de entidades concluyentes tras el ajuste morfológico, y la identificación de cada uno. Esta ventana sirve al usuario para saber si la configuración realizada es precisa o bien requiere de cambios para asimilar más una medición precisa.



Figura 5.38 - Deslizadera para el ajuste morfológico y botón para observar el número de entidades de la imagen.

Zona 4. Cara de Desprendimiento

Después de realizar el ajuste morfológico, el apartado de “Cálculos Cara de Desprendimiento” analiza el número de elementos que componen la imagen, y realiza la eliminación de todos ellos a excepción del que posea mayor área (Figura 5.39).

CÁLCULOS CARA DESPRENDIMIENTO

CALCULAR (Después de Ajuste Morfológico)

n° de Elementos

Eje Mayor (μm)

Eje Menor (μm)

Figura 5.39 - Botón de cálculo de la cara de desprendimiento.

Después toma todos los parámetros posibles y plasma en los recuadros de resultado restantes, la longitud de dos ejes en micrómetros (μm). Estos ejes representan los valores de la anchura de desgaste y la profundidad de desgaste en la cara de desprendimiento (Figura 5.40).



Figura 5.40 - Representación de los ejes mayores y menores en una acumulación de píxeles.

Dichos ejes con la representación del eje mayor y el eje menor de una elipse que conforma la entidad restante. Estos datos deben ser interpretados por el operario, ya que dependiendo del uso de qué cara de incidencia que se le ha dado a la plaquita y la orientación de la propia imagen, la forma de identificar los valores puede ser la contraria. Al calcular, se abre una ventana emergente que muestra gráficamente los parámetros usados como en (Figura 5.41).

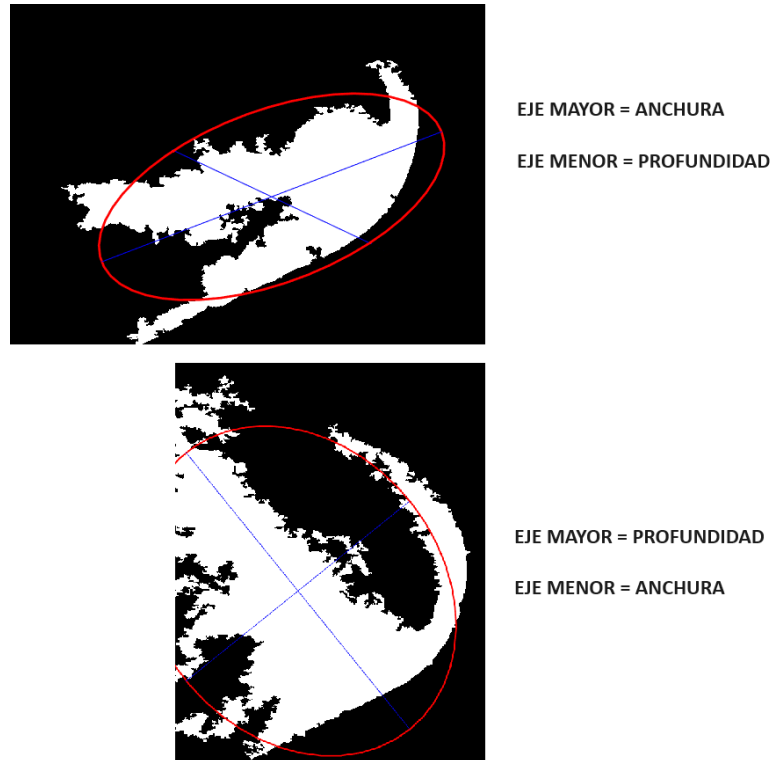


Figura 5.41 - Distintas interpretaciones de eje mayor y eje menor.

CÁLCULOS CARA DESPRENDIMIENTO

(Después de Ajuste Morfológico)

nº de Elementos	<input type="text" value="0"/>
Eje Mayor (μm)	<input type="text"/>
Eje Menor (μm)	<input type="text"/>

Figura 5.42 - Muestra de resultados de la cara de desprendimiento.

Zona 5. Cara de Incidencia

Similar a la funcionalidad de la Zona 4, la Zona 5 se ha desarrollado para realizar los cálculos de los parámetros en la cara de incidencia de la plaquita. En este apartado el primer botón denominado “Recortar” permite realizar una selección concreta de la imagen binarizada para un estudio más preciso. A su derecha, el botón “Deshacer” permite volver al binarizado completo por si es necesario hacer más recortes, o medir la totalidad de la imagen (Figura 5.43).

CÁLCULOS CARA DE INCIDENCIA

RECORTAR **DESHACER**

CALCULAR (Después de Ajuste Morfológico)

Desgaste de Incidencia 'VB' (μm)

Ancho de Incidencia 'b' (μm)

Figura 5.43 - Botones de recortar y deshacer recorte para la cara de incidencia binarizada.

Una vez hallada la zona, el botón denominado “Calcular” realiza una serie de procesos similares a la de la Zona 4 (Figura 5.44). Analiza el número de elementos que componen la imagen, y realiza la eliminación de todos ellos a excepción del que posea mayor área. Después aplica las conocidas “*Bounding Box*”, para plasmar en los marcos resultantes el desgaste máximo de incidencia encontrado (VB_{MAX}) y la anchura de la incidencia (b) en unidades de micrómetros (μm).

CÁLCULOS CARA DE INCIDENCIA

RECORTAR **DESHACER**

CALCULAR (Después de Ajuste Morfológico)

Desgaste de Incidencia 'VB' (μm)

Ancho de Incidencia 'b' (μm)

Figura 5.44 - Muestra de resultados de la cara de desprendimiento.

6 Resultados

6.1 Introducción

El objetivo de este capítulo es la visualización de los resultados obtenidos a partir del procesamiento digital de imágenes que se ha detallado en el capítulo 5. Se ha procedido a explicar cómo se han obtenido dichos parámetros automáticamente mediante el software de MatLab y se ha realizado una comparativa de los valores obtenidos mediante una metodología no automatizada utilizada por el grupo de investigación en desarrollos de trabajos previos. Es importante destacar que los resultados de los parámetros geométricos obtenidos en MatLab se miden por píxeles, por lo que es necesario convertirlos a unidades métrica del Sistema Internacional antes de realizar las comparativas. Para realizar dicha conversión, se ha utilizado ImageJ sobre una imagen tomada del microscopio, que cuenta con una escala métrica y cuyo número de aumentos es conocido (Figura 6.1).

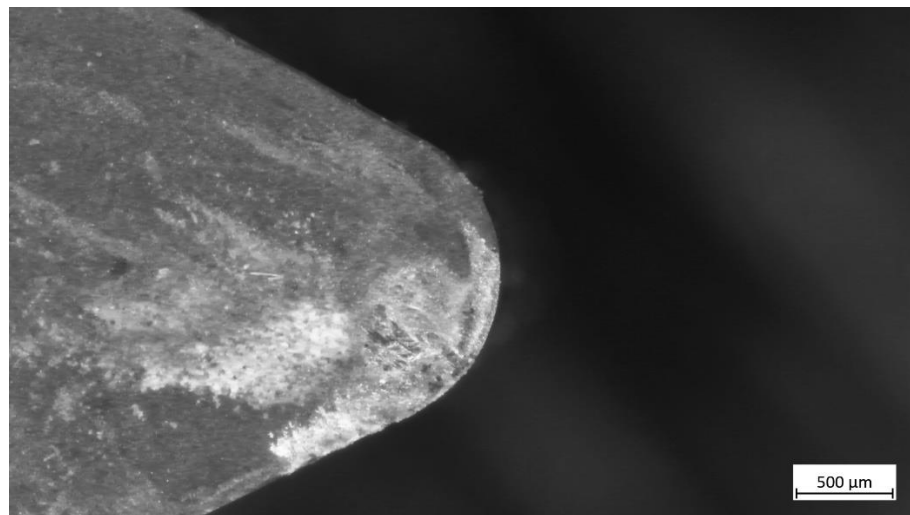


Figura 6.1 - Imagen tomada con el microscopio ZEISS Discovery V12.

A partir de esta imagen, de la cual se conoce que ha sido tomada a x20 aumentos, es posible obtener un factor de conversión de píxeles (px) a micrómetros (μm) para dicho número de aumentos, así como también para 40 y 100 aumentos, para tener así una cantidad de aumentos diferentes si se desea trabajar con la imagen de diferentes formas. Se ha obtenido un factor de conversión para cada número de aumentos (Figura 6.2).

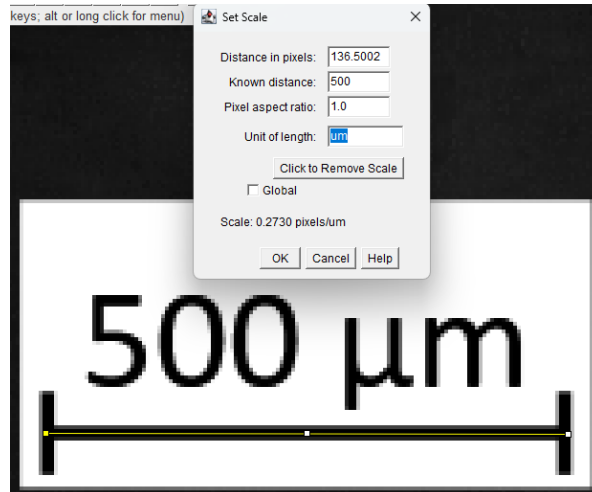


Figura 6.2 - Interfaz de ImageJ donde se muestran los datos de la conversión.

De este modo, son implementados en MatLab y es el propio operario el que selecciona a través de la interfaz de la app el número de aumentos con el que está trabajando para que los resultados sean convertidos correctamente de píxeles a micrómetros. Estos factores de conversión quedan reflejados en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1 - Factores de conversión de píxeles a micrómetros.

AUMENTOS	DISTANCIA (μm)	DISTANCIA (px)	RELACIÓN ($\mu\text{m}/\text{px}$)
x20	500	136,5	3,66
x40	500	273	1,83
x100	500	682,5	0,73

6.2 Cara de Desprendimiento

En la primera instancia se ha mostrado la obtención de los resultados de la cara de desprendimiento de una plaquita. Es este caso, se ha utilizado como ejemplo la cara de desprendimiento de una de las plaquitas *DCMT 11T308-F2 HX* de *SECO* [36] para el mecanizado de aleaciones de aluminio mostrada en el capítulo 5. No obstante, más adelante se muestra una comparación de resultados de distintas caras de desprendimiento de ambos tipos de plaquita y los parámetros de corte utilizados para cada plaquita. El resultado a obtener más importante es el área total de la superficie de la cara de desprendimiento que ha sido afectada por un desgaste debido a abrasión y/o a

adhesión del material mecanizado. También está el ancho y la profundidad de dicho desgaste a la que ha sido capaz de llegar.

6.2.1 Área de Desgaste

A la hora de mecanizar una pieza, esta sufre distintos tipos de desgaste tal y como se ha explicado en el capítulo 3. En la cara de desprendimiento, lo más común es encontrarse con desgaste por abrasión y por adhesión. Estos desgastes transforman las características geométricas de las herramientas y cambia la composición de material en la superficie de esta, llegando a causar modificaciones en sus propiedades de corte, y en la morfología de la viruta saliente de la pieza mecanizada.

La obtención del área desgastada se ha realizado a través de una medición de píxeles blancos totales en la imagen con la función “*bwarea*”, después de un binarizado previo de la imagen en blanco y negro a la que se le aplicó una mejora del contraste (Figura 6.3).

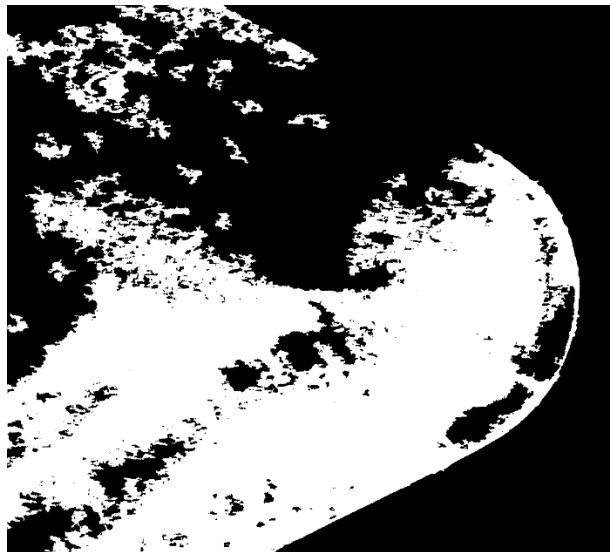


Figura 6.3 - Área binarizada del desgaste de la cara de desprendimiento.

6.2.2 Ancho y Profundidad de Desgaste

El ancho de desgaste puede ser definido como la distancia que va desde la punta de la herramienta hasta el extremo más alejado afectado por desgaste, siendo paralelo al contorno del borde de la plaquita.

La profundidad de desgaste es definida como la distancia máxima desde el borde de la cara de incidencia que ha trabajado durante el mecanizado de la pieza, hasta el extremo más alejado afectado por el desgaste, siendo perpendicular al contorno del borde de la plaquita.

Como se explicó en el capítulo 5, se realizó un ajuste morfológico para simplificar la imagen binarizada, y así obtener con mayor facilidad mediciones como esta. Se obtuvieron los parámetros de la zona afectada de la cara de desprendimiento gracias a la función “*regionprops*”, que almacena en una estructura de MatLab varios parámetros como áreas, perímetros, centroides, redondez, “*bounding box*”, etc. Entre ellas, se encuentran el “*MajorAxisLength*” y “*MinorAxisLength*”, que es la longitud del eje mayor y menor respectivamente de una elipse que contiene los mismos segundos momentos normalizados que la región (Figura 6.4). Siguiendo estas definiciones se es capaz de sacar ambos parámetros de desgaste al mismo tiempo.

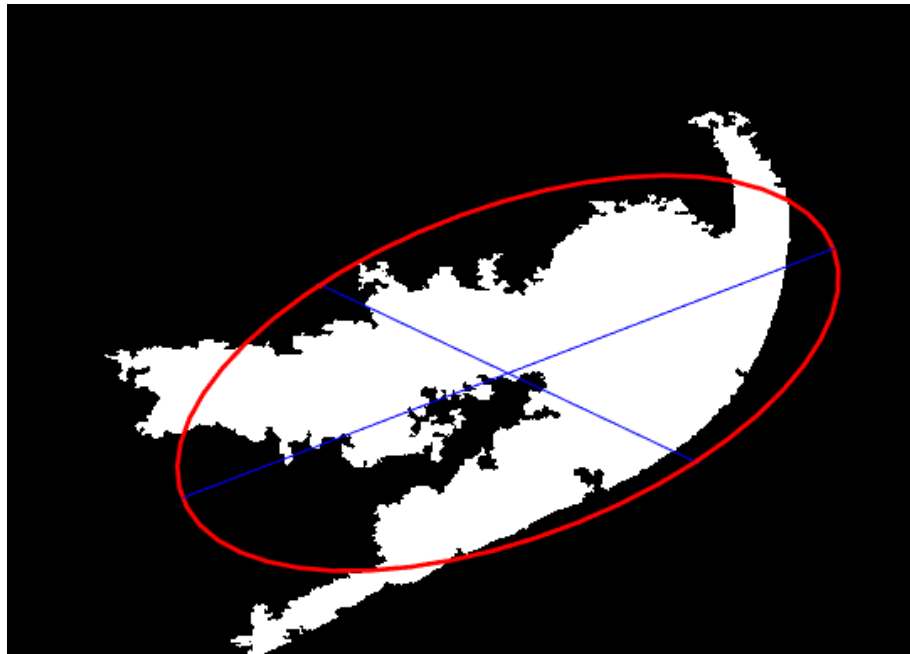


Figura 6.4 - Ancho y Profundidad del área de desgaste de la cara de desprendimiento definida por una elipse y sus ejes.

6.3 Cara de Incidencia

Para el caso de la cara de incidencia, también se pueden obtener algunos resultados, y por ello se creó un apartado del programa específico para trabajar con esta cara de la plaquita. Los resultados que se buscan extraer de esta cara son el desgaste máximo de incidencia (VB_{MAX}) y el ancho de desgaste (b) (Figura 6.5).

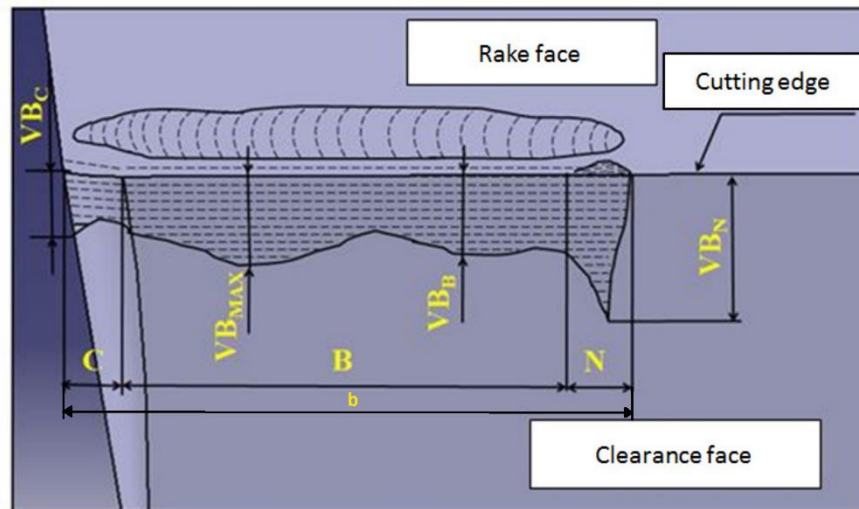


Figura 6.5 - Representación de distintos parámetros geométricos, entre ellos la longitud máxima de desgaste (VB_{MAX}) y la anchura de desgaste (b).

6.3.1 Desgaste Máximo de Incidencia (VB_{MAX})

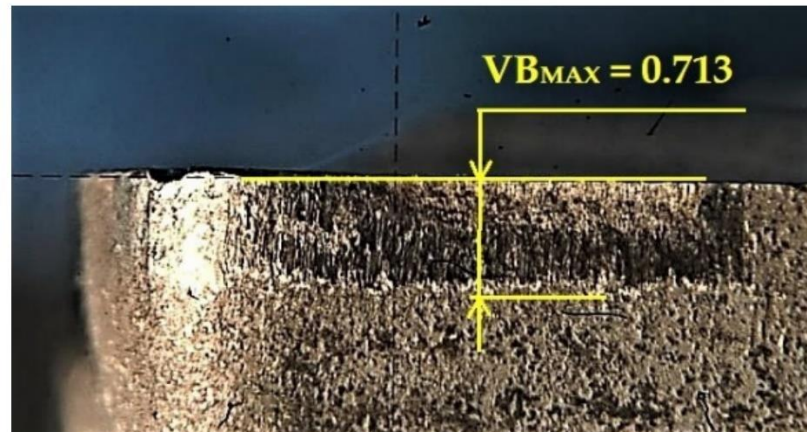


Figura 6.6 - Representación del desgaste máximo de incidencia en una herramienta.

Para hallar la manera más aproximada de conseguir el desgaste de incidencia máximo de la cara de incidencia, se ha procedido a las ya mencionadas “Bounding Box”, que determinan el espacio bidimensional de la entidad, en un área rectangular, limitada verticalmente por el tope de la cara de incidencia y el máximo de desgaste de dicha cara. Así, gracias a la altura de la caja, podemos tener una medición aproximada del desgaste, como se muestra en la Figura 6.7; siguiendo la definición dada sobre la longitud de desgaste de incidencia.



Figura 6.7 - Obtención de la altura de desgaste de incidencia (VB_{MAX}) a partir de su "Bounding Box".

6.3.2 Ancho de Desgaste (b)

Similar al método anterior, se ha hallado la manera más aproximada de conseguir el ancho del desgaste de incidencia (b), con la misma "Bounding Box". Así, gracias al ancho de la caja, podemos tener una medición aproximada del desgaste (Figura 6.8), siguiendo la definición dada sobre el ancho de desgaste de incidencia.

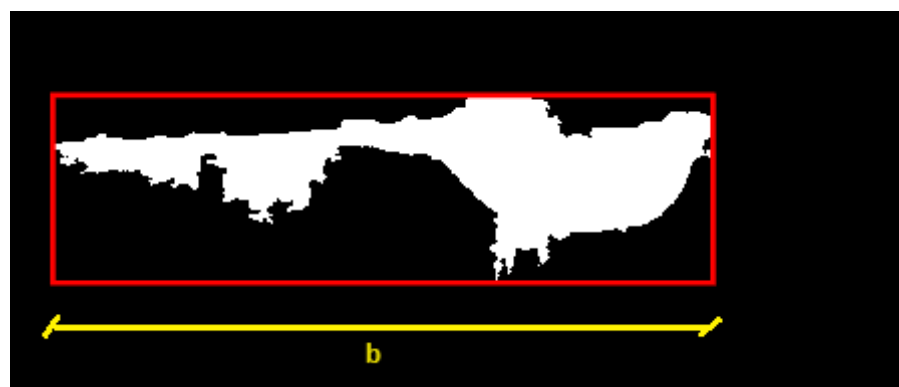


Figura 6.8 - Obtención de la anchura de desgaste (b) de incidencia a partir de su "Bounding Box".

6.4 Comparación de Resultados

En este apartado se realizará una comparativa de los resultados obtenidos automáticamente mediante la generación del algoritmo creado en MatLab con los mismos resultados obtenidos mediante metodología no automatizada utilizada en trabajos previos. Es uno de los apartados más importantes de todo el trabajo, si no el que más, y tiene como fin verificar si los resultados

obtenidos hasta el momento se asemejan a los valores reales con los que idealmente deberían coincidir.

El proceso de comparación de resultados se ha llevado a cabo siguiendo la siguiente estructura. En primer lugar, se ha realizado la evaluación comparativa de los resultados correspondientes a la plaquita *DCMT 11T308-F2 HX* de *SECO* que trabajó mecanizando aleaciones ligeras de aluminio, abarcando el área afectada y su respectiva anchura y profundidad. Este análisis proporcionará una visión completa del efecto de mecanizado en seco de una pieza de aleación ligera de aluminio frente a este tipo de plaquitas. A continuación, se procedió a mostrar otra comparativa, esta vez con las plaquitas *DCMT 11T308-UM 1115* de *SandVik*, siguiendo la misma estructura. Este enfoque permite un análisis preciso y ordenado de las propiedades de estas aleaciones.

Por último, se estudiará la comparación de resultados de la cara de incidencia de la plaquita *DCMT 11T308-UM 1115* de *SandVik*, que, al trabajar con aleaciones más duras, se puede observar las apreciaciones de desgaste en su cara de incidencia con muchísima más claridad. Este último análisis proporcionará el análisis de altura y ancho de desgaste en dicha cara.

6.4.1 Plaquita DCMT 11T308-F2 HX de SECO. Cara de Desprendimiento

Área de Desgaste

En primer lugar, se ha llevado a cabo una comparación de los valores de área de desgaste afectada de la cara de desprendimiento de la plaquita para varias velocidades de avances mencionadas en los datos de partida en el capítulo.

V_c (m/min)	f (mm/r)	$a_p = 1$ mm
80	0.05	
	0.10	
	0.15	
	0.20	

Figura 6.9 - Imágenes SOM (x20) de la cara de desprendimiento de las plaquitas usadas para mecanizado de aleación de aluminio, con sus respectivos parámetros de corte.

Los resultados de este estudio se encuentran detallados en las (Figuras 6.10 – 6.13), la cual presenta de manera clara y concisa los datos recopilados, permitiendo una evaluación de la precisión de ambas metodologías. Cabe destacar que los resultados mostrados en la Tabla 6.2, para la plaquita *DCMT 11T308-F2 HX* de *SECO* se corresponden a una velocidad de corte de 80 m/min.

Tabla 6.2 - Datos comparativos correspondientes al área de desgaste en la cara de desprendimiento de una plaquita *DCMT 11T308-F2 HX* de *SECO*.

ÁREA DE DESGASTE		
Avance (mm/rev)	Equipo (μm)	APP (μm)
0,05	1,44	1,87
0,1	2,23	2,15
0,15	2,35	3,19
0,20	2,94	3,40

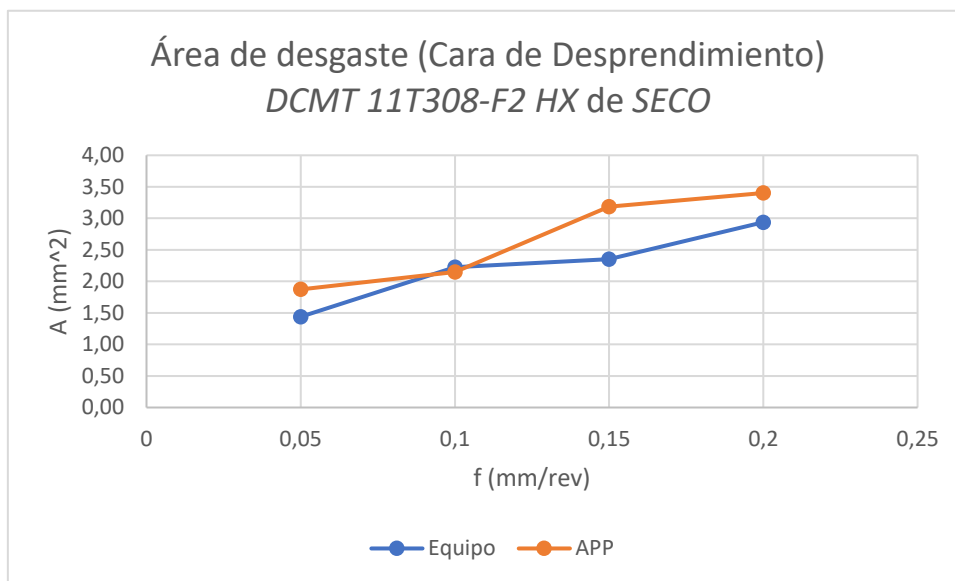


Figura 6.10 - Gráfica comparativa de área de desgaste en la cara de desprendimiento de una plaquita *DCMT 11T308-F2 HX* de *SECO*.

En la gráfica anterior, se representan los valores de forma visual que compara la evolución del área de desgaste a medida que aumenta el avance, siendo la curva de color azul la correspondiente a los datos tomados por la metodología no automatizada, y la curva naranja la que representa los datos tomados por el software de MatLab (se han usado los mismos colores para el resto de gráficas). Aunque las curvas muestran valores similares, estas no llegan a converger

completamente. El motivo principal por el cual no convergen ambas gráficas es porque la medición de la superficie desgastada de la cara de desprendimiento por métodos manuales puede conllevar a la ignorancia de pequeñas zonas. La acumulación de esas pequeñas zonas erosionadas puede variar la medición significativamente.

La localización de las zonas desgastadas puede definirse conociendo el comportamiento del material de la plaquita. Al tratarse de aleación de aluminio, el filo y la cara de desprendimiento sufren del fenómeno de filo recrecido (BUE) y capa adherida (BUL). La aparición de estas incorporaciones origina alteraciones en la geometría inicial de la herramienta, dando lugar al aumento del ángulo de desprendimiento efectivo y del ángulo de deslizamiento. Además, se produce un aumento de espesor de viruta indeformada, así como una acción de recalado de la superficie mecanizada.

Dependiendo de cómo de esparcida esté ese área desgastada, la comparativa de los resultados puede ser más o menos precisa. Cabe destacar que a medida que aumenta la velocidad de avance del mecanizado, se produce una mayor área de desgaste en toda la plaquita (Figura 6.11).

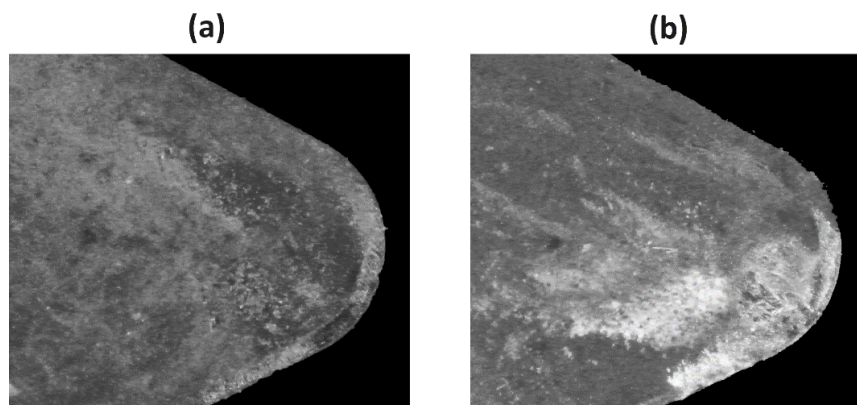


Figura 6.11 - Diferencia entre las áreas afectadas en una cara de desprendimiento a bajas (a) y altas (b) velocidades de avance.

Anchura de Desgaste

Tabla 6.3 - Datos comparativos correspondientes al ancho de desgaste en la cara de desprendimiento de una plaquita DCMT 11T308-F2 HX de SECO.

ANCHO DE DESGASTE		
Avance (mm/rev)	Equipo (μm)	APP (μm)
0,05	4.617,03	3.334,61
0,1	4.380,05	4.531,30
0,15	2.176,61	2.835,61
0,2	3.099,87	2.538,31

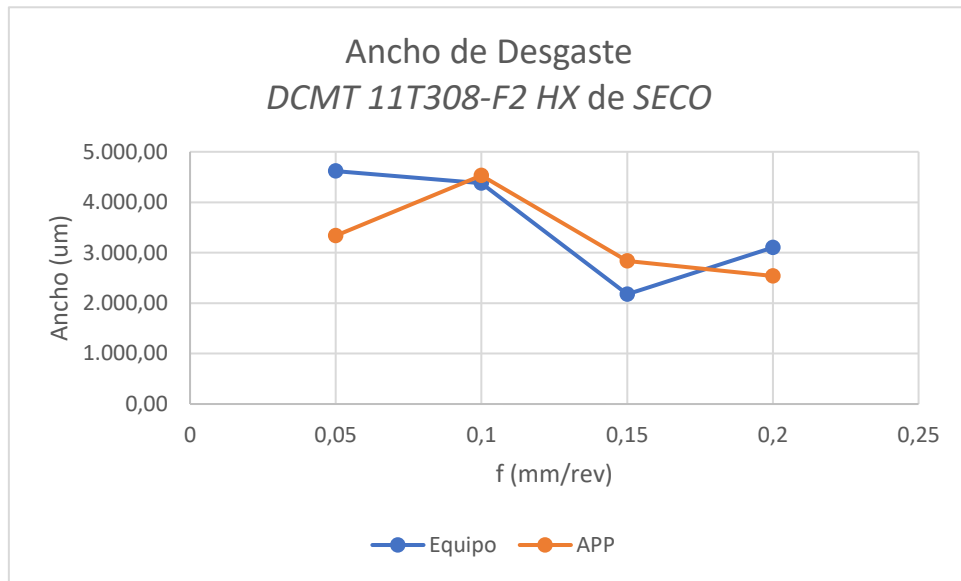


Figura 6.12 - Gráfica comparativa de ancho de desgaste en la cara de desprendimiento de una plaquita DCMT 11T308-F2 HX de SECO.

En relación al ancho de desgaste, se ha observado que la diferencia entre los resultados obtenidos por métodos no automatizados y los obtenidos en la APP son muy similares, teniendo en cuenta que los márgenes entre valores son de micrómetros. Se aprecia un valor máximo de desgaste de la herramienta cuando los valores de avance son bajos, debido a que cuanto más lenta es la velocidad de avance, existe un rozamiento de la viruta más duradero contra la cara de desprendimiento.

Profundidad de Desgaste

Tabla 6.4 - Datos comparativos correspondientes a la profundidad de desgaste en la cara de desprendimiento de una plaquita DCMT 11T308-F2 HX de SECO.

PROFUNDIDAD DE DESGASTE		
Avance (mm/rev)	Equipo (µm)	APP (µm)
0,05	2.107,27	2.621,97
0,1	2.325,26	2.128,95
0,15	2.559,43	4.800,22
0,2	4.018,11	4.727,02

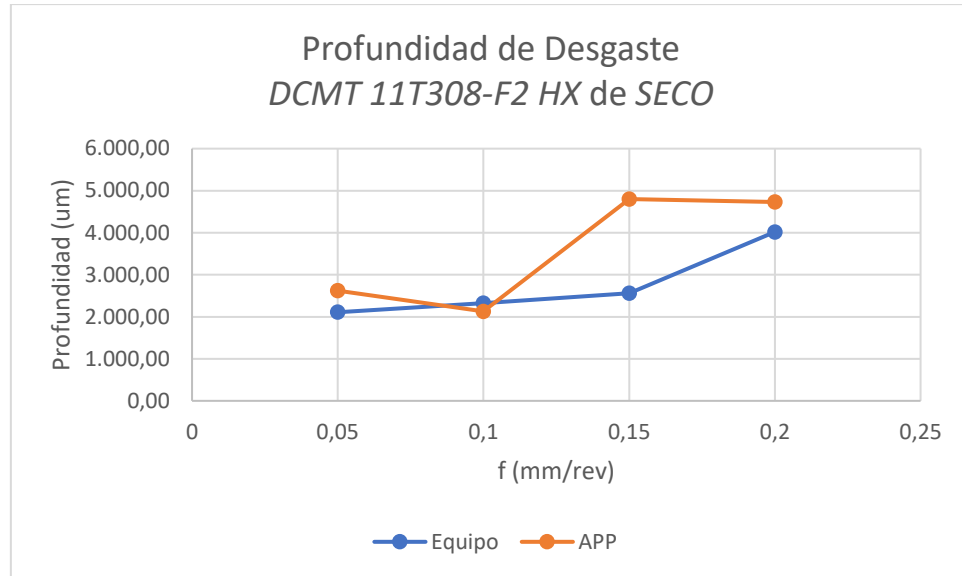


Figura 6.13 - Gráfica comparativa de profundidad de desgaste en la cara de desprendimiento de una plaquita DCMT 11T308-F2 HX de SECO.

En lo que respecta a la profundidad de material adherido o desgastado por abrasión de la cara de desprendimiento por la fricción continua de la viruta saliente, podemos observar una progresión ascendente con respecto al avance de corte. Cabe resaltar que la comparativa de valores de profundidad en el parámetro de avance de 0,15 mm/rev se distancia significativamente. Esto puede deberse a un caso puntual donde las aplicaciones morfológicas de la App han omitido grandes partes del área desgastada a la hora de simplificar las entidades, lo que puede resultar en una medición no del todo correcta.

6.4.2 Plaquita DCMT 11T308-UM 1115 de SandVik. Cara de Desprendimiento

Área de Desgaste

Al igual que en el estudio anterior, se ha llevado a cabo una comparación de los valores de área de desgaste afectada de la cara de desprendimiento de la plaquita para varias velocidades de avances mencionadas en los datos de partida en el capítulo, esta vez para la plaquita de serie DCMT 11T308-UM 1115 de SandVik.

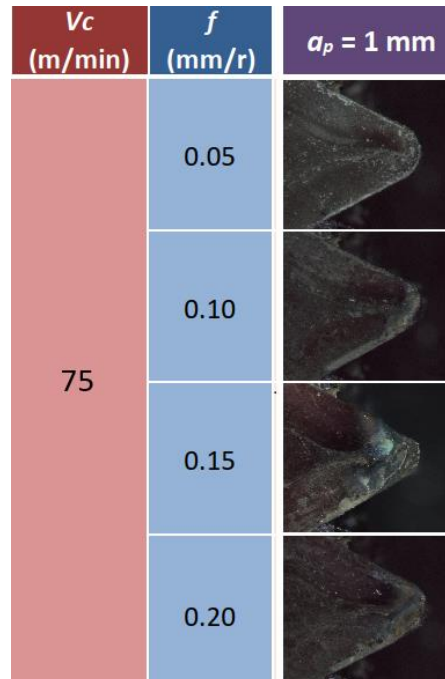


Figura 6.14 - Imágenes SOM (x20) de la cara de desprendimiento de las plaquitas usadas para mecanizado de aleación de titanio, con sus respectivos parámetros de corte.

Los resultados de este estudio se encuentran detallados en las (Figuras 6.15 – 6.18), la cual presenta de manera clara y concisa los datos recopilados, permitiendo una evaluación de la precisión de ambas metodologías. Estas mediciones que se recopilan en la Tabla 6.5 se han realizado con la correspondiente velocidad de corte de 75 m/min.

Tabla 6.5 - Datos comparativos correspondientes al área de desgaste en la cara de desprendimiento de una plaquita DCMT 11T308-UM 1115 de SandVik.

ÁREA DE DESGASTE		
Avance (mm/rev)	Equipo (μm)	APP (μm)
0,05	1,16	1,61
0,1	3,13	3,38
0,15	3,25	3,37
0,2	4,67	4,61

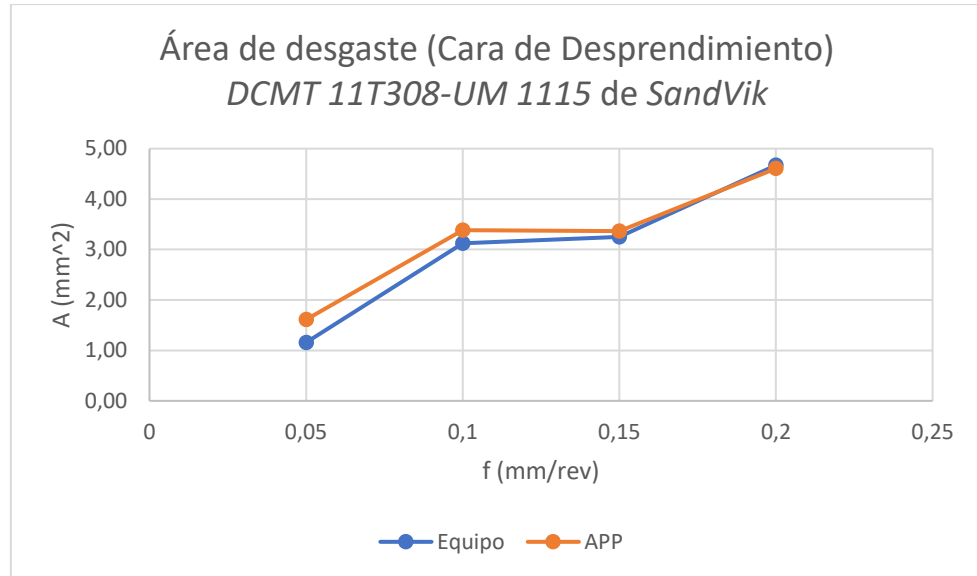


Figura 6.15 - Gráfica comparativa de área de desgaste en la cara de desprendimiento de una plaquita DCMT 11T308-UM 1115 de SandVik.

Se puede observar que, al igual que el caso de la plaquita anterior, el área desgastada de la plaquita aumenta su tamaño conforme aumenta la velocidad de avance en el proceso de mecanizado. Uno de los principales problemas de esta metodología a la hora de tomar las imágenes con el microscopio ZEISS Discovery V12, y procesar posteriormente dicha imagen, es la nula capacidad de identificar qué tipo de fenómeno está afectando al desgaste de la herramienta, pues partiendo de que en la cara de desprendimiento pueden encontrarse fenómenos de adhesión de material y de abrasión del material, el programa los reconoce simplemente por desgaste de cualquier tipo. Por la composición de la aleación de titanio que se está mecanizando, y las características de la plaquita que figuran en el capítulo 5, podemos deducir que en este caso gran parte del desgaste es causado por abrasión (Figura 6.16).

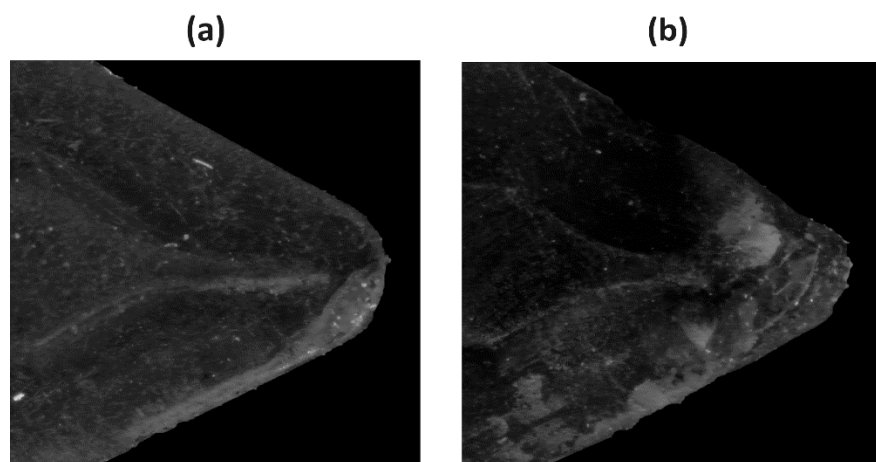


Figura 6.16 - Diferencia entre las áreas afectadas en una cara de desprendimiento a bajas (a) y altas (b) velocidades de avance.

Anchura de Desgaste

Tabla 6.6 - Datos comparativos correspondientes al ancho de desgaste en la cara de desprendimiento de una plaquita DCMT 11T308-UM 1115 de SandVik.

ANCHO DE DESGASTE		
Avance (mm/rev)	Equipo (μm)	APP (μm)
0,05	3.043,68	3.964,94
0,1	3.077,84	3.882,00
0,15	3.787,40	4.165,27
0,2	3.555,38	3.621,60

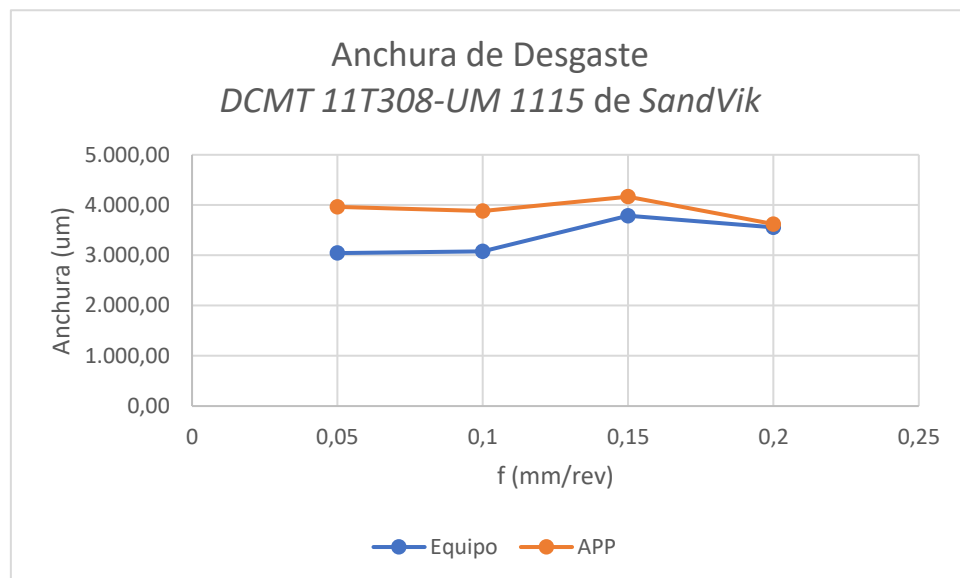


Figura 6.17 - Gráfica comparativa de anchura de desgaste en la cara de desprendimiento de una plaquita DCMT 11T308-UM 1115 de SandVik.

Gracias a la gráfica podemos observar que la anchura de desgaste de la cara de desprendimiento de la plaquita permanece bastante uniforme conforme aumenta la velocidad de avance.

Profundidad de Desgaste

Tabla 6.7 - Datos comparativos correspondientes a la profundidad de desgaste en la cara de desprendimiento de una plaquita DCMT 11T308-UM 1115 de SandVik.

PROFUNDIDAD DE DESGASTE		
Avance (mm/rev)	Equipo (μm)	APP (μm)
0,05	951,84	1.038,24
0,1	1.928,30	2.379,00
0,15	1.653,80	1.736,03
0,2	1.764,58	1.827,16

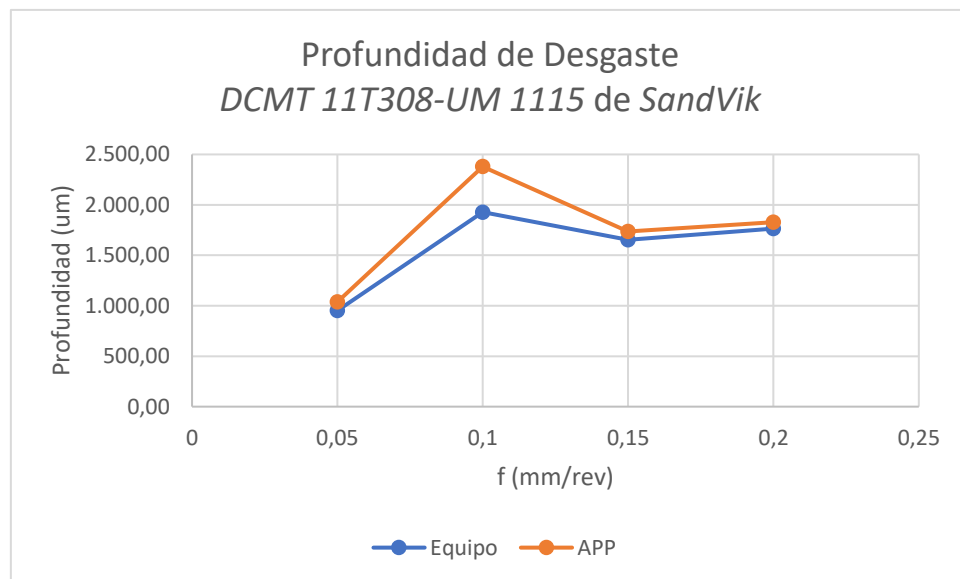


Figura 6.18 - Gráfica comparativa de profundidad de desgaste en la cara de desprendimiento de una plaquita DCMT 11T308-UM 1115 de SandVik.

6.4.3 Plaquita DCMT 11T308-UM 1115 de SandVik. Cara de Incidencia

El desgaste de la plaquita de aleación de titanio a través del proceso de mecanizado es mucho más pronunciado, debido a que este tipo de plaquitas trabaja con fuerzas de cortes más elevadas y los fenómenos de abrasión son los principales causantes de desviaciones geométricas en las piezas. Al contrario que en las plaquitas anteriores, las herramientas de SandVik tienen una profundidad de cráter existente, acto del constante rozamiento de la viruta expulsada. Al no haber herramientas

suficientes para poder medir este parámetro de desgaste, el ancho máximo de incidencia se vuelve nuestro factor fundamental para determinar la vida útil de estas herramientas.

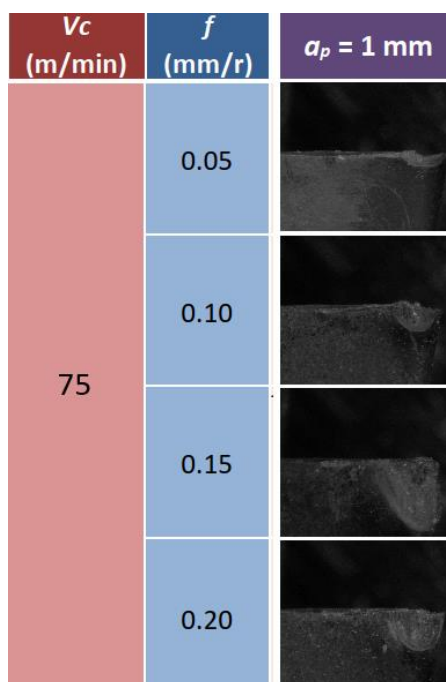


Figura 6.19 - Imágenes SOM (x20) de la cara de incidencia de las plaquitas usadas para mecanizado de aleación de titanio, con sus respectivos parámetros de corte.

Ancho de Desgaste máxima (VB_{MAX})

Los resultados de este estudio se encuentran detallados en las (Figuras 6.20 y 6.22), la cual presenta de manera clara y concisa los datos recopilados, permitiendo una evaluación de la precisión de ambas metodologías. Cabe destacar que los resultados mostrados en la Tabla 6.2, para la plaquita *DCMT 11T308-F2 UM 1115 de SandVik* se corresponden a una velocidad de corte de 75 m/min.

Tabla 6.8 - Datos comparativos correspondientes al ancho máxima de desgaste (VB_{MAX}) en la cara de incidencia de una plaquita *DCMT 11T308-UM 1115 de SandVik*.

ANCHO DE DESGASTE DE INCIDENCIA (VB_{MAX})		
Avance (mm/rev)	Equipo (μ m)	APP (μ m)
0,05	460,63	519,70
0,1	1215,10	823,50
0,15	2010,80	2.050,00
0,2	1147,94	1.200,00

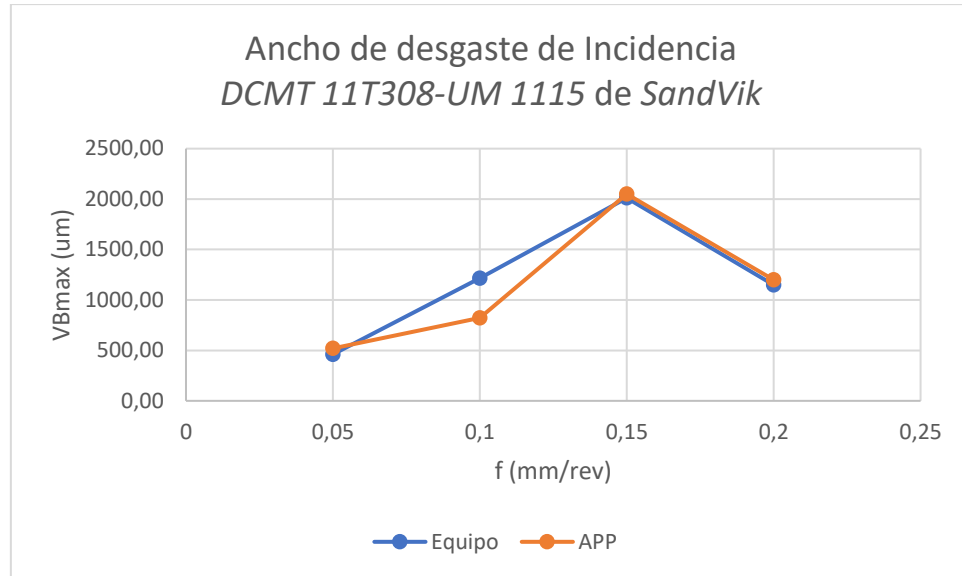


Figura 6.20 - Gráfica comparativa del ancho máxima de desgaste (VBMAX) en la cara de incidencia de una plaquita DCMT 11T308-UM 1115 de SandVik.

En algunos casos las caras de incidencia de las plaquitas se veían gravemente afectadas por un fallo catastrófico creado por filo recreado (Figura 6.18). Vemos en la Figura 6.17 como los valores de desgaste se acentúan a medida que aumenta la velocidad de avance de la máquina. Se ha de destacar la gran precisión de la aplicación con respecto a los resultados recogidos por metodología no automatizada. Esto se debe a que en dicha cara se resalta enormemente tras la toma de imágenes, la zona afectada, y es más fácil realizar el procesamiento de esta.

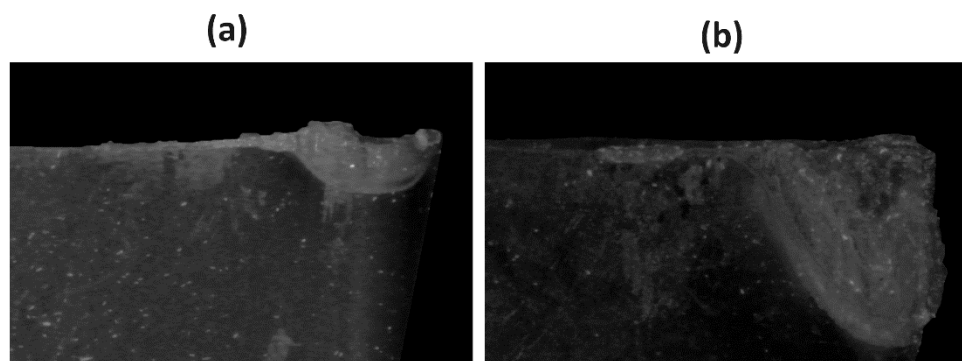


Figura 6.21 - Diferencias entre dos caras de incidencia. (a) desgaste progresivo (b) fallo catastrófico de la punta de la plaquita.

Profundidad de Desgaste (b)

Tabla 6.9 - Datos comparativos correspondientes a la profundidad máxima de desgaste (b) en la cara de incidencia de una plaquita DCMT 11T308-UM 1115 de SandVik.

PROFUNDIDAD DE DESGASTE (b)		
Avance (mm/rev)	Equipo (um)	APP (um)
0,05	3.018,64	3.111,000
0,1	3.187,17	3.247,000
0,15	3.143,55	3.276,000
0,2	3.230,78	3.290,000

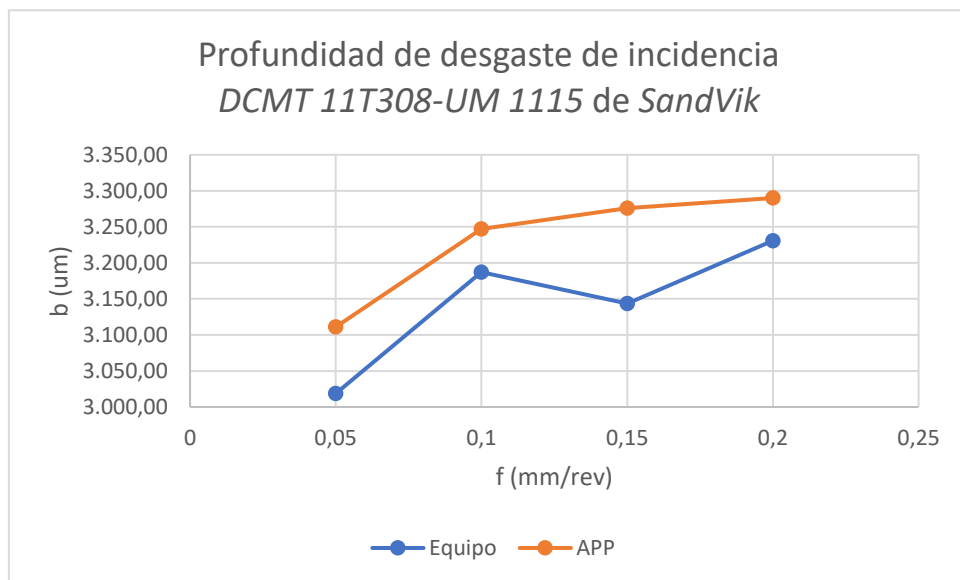


Figura 6.22 - Gráfica comparativa de la profundidad de desgaste (b) en la cara de incidencia de una plaquita DCMT 11T308-UM 1115 de SandVik.

7 Conclusiones.

Al comienzo de este trabajo de fin de grado, se propuso realizar una metodología experimental capaz de usar técnicas de microscopia óptica estereoscópica con el fin de analizar cuantitativamente el desgaste de herramientas de corte, con el fin de automatizar este proceso en los trabajos de investigación que está llevando a cabo el grupo TEP933. Así, tras los trabajos realizados, se destacan las siguientes conclusiones:

- Se ha realizado una puesta a punto del microscopio óptico estereoscópico ZEISS Discovery v12, y su software ZEN CORE v5, con el que se ha trabajado para hallar una forma más cómoda y eficaz de realizar tomas de imágenes de las diferentes caras que componen una plaquita de corte.
- Se ha diseñado y producido un soporte específico para dicho microscopio por fabricación aditiva gracias a las impresoras 3D y el material adquirido por el grupo TEP933 “Ingeniería de Fabricación” de la Universidad de Málaga. A dicho soporte se le ha complementado un portaherramientas no funcional mecanizado a partir de mecanizado CNC en el taller. Este portaherramientas tiene la función de sujetar la plaquita firmemente y centrar la pieza en el objetivo del microscopio.
- Se han implementado técnicas de imágenes EDF para poder extraer con claridad todo elemento tridimensional creado por desgaste de la plaquita, plasmándolo en la imagen 2D.
- Se ha desarrollado un algoritmo matemático a través del software de MatLab con el fin de automatizar la toma de datos aplicando procesamientos digitales a la imagen hasta obtener un resultado aproximado a los recogidos por metodología no automatizada. Los parámetros que se han identificado con el algoritmo son las áreas de desgaste de la cara de desprendimiento de las plaquitas, junto con la anchura y profundidad de dicho desgaste, la altura máxima de desgaste de la cara de incidencia (VB_{MAX}) y la anchura de incidencia (b).
- Se han contrastado los resultados obtenidos con otros procedimientos utilizados de forma previa, realizando una validación de la metodología empleada.
- La metodología empleada se ha mostrado de utilidad a la hora de facilitar y acelerar el estudio del desgaste de las herramientas de corte.

Se ha de mencionar que, durante la elaboración del trabajo, se han adquirido una serie de conocimientos enriquecedores, desde el entendimiento del microscopio óptico y uso de su software para sacar imágenes de buena calidad, el modelado y construcción de una pieza a través de fabricación aditiva, y también por códigos de mecanizado CNC y uso tradicional del torno, hasta el manejo de distintos softwares como son IMAGEJ y MatLab, capaces de realizar tareas de procesamiento digital de imágenes, logrando un entendimiento básico de programación y creación de APPS dentro de su interfaz. También cabe destacar que la capacidad de detectar problemas, manejarlos con razonamientos lógicos y resolverlos de la manera más eficiente, han sido pasos del día a día para forjar poco a poco este proyecto.

Por último, se presentan en forma de ventajas e inconvenientes todos los aspectos observados durante el desarrollo de cada una de las fases del proyecto.

VENTAJAS

La principal ventaja lograda a través de este trabajo de fin de grado, ha sido sin duda la disminución de tiempo empleado para realizar el análisis completo de las herramientas, desde su colocación en el microscopio hasta la obtención de los resultados. El soporte creado ofrece máxima comodidad con un muy reducido coste de error. La estanqueidad de la plaquita está asegurada gracias a la precisión con la que se han modelado los soportes, y los elementos de sujeción como la chaveta o el tornillo usado para fijar la plaquita en el portaherramientas. La comodidad del operario de realizar unos pocos o nulos cambios entre fotografía y fotografía de las diferentes plaquitas que se quieran examinar, es fundamental para optimizar el tiempo, y las instrucciones dadas para la puesta a punto del microscopio hacen que el procesamiento de aprendizaje del operario sea más llevadero.

Por otra parte, en la parte de procesado de imagen, se han obtenido unos resultados bastante similares a los obtenidos mediante métodos no automatizados. De hecho, el proceso automatizado de obtención de área de desgaste en cara de desprendimiento es en cierto modo superior al manual, ya que el algoritmo es capaz de recoger toda la información de la imagen de forma rigurosa, que el humano no puede realizar, o que realizaría ralentizando a grandes escalas la toma de datos.

Los resultados procesados por el programa son obtenidos a gran velocidad, tardando meros segundos. Teniendo en cuenta la cantidad de procesos por los que tiene que pasar la imagen antes de poder dar los resultados finales, la medición se hace mucho más rápida que con métodos tradicionales. Para investigaciones donde el número de herramientas a calcular sea grande, es bastante notorio el ahorro de tiempo que conllevaría usar este algoritmo.

Otro hecho que se ha considerado como ventaja es que, el algoritmo realizado en este trabajo está construido desde cero, por lo que posee un gran margen de mejora y desarrollo para futuras líneas de investigación.

Existe también otro punto a favor relacionado con el algoritmo programado, que es la versatilidad que posee a la hora de analizar plaquitas. Esto se debe a que las únicas condiciones que se deben tomar son que la geometría de la plaquita, que por su configuración sólo las de este formato encajan en el soporte creado, y que la imagen presente una buena calidad previa al procesado.

INCONVENIENTES

Si bien es verdad que el ahorro de tiempo es significativo, hay ciertos casos en los que existen resultados que pueden diferir de resultados previos. Esto se debe a que el procesado de la imagen puede tener limitaciones o errores de medida en relación a la calidad de la imagen. La imagen importada a la aplicación debe poseer un fondo totalmente oscuro, y una iluminación tenue, pero focalizada en la cara de la plaquita (Figura 7.1). Para el caso de medición de la cara de incidencia, es importante remarcar que la fuente de luz debe estar muy centralizada en la zona donde se produce el desgaste, pues en caso contrario pueden ocurrir errores en el proceso de la imagen durante el binarizado que hacen imposible la toma de datos.

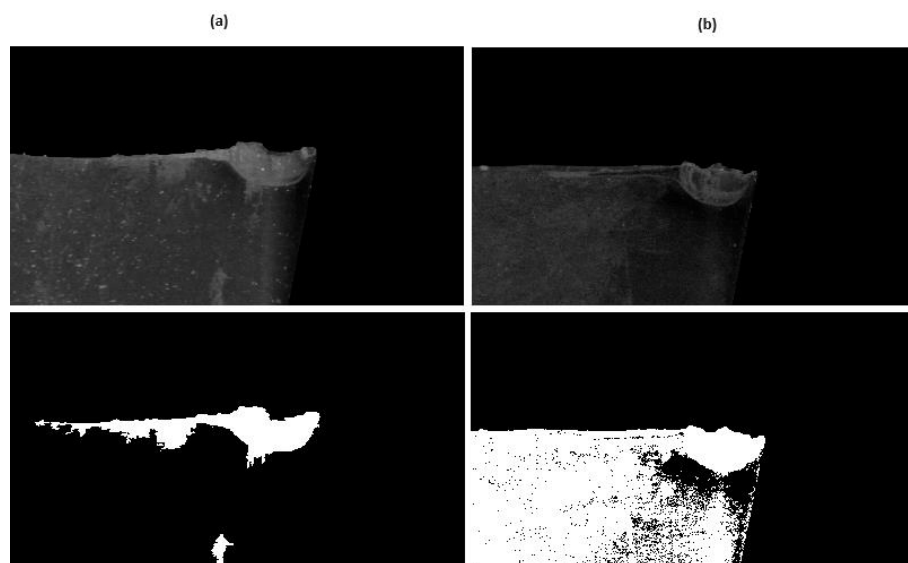


Figura 7.1 - Imágenes tomadas con una iluminación correcta (a) e incorrecta (b), y sus respectivos binarizados.

Otra limitación que se da en el procesado de la imagen, es la necesidad de ajustar ciertos parámetros antes del inicio del proceso. Si bien es verdad que este mismo ajuste está pensado para abarcar mayores casos de tomas de iluminación de imagen para poder usar una mayor cantidad de imágenes procedentes de tomas de distintos microscopios, esto también trae la consecuencia de presentar resultados ligeramente distintos de una misma imagen. Pese a lo mencionado, si se hace recortes de la imagen para aislar la zona afectada, el binarizado aumenta significativamente. También el ajuste morfológico está pensado para simplificar la imagen, reduciendo el número de entidades para una visualización más clara y concisa, pero que trae consigo en ciertos puntos y/o por mal uso del ajuste, errores de parámetros destacables.

Cabe a ser expuesto que algunos parámetros de desgaste como la cantidad de filo recrecido, el desgaste de radio, o la profundidad de cráter de la herramienta no han sido solventados por el programa, ya sea por limitaciones técnicas del propio microscopio o por falta de funciones capaces

de llevar a cabo procesamientos totalmente automáticos y precisos de dichos parámetros. Para algunos casos como el filo recreado se ha propuesto la alternativa de recortar previamente con el uso de la app, de forma manual, la zona en la que sea clara la observación de filo.

LINEAS FUTURAS DE TRABAJO

Una metodología como la realizada en este Trabajo de Fin de Grado es una fuente de posibles líneas de trabajo en el futuro, tanto en una mejora de la ya existente aplicación de procesado de imágenes para adquirir una precisión mayor a la hora de obtener los parámetros de desgaste de las herramientas usadas, como también una búsqueda en nuevas técnicas microscópicas con diferente tecnología capaz de complementar la toma de datos y aumentar la cantidad de información obtenida tras el proceso de medición automático. Realmente son varias las posibles líneas futuras que se puede plantear como resultado de la experiencia acumulada en el desarrollo del presente trabajo. Sin embargo, vamos a destacar sólo aquellas que constan de una gran importancia con el objetivo fundamental de alcanzar una base de conocimiento y experiencia suficiente que permita desarrollar en el futuro nuevos sistemas automáticos a través del uso de técnicas de procesado de imágenes.

- Mejora de un entorno de trabajo óptimo para la toma de contacto con la herramienta a través del microscopio estereoscópico. Mejoras de la focalización de fuentes de luz para evitar contrastes no deseados.
- Desarrollar nuevas alternativas de trabajo para la obtención de imágenes microscópicas. Estudio a tiempo real del desgaste de la herramienta a medida que se captura una serie de imágenes directamente desde la máquina-herramienta empleada en el mecanizado.
- Incorporación de nuevas tecnologías capaces de obtener ciertos parámetros que en su defecto fueron de difícil o imposible acceso (desgaste de cráter), complementación de parámetros geométricos con estudios sobre la composición química de las herramientas afectadas, un mayor acercamiento a la integridad superficial.
- Mejorar la funcionalidad del soporte creado para la admisión de diferentes modelos de plaquitas, o en su defecto de herramientas enteras.
- Desarrollo a futuro de obtención de parámetros geométricos de desgaste en herramientas de distinta forma geométrica, aplicando procesos de obtención de imágenes similares a los ya usados.
- Estudio de distintas técnicas de procesado de imágenes que pudieran aplicarse sobre las ya establecidas para mejorar o complementar los resultados obtenidos.
- Búsqueda de otras herramientas de software de uso libre con una capacidad similar.
- Desarrollo de una red neuronal capaz de clasificar la batería de imágenes obtenidas de diferentes herramientas de corte para su posterior estudio del desgaste.

8 Referencias Bibliográficas

- [1] F. J. Trujillo Vilches, S. Martín Béjar, C. Bermudo Gamboa, M. Herrera Fernández, y L. Sevilla Hurtado, «Influence of tool wear on form deviations in dry machining of uns a97075 alloy», *Metals (Basel)*, vol. 11, n.o 6, jun. 2021, doi: 10.3390/met11060958.
- [2] D. Heidecker, «El mecanizado en seco y el MQL, cada vez más demandados», *Metalmecánica*.
- [3] W. H. Wang, G. S. Hong, y Y. S. Wong, «Flank wear measurement by a threshold independent method with sub-pixel accuracy», *Int J Mach Tools Manuf*, vol. 46, n.o 2, pp. 199-207, feb. 2006, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2005.04.006.
- [4] Lenntech, «Aluminio - Al», <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/al.htm>.
- [5] I. Ernesto y G. Maffia, «ESTRUCTURA Y PROPIEDADES DE LAS ALEACIONES Aluminio y sus aleaciones», 2013.
- [6] S. S. Li *et al.*, «Development and applications of aluminum alloys for aerospace industry», 1 de noviembre de 2023, *Elsevier Editora Ltda*. doi: 10.1016/j.jmrt.2023.09.274.
- [7] «Estudio de la implantación de una unidad productiva dedicada a la fabricación de conjuntos soldados de aluminio».
- [8] Jesús Guevara, «Tecnología automotriz.Monografias.com», <https://www.monografias.com/trabajos13/tramat/tramat>.
- [9] L. Fernanda y C. Patiño, «El Metal más Resistente de la Industria Titanio». [En línea]. Disponible en: www.silvermoon.esFoto:www.fotosearch.com
- [10] Nueva York: Columbia University Press., «Titanium». *Columbia Encyclopedia (en inglés) (6a edición)*. 2006.
- [11] Jelks Barksdale, *Titanium. En Hampel, Clifford A., ed. The Encyclopedia of the Chemical Elements*. 1968.
- [12] Matthew Jr. Donachie, *TITANIUM: A Technical Guide (en inglés)*. Metals Park, OH: ASM International. 1998.
- [13] Universidad Complutense de Madrid, «Aleaciones de Titanio», <https://www.ucm.es/atlasmetalografico/aleaciones-de-titanio>.
- [14] «Procesos de mecanizado por arranque de viruta. Aleaciones de Titanio.», https://ikastaroak.ulhi.net/edu/es/PPFM/DPMCM/DPMCM01/es_PPFM_DPMCM01_Contenidos/wbsite_24_aleaciones_de_titanio.html.
- [15] S. Ortolá, «“Blog Ingeniería de Materiales,” Manual del Aluminio y sus Aleaciones», <https://ingenieriademateriales.wordpress.com/2009/04/17/manual-del-aluminio-y-sus-aleaciones/>.

- [16] E. A. Starke y J. T. Staley, «Application of modern aluminum alloys to aircraft», *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 32, n.o 2-3, pp. 131-172, 1996, doi: 10.1016/0376-0421(95)00004-6.
- [17] Q. Zhao *et al.*, «High-strength titanium alloys for aerospace engineering applications: A review on melting-forging process», 15 de junio de 2022, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.msea.2022.143260.
- [18] «Aceites y Lubricantes», *Metalia.es*.
- [19] Y. Shen, Y. Dong, H. Zhu, y L. Dong, «Pseudomonas xiamenensis in the cutting fluids on corrosion behavior of aluminum alloy 2219», *Bioelectrochemistry*, vol. 150, p. 108350, abr. 2023, doi: 10.1016/j.bioelechem.2022.108350.
- [20] «PROYECTO Fittema-Antena de transferencia de tecnología-Fluidos de corte FLUIDOS DE CORTE QUE SON».
- [21] L. N. López De Lacalle, C. Angulo, A. Lamikiz, y J. A. Sánchez, «Experimental and numerical investigation of the effect of spray cutting fluids in high speed milling», *J Mater Process Technol*, vol. 172, n.o 1, pp. 11-15, feb. 2006, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2005.08.014.
- [22] A. Sharma y R. Kumar, «Potential use of minimum quantity lubrication (MQL) in machining of biocompatible materials using environment friendly cutting fluids: An overview», *Mater Today Proc*, vol. 45, pp. 5315-5319, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.01.904.
- [23] F. J. Trujillo, L. Sevilla, y M. Marcos, «Cutting speed-feed coupled experimental model for geometric deviations in the dry turning of UNS A97075 Al-Zn alloys», *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 2014, 2014, doi: 10.1155/2014/382435.
- [24] S. Martín-Béjar, F. J. Trujillo, L. Sevilla, y M. Marcos, «Indirect adhesion wear parametric analysis in the dry turning of UNS A97075 Alloys», *Procedia Manuf*, vol. 13, pp. 418-425, 2017, doi: 10.1016/j.promfg.2017.09.036.
- [25] A. E. Paramétrico Del Mecanizado Seco, F. Javier Trujillo Vilches, y D. D. Lorenzo Sevilla Hurtado Mariano Marcos Bárcena, «UNIVERSIDAD DE MÁLAGA DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL, DE MATERIALES Y FABRICACIÓN TESIS DOCTORAL».
- [26] L. S. R. Jin, *Machinability data applied to materials selection. Materials and Design*, vol. 15. 1994.
- [27] AENOR, «UNE 16148: Ensayos de duración de herramientas de torno de corte único.», 1985, *AENOR, Madrid*.
- [28] Á. Ingeniería, P. De Fabricación, M. Teresa, P. Cerqueira, y A. Pereira Domínguez, «Análisis de desgaste de herramienta y optimización de proceso mecanizado mediante visión computarizada y consumo eléctrico Opta al grado de Doctora por la Universidad de Vigo Autora».
- [29] S. Sreehari, V. Vignesh, J. Jayaprakash, N. Akhil Jyothi, y T. P. Anirudhan, «Analyzing the effect of tool thickness on surface roughness and straightness in CNC parting operation of AA6063», *Mater Today Proc*, jul. 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2023.07.094.

- [30] S. Chauhan, R. Trehan, y R. P. Singh, «Classification of surface roughness for CNC face milling of Inconel 625 superalloy utilizing cutting force signal features with SVM and ANN», *Mater Today Proc*, jul. 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2023.07.101.
- [31] M. Habeck, «IMAGE PROCESSING I Getting Started», 2020.
- [32] T. A. Rector, Z. G. Levay, L. M. Frattare, J. English, y K. Pu'uohau-Pummill, «Image-Processing Techniques for the Creation of Presentation-Quality Astronomical Images».
- [33] P. J. Bagga, M. A. Makhesana, K. Patel, y K. M. Patel, «Tool wear monitoring in turning using image processing techniques», en *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, 2021, pp. 771-775. doi: 10.1016/j.matpr.2020.10.680.
- [34] D. Y. Pimenov, L. R. R. da Silva, A. Ercetin, O. Der, T. Mikolajczyk, y K. Giasin, «State-of-the-art review of applications of image processing techniques for tool condition monitoring on conventional machining processes», 1 de enero de 2024, *Springer Science and Business Media Deutschland GmbH*. doi: 10.1007/s00170-023-12679-1.
- [35] «“International Standard: ISO 1832:2004”», 2004.
- [36] Maching Doctor, «Tablas de Grados de carburo SECO», <https://www.machiningdoctor.com/es/grades/seco/>.
- [37] «SANDVIK 39 Información sobre calidades».
- [38] SandVik Coromant, «Catálogo SANDVOK Plaquita DCMT 11 T3 08-UM 1115», <https://www.sandvik.coromant.cn/es-es/product-details?c=DCMT%2011%20T3%2008-UM%20%20%20%201115>.
- [39] Production Machining, «“A guide to insert coating processes and materials”», <https://www.productionmachining.com/articles/a-guide-to-insert-coating-processes-and-materials>.
- [40] ACCU-Scope, «“An Exploration into Stereo Microscopes”», <https://accu-scope.com/news/an-exploration-into-stereo-microscopes/>.
- [41] Mundo Microscopio, «“El microscopio estereoscópico”», <https://www.mundomicroscopio.com/microscopio-estereoscopico/>.
- [42] C. Zeiss, «The Profile: The Modular System of Stereo- and Zoom Microscopes». [En línea]. Disponible en: www.zeiss.com/microscopy
- [43] «ISO 3912:1977 <<Woodruff keys and keyways>>», 1977. [En línea]. Disponible en: www.opac.net
- [44] «UNE-EN ISO 286:2011 », 2011.
- [45] ZEISS, «ZEISS ZEN core SOFTWARE», <https://www.zeiss.com/microscopy/es/productos/software/zeiss-zen->



core.html#:~:text=ZEN%20core%20es%20el%20paquete,en%20laboratorios%20de%20material%20conectados.

- [46] Wikipedia, «Depth of Field», https://en.wikipedia.org/wiki/Depth_of_field.
- [47] Z. Li, Y. Li, W. Han, K. Chen, Y. Guo, y C. Rao, «End-to-end Wiener–CNN optimization for lensless extended depth of field imaging with phase mask», *Opt Commun*, vol. 546, p. 129828, nov. 2023, doi: 10.1016/j.optcom.2023.129828.

9 Anexos

9.1 Anexo I. Código correspondiente a la APP de MatLab para el procesamiento de imágenes digital de las caras de desprendimiento e incidencia.

```
%% Selección de Imagen a través del explorador de archivos de Windows
```

```
global imagen;  
  
[filename, pathname] = uigetfile({'*.png'}, 'File Selector');  
fullpathname = strcat(pathname, filename);  
imagen = imread(fullpathname);  
imagen_gray = rgb2gray (imagen); %Transformar imagen en escalado de grises.  
imagen = imagen_gray;  
imshow (imagen, 'Parent', app.UIAxes);
```

```
%% Recorte de la imagen
```

```
global imagen;  
  
crop = imcrop(imagen);  
imagen = crop;  
imshow (imagen, 'Parent', app.UIAxes);
```

```
%% Cambio de escala para la conversión de pixeles a micrómetros, dependiendo del número de aumentos de la imagen tomada (x20, x40, x100).
```

```
global Rel;  
  
selectedButton = app.SeleccionarAumentosButtonGroup.SelectedObject;  
if selectedButton == app.xButton  
    Rel=3.66;  
elseif selectedButton == app.xButton_2  
    Rel=1.83;  
elseif selectedButton == app.xButton_3  
    Rel=0.73;  
else  
    Rel=1;  
end
```

```
%% Modificador del factor de umbral de la imagen para ajustar el contraste de la misma.
```

```
global imagen;  
global imagen2;  
  
factor_umbral = app.contraste.Value;  
factor_umbral = round(app.contraste.Value);  
imagen_umbral = imtophat(imagen, strel('disk', factor_umbral));  
imagen2 = imagen_umbral;  
imshow (imagen2, 'Parent', app.UIAxes);
```

```
%% Binarizado de la imagen.
```

```
global imagen2;  
  
imagen_bw = imbinarize (imagen2);  
imagen2 = imagen_bw;  
imshow (imagen2, 'Parent', app.UIAxes);
```

```
%% Ajuste morfológico de la imagen post-binarizado para una simplificación.
```

```
global imagen2;  
global imagen3;  
  
factor_dilatacion = app.morfo.Value;  
factor_dilatacion = round (app.morfo.Value);  
  
se = strel('disk',factor_dilatacion); %ajuste morfológico en forma de  
disco.  
bw_dilatacion = imclose(imagen2,se);  
bw_dilatacion = bwareaopen (bw_dilatacion,5000);  
bw_dilatacion = imfill(bw_dilatacion,'holes');  
image_label = bwlabel(bw_dilatacion);  
imagen3 = image_label;  
imshow (imagen3, 'Parent', app.UIAxes);
```

```
%% Reconocimiento de las entidades presentes en la imagen binarizada.
```

```
global imagen3;  
  
vislabels(imagen3);
```

```
%% Cálculo de parámetros de desgaste en la cara de desprendimiento.
```

```
global imagen3;  
global Rel;  
global num_ele;  
global ancho_zona_desgaste_um;  
global profundidad_zona_desgaste_um;  
  
imagen_binarizada = imagen3;  
L = bwlabel (imagen_binarizada);  
stats = regionprops(L, 'All'); %Cálculo general de todos los parámetros  
obtenibles con la función "regionprops"  
  
area_total = sum([stats.Area]);  
[area_max, idx_max] = max([stats.Area]); %Cálculo del área en pixeles  
imagen_max = zeros(size(imagen_binarizada));  
imagen_max(L == idx_max) = 1; %Simplificación de elementos para eliminar  
pequeñas partículas sueltas.  
stats = regionprops(imagen_max, 'All'); %2do cálculo de parámetros con la  
limpieza anterior.
```

```
imagen3 = imagen_max;
imshow (imagen3, 'Parent', app.UIAxes);

imshow(imagen3) %Dibujo de una elipse que encierra el elemento resultante (zona de
desgaste de la cara de desprendimiento)
hold on

phi = linspace(0,2*pi,50);
cosphi = cos(phi);
sinphi = sin(phi);

for k = 1:length(stats)
    xbar = stats(k).Centroid(1);
    ybar = stats(k).Centroid(2);

    a = stats(k).MajorAxisLength/2;
    b = stats(k).MinorAxisLength/2;

    theta = pi*stats(k).Orientation/180;
    R = [ cos(theta)  sin(theta)
         -sin(theta)  cos(theta)];

    xy = [a*cosphi; b*sinphi];
    xy = R*xy;

    x = xy(1,:) + xbar;
    y = xy(2,:) + ybar;

    plot(x,y, 'r', 'LineWidth', 2);
end

centers = stats.Centroid;
diametersMax = max([stats.MajorAxisLength stats.MinorAxisLength],[],2);
diametersMin = min([stats.MajorAxisLength stats.MinorAxisLength],[],2);
dxMajor=stats.MajorAxisLength.*cosd(stats.Orientation)./2;
dyMajor=stats.MajorAxisLength.*sind(stats.Orientation)./2;
dxMinor=stats.MinorAxisLength.*sind(stats.Orientation)./2;
dyMinor=stats.MinorAxisLength.*cosd(stats.Orientation)./2;
for nr=1:height(stats)
    if stats.Orientation(nr)>0
        xcordsMaj(:,nr)=(centers(nr,1)+[+1 -1]*dxMajor(nr))';
        ycordsMaj(:,nr)=(centers(nr,2)+[-1 +1]*dyMajor(nr))';

        xcordsMin(:,nr)=(centers(nr,1)+[+1 -1]*dxMinor(nr))';
        ycordsMin(:,nr)=(centers(nr,2)+[+1 -1]*dyMinor(nr))';
    else
        xcordsMaj(:,nr)=(centers(nr,1)+[+1 -1]*dxMajor(nr))';
        ycordsMaj(:,nr)=(centers(nr,2)+[-1 +1]*dyMajor(nr))';

        xcordsMin(:,nr)=(centers(nr,1)+[+1 -1]*dxMinor(nr))';
        ycordsMin(:,nr)=(centers(nr,2)+[-1 +1]*dyMinor(nr))';
    end
end
line([xcordsMaj xcordsMaj ],[ycordsMaj ycordsMin], 'Color', 'b');
hold off
```

```
    ancho_zona_desgaste = stats.MajorAxisLength; %Cálculo del ancho de desgaste
    producido en píxeles.
    ancho_zona_desgaste_um = (ancho_zona_desgaste*Rel); %Conversión de píxeles
    a micrómetros.
    app.ancho_desgaste_desprendimiento.Value = ancho_zona_desgaste_um;

    profundidad_zona_desgaste = stats.MinorAxisLength; %Simil a lo anterior con
    la profundidad de desgaste.
    profundidad_zona_desgaste_um = (profundidad_zona_desgaste*Rel);
    app.EjeMenormEditField.Value = profundidad_zona_desgaste_um;

%% Cálculo de parámetros de desgaste en la cara de incidencia.

    global imagen3;
    global Rel;
    global longitud_vb_um;
    global anchura_b_um;
    global num_ele;

    imagen_binarizada = imagen3;
    L = bwlabel (imagen_binarizada);
    stats = regionprops(L,'All'); %Cálculo general de todos los parámetros
    obtenibles con la funcion "regionprops"

    area_total = sum([stats.Area]);
    [area_max, idx_max] = max([stats.Area]);
    imagen_max = zeros(size(imagen_binarizada));
    imagen_max(L == idx_max) = 1;
    stats = regionprops(imagen_max,'All');
    imagen3 = imagen_max;
    imshow (imagen3,'Parent',app.UIAxes);

    for k = 1 : length(stats) %%Uso de las llamadas "BoundingBox" para
    delimitar el elemento con mayor área de la imagen binarizada.
        CurrBB = stats(k).BoundingBox;
        rectangle('Position',
    [CurrBB(1),CurrBB(2),CurrBB(3),CurrBB(4)], 'EdgeColor','r','LineWidth',2,'Parent',app.UI
    Axes)
    end

    longitud_vb = stats.BoundingBox(4); %Cálculo del desgaste de incidencia
    VB_max.
    longitud_vb_um = (longitud_vb*Rel);
    app.desgaste_incidencia.Value = longitud_vb_um;

    anchura_b = stats.BoundingBox(3); %Cálculo de la anchura de incidencia.
    anchura_b_um = (anchura_b*Rel);
    app.AnchodeIncidenciabmEditField.Value = anchura_b_um;
```