

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS  
DE LA TELECOMUNICACIÓN



**Trabajo Fin de Grado**

ESTUDIO DE SUPERFICIES A PARTIR DE  
PATRONES DE MOTEADO LÁSER



ESCUELA POLITECNICA  
SUPERIOR

**Autor:** Adrián Mínguez Ortega

**Tutor/es:** D. Jesús Alpuente Hermosilla



UNIVERSIDAD DE ALCALÁ  
Escuela Politécnica Superior

**GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS  
DE LA TELECOMUNICACIÓN**

Trabajo Fin de Grado

**ESTUDIO DE SUPERFICIES A PARTIR DE  
PATRONES DE MOTEADO LÁSER**

**Autor:** Adrián Mínguez Ortega

**Director:** D. Jesús Alpuente Hermosilla

**Tribunal:**

**Presidente:** \_\_\_\_\_

**Vocal 1º:** \_\_\_\_\_

**Vocal 2º:** \_\_\_\_\_





*Gracias a Ángela.*



# Agradecimientos

*Este trabajo ha sido desarrollado dentro del proyecto de investigación "Caracterización automática de la superficie de madera mediante medios ópticos no invasivos", financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad, con referencia AGL2013-44631-P.*

*Querría expresar mi agradecimiento a todas aquellas personas que, me han ayudado a lo largo de mi carrera y la realización de este Trabajo Fin de Grado.*

*A todos mis compañeros de clase, grandes amigos en esta aventura.*

*A mi familia y amigos, que siempre han estado a mi disposición tanto en los buenos como en los malos momentos. Y mi sincero agradecimiento a mi tutor Jesús Alpuente Hermosilla, y a Juan Antonio Martínez Rojas por su consejo, ayuda y dedicación durante el desarrollo de este trabajo.*

*A todos y a cada uno gracias.*



# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Introducción y motivación . . . . .	1
1.2. Objetivos . . . . .	2
1.3. Organización de la memoria . . . . .	2
<b>2. Estado del arte</b>	<b>3</b>
2.1. Acabados superficiales . . . . .	5
2.1.1. Medida de la rugosidad . . . . .	6
<b>3. Sistema experimental</b>	<b>13</b>
3.1. Material . . . . .	13
3.2. Metodología . . . . .	20
3.2.1. Visión por computador . . . . .	20
3.2.1.1. Formación y tipos de imágenes . . . . .	22
3.2.1.2. Sistemas de iluminación . . . . .	22
3.2.1.3. Sensor . . . . .	22
3.2.1.4. Representación de una imagen . . . . .	23
3.2.2. Método práctico . . . . .	24
3.2.2.1. Moteado . . . . .	27
3.2.3. Patrones obtenidos mediante autocorrelación. . . . .	31
3.2.3.1. Correlación espacial . . . . .	32
3.2.4. Análisis estadístico . . . . .	36
<b>4. Resultados</b>	<b>39</b>
4.1. Autocorrelación . . . . .	39
4.1.1. Metacrilato . . . . .	39
4.1.1.1. Lijado P80 . . . . .	40
4.1.1.2. Lijado P120 . . . . .	43
4.1.1.3. Lijado P220 . . . . .	46
4.1.1.4. Sin lijar . . . . .	49
4.1.2. Madera . . . . .	52

4.2. Análisis de componentes. . . . .	56
4.2.1. Metacrilato . . . . .	56
4.2.2. Madera . . . . .	62
<b>5. Evaluación de los resultados</b>	<b>65</b>
5.1. Resultados experimentales obtenidos a partir del estudio de la corre- lación iterativa. . . . .	65
5.2. Resultados experimentales obtenidos a partir de análisis de las com- ponentes analizadas. . . . .	66
<b>6. Conclusiones y futuras líneas de trabajo</b>	<b>69</b>
6.1. Conclusiones . . . . .	69
6.2. Futuras líneas de trabajo . . . . .	70
<b>A. Presupuesto</b>	<b>71</b>
A.1. Desglose de costes . . . . .	71
A.1.1. Costes de Hardware . . . . .	71
A.1.2. Costes de Software . . . . .	72
A.1.3. Costes de Recursos Humanos . . . . .	72
A.1.4. Coste Total del desarrollo del Proyecto . . . . .	72
A.1.5. Herramientas Hardware . . . . .	73
<b>Bibliografía</b>	<b>73</b>

# Índice de figuras

2.1. Desviaciones de la superficie nominal . . . . .	6
2.2. Especificación símbolo rugosidad . . . . .	7
2.3. Comparador visotáctil . . . . .	9
2.4. Rugosímetro de palpador mecánico . . . . .	9
2.5. Rugosímetro de Palpador capacitivo . . . . .	10
2.6. Escáner . . . . .	10
2.7. Microscopio óptico . . . . .	11
2.8. Microscopio digital . . . . .	11
3.1. Muestras de metacrilato y madera . . . . .	13
3.2. Diagrama E-k . . . . .	16
3.3. Curva de emisión de un Láser semiconductor. . . . .	18
3.4. Interior de la caja de obtención de las imágenes de moteado. . . . .	19
3.5. Tareas generales de un sistema de visión por computador . . . . .	21
3.6. Filtro de Bayer . . . . .	23
3.7. Diferentes niveles cuantificación . . . . .	23
3.8. Esquema general del proceso . . . . .	25
3.9. Foto captada (canal rojo). . . . .	26
3.10. Interferencia de luz sobre superficie rugosa . . . . .	29
3.11. Patrón típico de speckle . . . . .	29
3.12. Moteado objetivo (izquierda) y moteado subjetivo (derecha) . . . . .	30
3.13. Convolución espacial. . . . .	32
3.14. Proceso de autocorrelación iterativa. . . . .	34
3.15. De izquierda a derecha: muestra, elipses detectadas, imagen girada, plot. . . . .	34
3.16. Gráficas sin girar (izquierda) y girada (derecha) . . . . .	35
3.17. Ejemplo de resultado de rotación media (derecha), mediana (izquierda) 35	
4.1. P80 Cuarta iteración de cada zona de la muestra 1 . . . . .	40
4.2. P80 Media y desviación típica totales muestra 1 . . . . .	40
4.3. P80 Cuarta iteración de cada zona de la muestra 2 . . . . .	41

4.4. P80 Media y desviación típica totales muestra 2 . . . . .	41
4.5. P80 Cuarta iteración de cada zona de la muestra 3 . . . . .	42
4.6. P80 Media y desviación típica totales muestra 3 . . . . .	42
4.7. P80 Media y desviación típica de todas las muestras . . . . .	42
4.8. P120 Cuarta iteración de cada zona de la muestra 1 . . . . .	43
4.9. P120 Media y desviación típica totales muestra 1 . . . . .	43
4.10. P120 Cuarta iteración de cada zona de la muestra 2 . . . . .	44
4.11. P120 Media y desviación típica totales muestra 2 . . . . .	44
4.12. P120 Cuarta iteración de cada zona de la muestra 3 . . . . .	45
4.13. P120 Media y desviación típica totales muestra 3 . . . . .	45
4.14. P120 Media y desviación típica de todas las muestras . . . . .	45
4.15. P220 Cuarta iteración de cada zona de la muestra 1 . . . . .	46
4.16. P220 Media y desviación típica totales muestra 1 . . . . .	46
4.17. P220 Cuarta iteración de cada zona de la muestra 2 . . . . .	47
4.18. P220 Media y desviación típica totales muestra 2 . . . . .	47
4.19. P220 Cuarta iteración de cada zona de la muestra 3 . . . . .	48
4.20. P220 Media y desviación típica totales muestra 3 . . . . .	48
4.21. P220 Media y desviación típica de todas las muestras . . . . .	48
4.22. Sin lijar Cuarta iteración de cada zona de la muestra 1 . . . . .	49
4.23. Sin lijar Media y desviación típica totales muestra 1 . . . . .	49
4.24. Sin lijar Cuarta iteración de cada zona de la muestra 2 . . . . .	50
4.25. Sin lijar Media y desviación típica totales muestra 2 . . . . .	50
4.26. Sin lijar Cuarta iteración de cada zona de la muestra 3 . . . . .	51
4.27. Sin lijar Media y desviación típica totales muestra 3 . . . . .	51
4.28. Sin lijar Media y desviación típica de todas las muestras . . . . .	51
4.29. Cuarta iteración y gráfica corte radial . . . . .	52
4.30. Cuarta iteración y gráfica lijado grueso corte radial . . . . .	53
4.31. Cuarta iteración y gráfica lijado fino corte radial . . . . .	53
4.32. Cuarta iteración y gráfica corte transversal . . . . .	54
4.33. Cuarta iteración y gráfica lijado grueso corte transversal . . . . .	54
4.34. Cuarta iteración y gráfica lijado grueso corte transversal . . . . .	55
4.35. Gráficas obtenidas de los diferentes parámetros Ra-Rq . . . . .	57
4.36. Gráficas obtenidas de los diferentes parámetros Rqu-Rsk . . . . .	57
4.37. Gráfica de todas las muestras obtenidas . . . . .	60
4.38. Gráfica circular de todas las muestras obtenidas . . . . .	60
4.39. Gráfica de las medias las muestras obtenidas . . . . .	61
4.40. Gráfica circular de las medias de las muestras obtenidas . . . . .	61
4.41. Gráfica madera corte radial . . . . .	62
4.42. Gráfica madera corte transversal . . . . .	63



4.43. Gráfica madera todas las muestras . . . . . 64

# Índice de tablas

2.1. Valores de rugosidad parámetro Ra . . . . .	8
4.1. Tabla de datos obtenidos de los diferentes parámetros . . . . .	56
4.2. Tabla metacrilato lijado P80 . . . . .	58
4.3. Tabla metacrilato lijado P120 . . . . .	58
4.4. Tabla metacrilato lijado P220 . . . . .	59
4.5. Tabla metacrilato sin lijar . . . . .	59
4.6. Tabla madera corte radial . . . . .	62
4.7. Tabla madera corte transversal . . . . .	63
A.1. Costes de Hardware . . . . .	71
A.2. Costes de software . . . . .	72
A.3. Costes en recursos humanos . . . . .	72
A.4. Costes Totales . . . . .	72

## Resumen

En el presente trabajo fin de grado se expone el desarrollo de un sistema que permite analizar el acabado superficial de diferentes materiales, que varía en función del propio material y sus procesos de fabricación y mecanizado.

El método utilizado de análisis se lleva a cabo mediante una técnica no invasiva, consistente en el estudio del moteado (*speckel*) captado al fotografiar la muestra con una cámara digital. La imagen captada se genera a partir de la superficie que es iluminada mediante la luz dispersa de un láser. Posteriormente se procesan las imágenes captadas mediante el programa ImageJ. A través de diferentes procesos como la autocorrelación iterativa se obtendrán patrones y características a analizar para obtener resultados que nos permitan establecer las condiciones necesarias para su clasificación.

**PALABRAS CLAVE:** ImageJ, láser, Speckle, rugosidad, textura.

## **Abstract**

This TFG develop a system to analyze the surface quality of different materials. The analyzed surface varies depending on the material itself and the manufacturing processes.

The method of analysis uses a non-invasive technique consisting of the study of speckle, which is captured with a digital camera. The captured image is generated from the surface which is illuminated by a laser light scattering. These images are processed using the ImageJ program, through various processes like iterative autocorrelation patterns and characteristics analysis. With this data we draw the conclusions to obtain a classification method.

**KEYWORDS:** ImageJ, laser, Speckle.

# Resumen extendido

Las superficies de las piezas creadas en la industria son la parte exterior del producto que definen el acabado final de este, como puede ser el caso de las maderas, o pueden ser la zona por la que se unen a otras piezas y por ende que se encuentran sometidas a un continuo proceso de fricción y desgaste.

El análisis de la rugosidad de la superficie se suele realizar mediante mediciones basadas en instrumentos electrónicos llamados rugosímetros, el problema de estos análisis es que pueden provocar posibles daños en la superficie y presentan dificultad para medir in situ todas las piezas generadas, lo que suele derivar en métodos de análisis de piezas seleccionadas que representan un lote completo.

El objetivo de este trabajo es el desarrollo de un método de análisis no invasivo, así como de costes reducidos, que pueda sustituir a los métodos tradicionales y permita el análisis de cada una de las piezas sin suponer una destrucción o daño del producto analizado, con la finalidad de establecer una posible clasificación automática de dichos materiales. Para ello se estudian las propiedades superficiales de materiales con diferentes acabados, en particular del nivel de rugosidad superficial, obtenido mediante distintos niveles de lijado.

Este análisis se basa en el estudio de las propiedades de la luz reflejada sobre la superficie después de ser iluminada mediante la luz difusa de un láser; este procedimiento crea una imagen que presenta un moteado (speckle) que contiene características y propiedades relacionadas con la propia superficie. Dicha imagen es captada mediante una cámara fotográfica digital, procesada y analizada para obtener distintas imágenes y parámetros estadísticos que nos permitan diferenciar los distintos tratamientos aplicados a las superficies.

Para ello se han realizado distintos experimentos en el laboratorio variando la intensidad del láser, el ángulo de incidencia, la distancia de la cámara y del propio láser a la superficie tratada, con el fin de obtener las condiciones óptimas para el posterior análisis de las imágenes.

El tratamiento digital se ha realizado mediante el software ImageJ, de dominio público, programado en Java y desarrollado en los institutos Nacionales de Salud (*"National Institutes of Health"*) estadounidenses. ImageJ consta de una arquitectura abierta que proporciona extensibilidad vía plugins Java y macros (macroinstrucciones).

Mediante dos métodos diferentes aplicados a las imágenes obtenidas, el primero basado en la autocorrelación iterativa y el segundo mediante el análisis de componentes estadísticas, se trata de obtener resultados que nos permitan deducir los diferentes tratamientos aplicados a las diferentes muestras.

Los resultados obtenidos confirman la clara relación del fenómeno del moteado láser con las características superficiales de cada muestra, lo que permite su posible clasificación para aplicaciones en entornos industriales.

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Introducción y motivación

Cualquier tipo de superficie real, por muy perfecta que pueda parecer, presenta irregularidades debidas al proceso de fabricación o a la propia composición del material usado.

El uso cotidiano de materiales junto con su proceso de fabricación y mecanizado provoca defectos en la superficie de los mismos tales como marcas de corte, mellados, arañazos o rotura de su estructura interna, que ocasionan una merma en la calidad del producto.

Estas irregularidades pueden ser debidas a la variación del tamaño de las piezas, conicidad, redondez y demás características que pueden medirse con instrumentos convencionales. Pero existen unas irregularidades menores que son la ondulación y la rugosidad; esta última se refiere a las desviaciones pequeñas, espaciadas finamente, en la superficie y que están determinadas por las características del material y el proceso que formó la superficie, mediante, máquinas de corte o piedras de rectificado, por ejemplo.

En una primera instancia el nivel de control requerido en el producto la establece el diseñador, el cual intentará especificar unos requisitos para ofrecer el máximo rendimiento y vida útil de la pieza al menor coste posible.

El desarrollo de sistemas basados en el análisis de imagen pertenecientes a métodos no destructivos están adquiriendo una importancia creciente, éstos permiten detectar características instantáneamente, de manera que, tomando esta información en formato digital, pueda ser leída y procesada para su evaluación, utilizándose

para ello fundamentalmente métodos ópticos como por ejemplo la interferometría láser sobre superficies de madera que, perteneciente a las técnicas no invasivas, nos permite estudiar diferentes propiedades sin alterar ni dañar los materiales evaluados para realizar una clasificación de las mismas de forma automática.

## 1.2. Objetivos

En este trabajo se pretende desarrollar un método de análisis de superficies mediante una técnica no invasiva consistente en el análisis del moteado ("speckel") provocado sobre la propia superficie por una luz láser desenfocada, captando los patrones a procesar con una cámara fotográfica digital.

Provocando diferentes alteraciones de la superficie del material mediante lijas de diferente grano se estudiará el efecto de las mismas sobre el moteado generado, estudiando las imágenes obtenidas mediante la autocorrelación iterativa y mediante el análisis de componentes estadísticas. Para ello se dispone de diferentes láminas de metacrilato y madera, a las que se las someterá al proceso descrito.

Con el objetivo final de analizar las imágenes obtenidas para obtener datos suficientes que permitan caracterizar los diferentes acabados de estas superficies, se desarrolla un sistema con un coste reducido capaz de obtener los citados patrones de moteado, para su posible aplicación en los procesos de fabricación industrial.

## 1.3. Organización de la memoria

La memoria está organizada de forma que permita obtener una visión global y a la vez particular del objetivo de este proyecto, de los pasos seguidos y de los resultados obtenidos. Para ello primero se exponen los conceptos básicos en los que se basan este trabajo, la descripción de lo que se entiende como acabado superficial así como la situación y estudios previos relacionados con éste; posteriormente se realiza una descripción detallada de los materiales y el procedimiento que se ha llevado a cabo para la obtención de los datos de las muestras analizadas; a continuación se presentan los datos obtenidos de cada experimento realizado, para terminar dando las conclusiones sobre si se ha conseguido caracterizar estas propiedades superficiales, así como de posibles aplicaciones y futuros trabajos basados en este campo.



# Capítulo 2

## Estado del arte

Existen multitud de métodos para la medición de la rugosidad los cuales pueden ser separados en dos grupos: de contacto y sin contacto. Vorburger *et al.* [1] muestra una comparación entre los métodos de contacto (más tradicionales) y los métodos de no contacto. A partir de la evolución tecnológica, los métodos de no contacto fueron el fruto de mucha investigación. Como ejemplo, pueden ser citados los métodos ópticos presentados por Hocken *et al.* [2] y la medición por interferometría presentada por Rhee *et al.* [3] y Harasaki *et al.* [4].

Existen también métodos de visión computacional para el control de fabricación de piezas que captan la imagen de la superficie para controlar las herramientas de corte y mejorar la calidad de la fabricación. Estos métodos básicamente son programas de computador que permiten controlar parámetros de corte basados en el análisis de la rugosidad superficial. Reddy *et al.* [5] mostró un modelo empírico de rugosidad superficial para el modelo final del acero de carbón medio, cuyos parámetros fueron optimizados utilizando un algoritmo genético. En Oktem *et al.* [6] determinaron las mejores condiciones de corte para una dada rugosidad de la superficie durante el proceso de fabricación. La rugosidad de la superficie fue modelada con base en la respuesta dada por el método que optimizó las condiciones de corte. Prakasvudhisarn *et al.* [7] propuso un abordaje para la determinación de la condición ideal de corte para una rugosidad superficial deseada durante el proceso de fresado. La metodología propuesta consiste en dos partes: (a) modelaje de la rugosidad y (b) selección óptima de parámetros de corte.

Como existe una amplia gama de métodos que fueron desarrollados para medir la textura superficial, la Organización Internacional de Normas (ISO), en el Comité Técnico 213, que trata de la verificación dimensional del producto y especificaciones geométricas, creó un grupo de trabajo para discutir la normalización de la medición

de textura en 3D [8], como también la revisión de las normas existentes sobre medición tradicional de rugosidad en 2D [9]. La evaluación de rugosidad de superficies viene siendo objeto de estudio en las más diversas áreas del conocimiento. En el área de la ingeniería, los campos de mayor interés se refieren a procesos de manufactura y tribología [10] [11] [12]. Adicionalmente, el análisis de rugosidad se constituye como una área de investigación importante con aplicaciones en bibliotecas digitales, bancos de datos multimedia, imágenes médicas, robótica, detección remota y control de la calidad, entre otras [13]. Por ejemplo, la textura puede ser definida como un "patrón estadístico local de texturas primitivas en el dominio de observación de interés" [14], siendo por lo tanto, frecuentemente usada como un descriptor regional de imágenes. La extracción de características de textura se basa en modelos matemáticos que pueden involucrar matrices de co-ocurrencia de nivel-gris, funciones de auto-correlación, campos aleatorios de máxima entropía [15], filtros de Gabor y Wavelets entre otros.

Varma *et al.* [16] explica como extrayendo características usando abordaje estadístico propicia la descripción de imágenes a través de reglas que gobiernan la distribución y la relación entre los diferentes niveles de gris. Innumerables medidas pueden ser extraídas de la distribución de los niveles de gris en imágenes, entre las cuales se pueden citar: media, varianza, desviación estándar, energía y entropía, entre otras. El abordaje estadístico puede ser dividido en dos vertientes, la de primer orden, en la cual se extraen características a partir de histogramas [17] [18] y, la de segundo orden, que tiene en cuenta el posicionamiento relativo de la ocurrencia de los niveles de gris.

En este trabajo se presenta el desarrollo de una metodología que pretende obtener parámetros de rugosidad de superficies a partir de análisis del patrón de moteado generado a partir de la iluminación láser de las muestras. Se utiliza el abordaje de segundo orden para obtener estas características [19].

Se propone un análisis de diversas superficies, este análisis se basa en métodos ópticos, mediante el estudio de propiedades estadísticas de la distribución de intensidad a lo largo de dichas superficies.

A continuación se explican detalladamente los fundamentos básicos de este estudio, las diferentes características superficiales y su importancia en el mundo industrial, así como de las diversas técnicas usadas actualmente para realizar estas mediciones.

## 2.1. Acabados superficiales

El aspecto final que presenta una superficie está en función del material, del proceso de fabricación y del tratamiento final o recubrimiento. Para comprender la superficie y poder controlar su acabado y alcanzar el grado de calidad requerido, es necesario cuantificar la superficie tanto en dos como en tres dimensiones.

Existen multitud de razones para realizar dicho control sobre la superficie, tres de las más importantes son:

- Para reducir la fricción

Cuando una película de lubricante debe mantenerse entre dos partes móviles, las irregularidades deben ser lo suficientemente pequeñas para que la película de aceite no las atraviese en las condiciones más extremas de funcionamiento. Rodamientos, cilindros o clavos de pistón son ejemplos donde esta condición se debe cumplir.

- Para controlar el desgaste

También es importante el control del desgaste de ciertas partes de acabado de superficie que están sujetas a la fricción, tales como placas de embrague o tambores de freno.

- Calidad de acabado

El nivel de acabado de una pieza puede hacerla más atractiva al público y mejorar su puesta en venta.

Dentro del mundo de la tecnología, se observan gran cantidad de piezas que han de ponerse en contacto con otras y rozarse a altas velocidades. El acabado final y la textura de una superficie es de gran importancia e influencia para definir la capacidad de desgaste, lubricación, resistencia a la fatiga y aspecto externo de una pieza o material, por lo que la rugosidad requiere de un estudio cuidadoso [20], ya que de su estado puede depender tanto el funcionamiento, como el rendimiento de una máquina o mecanismo, la duración, e incluso sus posibilidades de venta al público.

El estado superficial de las piezas varía según la función a la que están destinadas, o de acuerdo con la presentación externa que por conservación o presentación ha de tener. Dependiendo de este acabado requerido se tienen las siguientes calidades de superficies:

1. Superficies funcionales: son aquellas que ha de estar en contacto con otras y que colaboran en el funcionamiento de la máquina. Éstas suelen requerir un mejor tratamiento.

2. Superficies de apoyo: como su nombre indica sirve de base o soporte para otras, suelen requerir una superficie desbastada.
3. Superficies libres: son aquellas que se quedan en el exterior, no tienen una función especial y no suelen mecanizarse. Pueden tener algún tratamiento especial.

Los signos superficiales tienen por objeto indicar las clases de superficies; en bruto, mecanizada o tratada, así como sus cualidades; uniformidad y alisado. Atendiendo al proceso de fabricación éstas pueden ser [21]:

1. Superficies en bruto: superficies sin tratamiento alguno, tal y como resulta después de un proceso de fabricación, por fundición, laminación, corte, estampación, ...
2. Superficies mecanizadas: El proceso de mecanizado permite obtener un mejor acabado que en las superficies en bruto.

### 2.1.1. Medida de la rugosidad

La rugosidad de una superficie es una característica mensurable. El acabado de la superficie es un término más subjetivo que describe la suavidad y calidad general de una superficie. Es frecuente utilizar el término "acabado de la superficie" como sinónimo de su rugosidad.

La rugosidad superficial es el conjunto de irregularidades de la superficie real, definidas convencionalmente en una sección donde los errores de forma y las ondulaciones han sido eliminados, como se puede observar en la figura 2.1 [22].

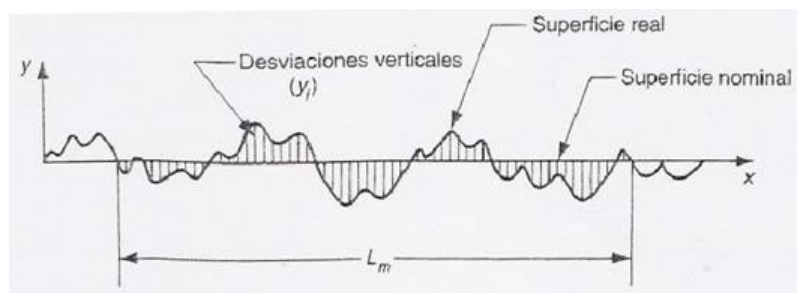


Figura 2.1: Desviaciones de la superficie nominal

Existen diferentes parámetros para medir la rugosidad, éstos se pueden agrupar en tres grandes categorías, respecto a la dirección de las alturas, respecto a la dirección transversa, respecto a la forma de las irregularidades [20].

La calidad de la rugosidad superficial se define en diferentes normas UNE 82301:1986 Rugosidad superficial. Parámetros, sus valores y las reglas generales para la determinación de las especificaciones UNE-EN ISO 4287:1998 Especificación geométrica de productos (GPS). Términos, definiciones y parámetros del estado superficial (ISO 4287:1997), y UNE 1037:1983 Indicaciones de los estados superficiales en los dibujos (ISO 1302: 1978), empleándose su medida para caracterizar la textura de una superficie [23].

De acuerdo con la norma ISO 1302-1978, las especificaciones del acabado superficial deberán colocarse en relación con el símbolo básico 2.2 [24] como se muestra a continuación:

a: Valor Ra de rugosidad en micrones o micro pulgadas o número de grados de rugosidad de N1 a N12.

b: Método de producción, tratamiento o recubrimiento

c: Longitud de muestreo d: Dirección de marcado

e: Cantidad que se removerá mediante maquinado

f: Otros parámetros de rugosidad (entre paréntesis)

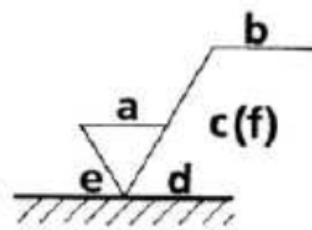


Figura 2.2: Especificación símbolo rugosidad

El principal criterio de rugosidad ( $R_a$ ), puede indicarse con el correspondiente número de grado de rugosidad de acuerdo a la tabla 2.1 [24], para evitar la mala interpretación de valores numéricos, los cuales pueden anotarse con diferentes unidades (micrones o micro pulgadas).

Valores de rugosidad Ra		Números de grados de rugosidad
$\mu\text{m}$	$\mu\text{pulgadas}$	
50	2000	N 12
25	1000	N 11
12.5	500	N 10
6.3	250	N 9
3.2	125	N 8
1.6	63	N 7
0.8	32	N 6
0.4	16	N 5
0.2	8	N 4
0.1	4	N 3
0.05	2	N 2
0.025	1	N 1

Tabla 2.1: Valores de rugosidad parámetro Ra

En forma de ecuación el Ra es:

$$Ra = \int_0^{Lm} \frac{|Y|}{Lm} dx \quad (2.1)$$

donde  $R_a$  es la media aritmética de la rugosidad, Y es la desviación vertical a partir de la superficie nominal (convertida a valor absoluto), y Lm es la distancia especificada en la que se miden las desviaciones de la superficie.

Existen multitud de métodos para la medición de la rugosidad los cuales pueden ser separados en dos grupos: de contacto y sin contacto.

Los métodos de contactos son los más extendidos en la actualidad, estos métodos pueden llegar a dañar la superficie tratada, por lo que su aplicación solo es útil para ciertos materiales que no sufren daños o en piezas representativas de todo un lote de fabricación. A continuación se exponen ejemplos de este tipo de métodos.

- Comparadores visotáctiles: Elementos para evaluar el acabado superficial de piezas por comparación visual y táctil con superficies de diferentes acabados obtenidas por el mismo proceso de fabricación, un ejemplo de estos comparadores se observa en la figura 2.3 [20].

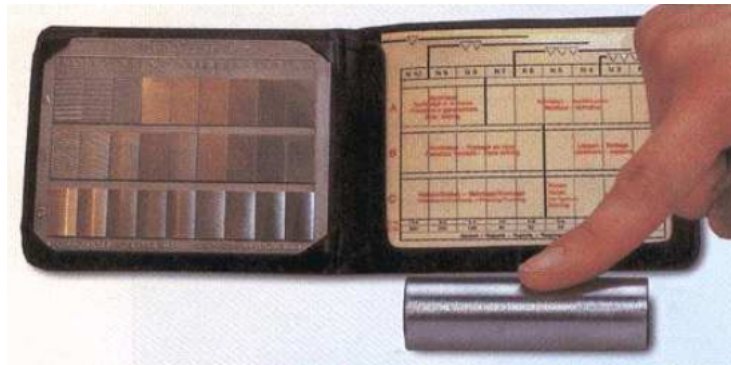


Figura 2.3: Comparador visotáctil

- Rugosímetro de palpador mecánico: Instrumento para la medida de la calidad superficial basado en la amplificación eléctrica de la señal generada por un palpador que traduce las irregularidades del perfil de la sección de la pieza, en la figura 2.4 [20] se observa la apariencia de este tipo de rugosímetros.



Figura 2.4: Rugosímetro de palpador mecánico

- Rugosímetro de Palpador capacitivo: El desplazamiento vertical del palpador aproxima las dos láminas de un condensador, modificando su capacidad y con ella la señal eléctrica, como se puede apreciar en la figura 2.5 [20].

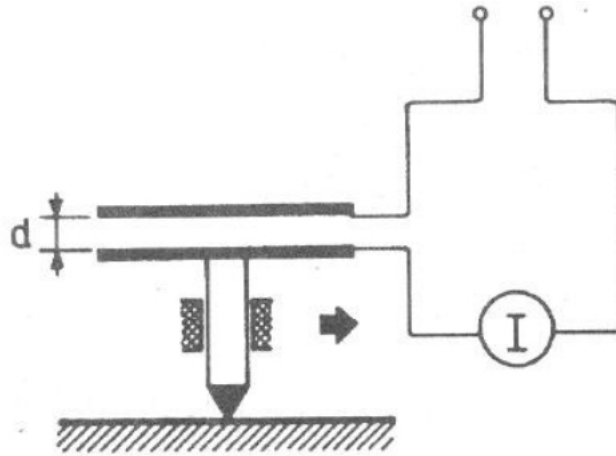


Figura 2.5: Rugosímetro de Palpador capacitivo

Una parte muy considerable del análisis no invasivo de superficies se basa en radiación electromagnética, se pueden encontrar estudios realizados en prácticamente todas las regiones del espectro electromagnético. Dentro de estas técnicas merecen especial importancia los métodos que usan radiación visible, estas técnicas se conocen como *técnicas ópticas*. En los últimos años las técnicas ópticas no invasivas están experimentando una auténtica revolución gracias al uso de láseres de bajo coste y excelente calidad [25].

A continuación se exponen ejemplos de este tipo de métodos.

- Escáneres, como el que se muestra en la figura 2.6 [26], permiten obtener imágenes de muestras muy grandes con iluminaciones muy homogéneas y gran calidad óptica. Rojas *et al.* [27] contiene estudios exhaustivos sobre este método.



Figura 2.6: Escáner

- Microscopios ópticos convencionales, como el de la figura 2.7 [28], son los más caros de todos, están diseñados para mirar a través de ellos con los ojos, aunque se les puede acoplar una cámara digital para recoger las imágenes.





Figura 2.7: Microscopio óptico

- Microscopios digitales como el de la figura 2.8 [29], son más baratos que los microscopios ópticos, pero más caros que los escáneres.



Figura 2.8: Microscopio digital

- Análisis de moteado láser. Mediante láseres de alta calidad y precio razonable se utilizan las propiedades físicas de la luz reflejada en la superficie, que mediante el análisis matemático de las imágenes captadas permiten obtener patrones que resultan útiles en la clasificación de las muestras, este método en el que está basado este trabajo ya que ofrece la posibilidad de un análisis no destructivo, rápido y continuo.



# Capítulo 3

## Sistema experimental

Para la realización del experimento se ha intentado usar materiales sencillos y asequibles que mantengan los costes lo más bajo posible; el proceso se basa en tomar imágenes mediante una cámara fotográfica de diversas muestras iluminadas, analizar las fotografías mediante un software y obtener resultados concluyentes. A continuación se comentan los diferentes materiales usados y la metodología llevada a cabo.

### 3.1. Material

#### Muestras:

Las muestras analizadas corresponden a 40 placas de metacrilato rojo de 150x150x3 mm, como la que se observa en la figura 3.1, debidamente numeradas y etiquetadas; las distintas muestras cuentan con diferentes tratamientos superficiales, aplicados mediante papel de lija manualmente.

Aparte de mantener una muestra sin modificar los lijados aplicados fueron de diferentes granos de 80, 120 y 220. Analizando cada muestra se intentar observar si mediante alguno de los métodos descritos, se pueden observar diferencias estadísticas entre unas muestras y otras.



Figura 3.1: Muestras de metacrilato y madera

Posteriormente se ha repetido el experimento, en un entorno no tan controlado, con muestras de madera, éstas se dividen en dos tipos de muestras, aquellas que presentan un corte radial y aquellas que presentan un corte transversal al tronco origen, tratadas de tres maneras diferentes mediante un corte a cuchilla simple, un lijado grueso y un lijado más fino.

Se intenta analizar la diferencia entre el tipo de corte y posteriormente ver si es posible reconocer cada uno de los lijados utilizados.

### **Papel de lija:**

El papel de lija sirve como una alternativa para las herramientas tradicionales de cortado y es perfecto para la preparación de superficies en proyectos caseros. Está disponible como un material comercial que se compra en ferreterías o como un material industrial que se obtiene en puntos de venta comerciales con una mayor calidad de producto y vida útil. El grano del papel de lija dicta la manera en que se usa, y entender cada uno ayuda a producir mejores acabados. [30]

El grano está relacionado con el número de partículas abrasivas contenidas dentro de una zona de 1 pulgada (2,5 centímetros) de la superficie del papel de lija. Cuanto menor sea el número de partículas, más abrasivo será el papel de lija. El papel de lija P80-granos, por ejemplo, será mucho más abrasivo que el papel de lija P120-granos. Se puede establecer la siguiente clasificación del grano de una lija:

- Granos gruesos

Los grados de P40-granos a P60-granos son clasificados como gruesos. Son muy ásperos en textura y se utilizan para completar el trabajo de lijado pesado. Las tareas típicas del papel de lija grueso incluyen la remoción de pintura, lijar los bordes de las puertas para lograr un mayor ajuste y preparar superficies para que acepte otros materiales.

- Granos medianos

Los grados de P80-granos a P120-granos se clasifica como medianos y se utilizan para alisar superficies después de que se han rayado por papel de lija de grano grueso. Los abrasivos de grano mediano también son perfectos para la eliminación de grandes imperfecciones en madera o frotar rellenos.

- Granos finos

El papel de lija fino con graduaciones de P150-granos a P180-granos es utilizado para proyectos de suavizados finales y son ideales para la preparación de superficies de madera antes de ser pintadas, selladas o teñidas. El grado más fino ayuda a eliminar pequeños rayones provocados por grados gruesos de papel abrasivo y se utiliza comúnmente en paneles de la carrocería durante la etapa de preparación para lijar la pintura de automóviles.

- Granos muy finos

El papel de lija de granos muy fino mejora la apariencia final de los acabados de pintura. Los abrasivos de P220-granos a P240-granos se utilizan para lijar pinturas, selladores y manchas entre capas. Este proceso asegura que el acabado puede penetrar el grano de los materiales de madera y que las capas finales sean suaves y estén libres de imperfecciones.

- Granos extra finos

El papel de lija de P280-granos a P320-granos se utiliza para arreglar acabados de madera entre capas. Mientras que los granos muy finos lijan toda la superficie después de cada aplicación, los granos extra finos son ideales para quitar las pequeñas áreas de contaminación de partículas, como tierra o polvo. Ésto previene que proyectos completos sean lijados varias veces.

- Grano súper fino

El papel de lija más fino está graduado entre P360-granos y P600-granos y son muy suaves al tacto. Estos remueven imperfecciones de una capa una vez que se ha secado. El lijado fino quita el polvo y otras partículas, y los grados más finos de papel de lija súper fino pulen de nuevo para dar el brillo final.

Para nuestro experimento en concreto usaremos papel de lija de granos P80, P120 y P220, para alterar las superficies a analizar con el fin de encontrar un método de estudio para ponderar el grado de lijado usado, aparte de otras características.

### **Láser:**

Como fuente de luz coherente se utilizó un láser de diodo comercial rojo, de 640 nm de longitud de onda, que fue desprovisto de su óptica para conseguir un ensanchamiento de la iluminación difusa que produce sobre las diferentes superficies.

A continuación se exponen los principios básicos de funcionamiento y construcción de un láser para entender mejor el porqué de su uso en este proyecto.

Un láser ("Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation", amplificación de luz por emisión estimulada de radiación) es un dispositivo que utiliza un efecto de la mecánica cuántica, la emisión inducida o estimulada, para generar un haz de luz coherente tanto espacial como temporalmente, estas fuentes de luz se basan en uniones semiconductoras.

El primer láser fue construido por Theodore Maiman y funcionó por primera vez el 16 de mayo de 1960. El hecho de que sus resultados se publicaran con algún retraso en Nature, dio tiempo a la puesta en marcha de otros desarrollos paralelos. Por este motivo, Townes y Arthur Leonard Schawlow también son considerados inventores del láser, que patentaron en 1960. Dos años después, Robert Hall inventa el láser generado por semiconductor. En 1969 se encuentra la primera aplicación industrial del láser al ser utilizado en las soldaduras de los elementos de chapa en la fabricación de vehículos y, al año siguiente Gordon Gould patenta otras muchas aplicaciones prácticas para el láser. [31]

Cuando un electrón que se encuentra excitado en un nivel de energía superior pasa a un nivel de energía inferior la disminución de energía da lugar a la aparición de un fotón, con la longitud de onda correspondiente a esa diferencia de energías. Para el estudio del fenómeno de generación de fotones en el láser es útil la representación de los distintos estados de energía correspondientes a la banda de conducción y a la banda de valencia del material, mostradas en la figura 3.2.

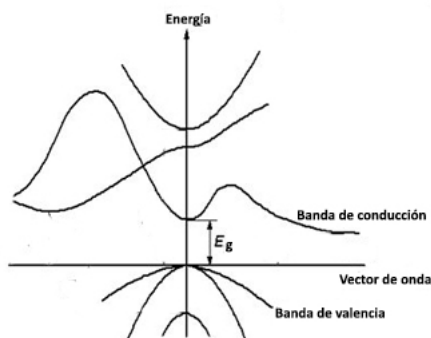


Figura 3.2: Diagrama E-k

La anchura del gap,  $E_g$  determina la longitud de onda de la luz emitida:

$$\lambda[\mu m] = \frac{1,24}{E_g[eV]} \quad (3.1)$$

Se dice que el material es de gap directo cuando el mínimo de la banda de conducción y el máximo de la banda de valencia coinciden, estos materiales son útiles para la emisión fotónica, pues el proceso de recombinación de los electrones con los huecos es más probable en estos casos

Los elementos básicos de un láser son tres. Una cavidad óptica resonante, en la que la luz puede circular, que consta habitualmente de un par de espejos de los cuales uno es de alta reflectancia (cercana al 100 %) y otro conocido como acoplador, que tiene una reflectancia menor y que permite la salida de la radiación láser de la cavidad.

Dentro de esta cavidad resonante se sitúa un medio activo en el que se produce la emisión estimulada, con ganancia óptica, que puede ser sólido, líquido o gaseoso (habitualmente el gas se encontrará en estado de plasma parcialmente ionizado) que es el encargado de amplificar la luz.

Para poder amplificar la luz, este medio activo necesita un cierto aporte de energía, llamada comúnmente bombeo, necesario para elevar los niveles energéticos de los electrones. Este bombeo es generalmente un haz de luz (bombeo óptico) o una corriente eléctrica (bombeo eléctrico).

Sus principales características son las siguientes:

- **Direccionalidad.** La intensidad apenas varía con la distancia a la fuente. Esto es debido a que solo se amplifican los fotones emitidos en el sentido de un eje del material emisor gracias a su cavidad resonante.
- **Potencia e intensidad luminosa** que depende del régimen de trabajo. Se distinguen dos modos: modo continuo y modo pulsado.
- **Monocromaticidad.** Es una de las principales características de la emisión láser. Todos los fotones emitidos poseen la misma longitud de onda, lo que nos permite aprovechar las características físicas y biológicas que posee la radiación de una longitud de onda determinada.
- **Coherencia.** Todos los fotones tienen la misma fase e idéntico estado de polarización.

El láser utilizado en nuestro experimento consta de una unión PN construida con un material de gap directo. Cuando se polariza en directa, los huecos de la zona p se mueven hacia la zona n y los electrones de la zona n hacia la zona p; ambos desplazamientos de cargas constituyen la corriente que circula a través. Si los electrones y

huecos están en la misma región, pueden recombinarse cayendo el electrón al hueco y emitiendo un fotón. El flujo de fotones generado por segundo será proporcional a la difusión de portadores a través de la unión, es decir a la intensidad de la corriente eléctrica inyectada. Para pequeñas corrientes de excitación predomina la emisión espontánea, funcionando el dispositivo como un LED poco eficiente, pero a partir de un valor de corriente que recibe el nombre de umbral se produce una inversión de población y predomina la emisión estimulada, con la consiguiente ganancia en la producción de fotones dando lugar a la emisión de luz láser, como puede observarse en la figura 3.3[35].

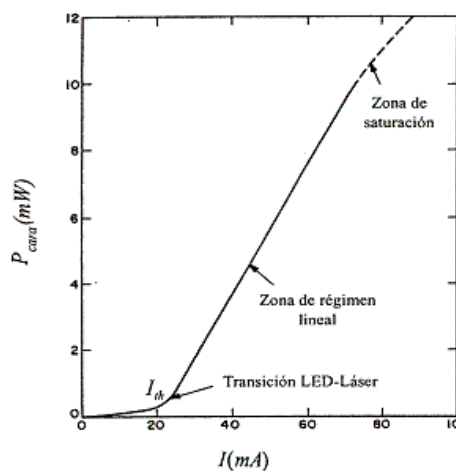


Figura 3.3: Curva de emisión de un Láser semiconductor.

En los diodos láser, para favorecer la emisión estimulada y generación de luz láser, disminuyendo el ancho espectral generado, el cristal semiconductor del diodo puede tener la forma de una lámina delgada con un lado totalmente reflectante y otro reflectante de forma parcial (aunque muy reflectante también), lográndose así una unión PN de grandes dimensiones con las caras exteriores perfectamente paralelas y reflectantes.

Este conjunto forma una guía de onda similar a un resonador de tipo Fabry-Perot, en la que los fotones emitidos en la dirección adecuada se reflejarán repetidamente en dichas caras reflectantes (en una totalmente y en la otra parcialmente), lo que ayuda a su vez a la emisión de más fotones estimulados dentro del material semiconductor y consiguientemente a que se amplifique la luz. Parte de estos fotones saldrán del diodo láser a través de la cara parcialmente transparente. Este proceso da lugar a que el diodo emita luz, que al ser coherente en su mayor parte (debido a la emisión estimulada), posee una gran pureza espectral. Por tanto, como la luz emitida por este tipo de diodos es de tipo láser, a estos diodos se los conoce por el mismo nombre.



Entre algunas de sus ventajas caben destacar su gran eficiencia y fiabilidad, sus largos tiempos de vida media, la necesidad de un umbral de corriente de funcionamiento relativamente bajo, su reducido consumo de energía (comparado con otras fuentes), su angosto ancho de banda espectral de emisión (puede llegar a ser de sólo algunos KHz), su bajo coste y sus reducidos peso y volumen.

Entre algunas de sus desventajas encontramos su alta sensibilidad a los cambios de temperatura, que pueden modificar el punto de polarización, y el alto calentamiento al pasar corriente sobre el material diodo.

A pesar de las desventajas, el láser de semiconductores es el segundo más vendido después del láser He-Ne por sus usos en computadoras, impresoras, medios de comunicación, tratamientos médicos, ...

#### **Fuente de alimentación:**

Para asegurar que todas las muestras se tomasen bajo las mismas condiciones, un aspecto imprescindible para este trabajo, se dispuso de una fuente de tensión continua externa para alimentar al láser, y así conseguir una luminosidad del haz con una intensidad constante. El modelo de la fuente usada es IMHY3003D-3.

#### **Caja:**

Las imágenes de las muestras se obtuvieron dentro de la misma estructura, una caja fabricada al efecto, con el interior pintado de negro para evitar en la medida de lo posible filtraciones de luz natural del exterior que pudiesen interferir con nuestra luz láser, como se muestra en la figura 3.4. En el suelo de la misma se indicaron debidamente los ángulos y distancias usadas mediante el uso de distintas reglas y transportadores de ángulos. La precisión en toda la realización ha sido de 1 mm y 1 grado.



Figura 3.4: Interior de la caja de obtención de las imágenes de moteado.

### **Cámara:**

Las imágenes se obtuvieron en formato TIFF, para evitar posibles pérdidas de información del patrón de moteado por la compresión de otros formatos como el JPEG, con una cámara Nikon modelo D-50 de 6,12 Mpixels de resolución.

Las características de los parámetros usados en la obtención de las imágenes digitales son los siguientes:

- Tiempo de exposición de 1/200 segundos.
- Punto F de f/10.
- Distancia focal de 80 mm.
- Enfoque manual

### **Software**

El software utilizado es ImageJ un programa de dominio público de procesamiento de imágenes y análisis escrito en Java, ampliamente utilizado en los campos de las ciencias de la vida, con una infraestructura de plugins extensible. ImageJ puede mostrar, editar, analizar, procesar, guardar, e imprimir imágenes de 8 bits (256 colores), 16 bits (miles de colores) y 32 bits (millones de colores). Puede leer varios formatos de imagen incluyendo TIFF, PNG, GIF, JPEG, BMP, DICOM, FITS, así como formatos RAW. [33]

## **3.2. Metodología**

Con el fin de entender mejor el procedimiento seguido en este proyecto se exponen a continuación una serie de explicaciones básicas sobre qué es la visión por computador, sus diferentes características y tareas.

### **3.2.1. Visión por computador**

Se puede entender la visión por computador como la ciencia capaz de estudiar los procesos de adquisición, procesado, análisis e interpretación de información procedente del mundo real o mundo 3D mediante imágenes en 2D.

Las principales aplicaciones están comprendidas dentro de los campos de la robótica, medicina, seguridad, sistemas de transporte, reconstrucción 3D, juegos, arte, entre otros muchos; en el que nos centraremos en este trabajo en concreto es en el

control de calidad de procesos industriales.

La historia de la visión por computador empezó a comienzos de 1950-1960 cuando se empezaron a desarrollar los primeros algoritmos por Larry Roberts's, en la década de los 80 existe un abandono y frustración por los limitados avances que se hacían y las limitaciones tecnológicas existentes en aquella época.. No es hasta los 90 que se retoman las investigaciones por David Marr y empiezan a proliferar revistas y congresos de visión computacional. A partir del año 2000 se empiezan a realizar aplicaciones de alto nivel, identificación, robótica, y actualmente ha tenido una gran explosión con su implantación asociada a las aplicaciones móviles ("*smartphones*"), al internet de las cosas, modelos de ciudades inteligentes, ...

Existen diferencias entre el sistema visual y las imágenes captadas; la visión humana permite reconocer objetos complejos, en fracciones de segundo. Se estima que el 60 % de la corteza cerebral se dedica a tratar la información visual, la retina del ojo contiene aproximadamente  $10^8$  células de visión especializadas y cuatro capas de neuronas capaces de llevar a cabo  $10^7$  operaciones por segundo. Cuando las señales llegan al cerebro se efectúa un tratamiento altamente complejo a lo largo de las  $10^{11}$  neuronas y  $10^{14}$  interconexiones [34]. Los sistemas de visión computacional tienen aun un largo camino por delante antes de llegar a resultados comparables a los de la visión humana, sin embargo nos permiten otro tipo de análisis que sería imposible de realizar para un humano, analizando características propias de estas imágenes a un nivel matemático tan complejo como queramos.

En la figura 3.5 [34] se pueden observar las tareas generales que se desempeñan en un sistema de visión por computador.

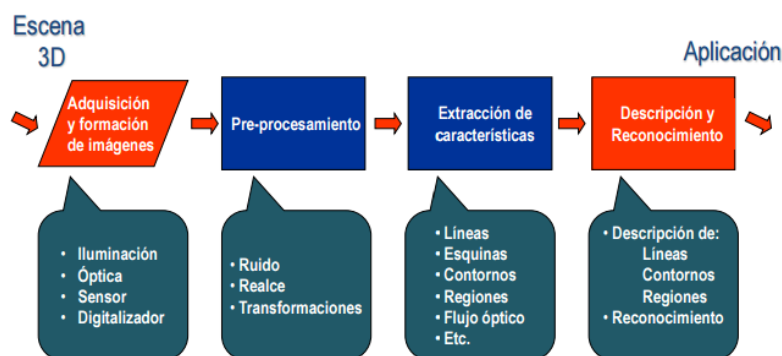


Figura 3.5: Tareas generales de un sistema de visión por computador

### 3.2.1.1. Formación y tipos de imágenes

Las imágenes se forman cuando un sensor registra la radiación que interactúa con los objetos físicos del mundo 3D, existen multitud de tipos de imágenes obtenidas mediante diferentes tipos de sensores.

- Intensidad, basada en la luz reflejada.
- Distancia: que nos dan información acerca de la profundidad.
  - Activas -> Kinect
  - Pasivas -> Cámaras
- Tomografías: basadas en la densidad de los tejidos
- Infrarrojo lejano (FIR): basado en la medición del calor
- Tiempo de vuelo (TOF): nos dan información acerca de la profundidad mediante el análisis de imágenes obtenidas con drones calibrados previamente.

En nuestro caso nos centraremos en los sistemas mediante luz reflejada.

### 3.2.1.2. Sistemas de iluminación

La elección de una correcta fuente de iluminación en los sistemas de visión contribuye notablemente al éxito de nuestra aplicación especialmente de uso industrial, y permite reducir la complejidad de los algoritmos usados a posteriori, con una gran repercusión en el coste final del sistema.

Las fuentes de iluminación más comunes son: las lámparas halógenas, fluorescentes, incandescentes, las fuentes de gas estroboscópico, LED y la que usaremos para nuestro trabajo, láser. También existen diferentes técnicas de iluminación como son: directa, lateral, estroboscópica, por campo oscuro ("dark field"), por contraste ("backlight"), difusa coaxial, o difusa tipo domo. Se usará la iluminación directa, la cual es la técnica más común, en la que la cámara recibe la luz reflejada del objeto, mediante un iluminador de área.

### 3.2.1.3. Sensor

La captación de la imagen digital se realiza mediante un sensor CMOS, a través de un filtro de Bayer, figura 3.6 [35], que es un tipo de matriz de filtros, rojos verdes y azules, que se sitúa sobre un sensor digital de imagen para hacer llegar a cada fotodiodo la información de luminosidad correspondiente a una sección de los

distintos colores primarios. Interpolando las muestras de cuatro fotodiodos vecinos se obtiene un píxel de color. Está formado por un 50 % de filtros verdes, un 25 % de rojos y un 25 % de azules. El mayor número de píxeles sensibles al verde se justifica porque el ojo humano es mucho más sensible a este color.

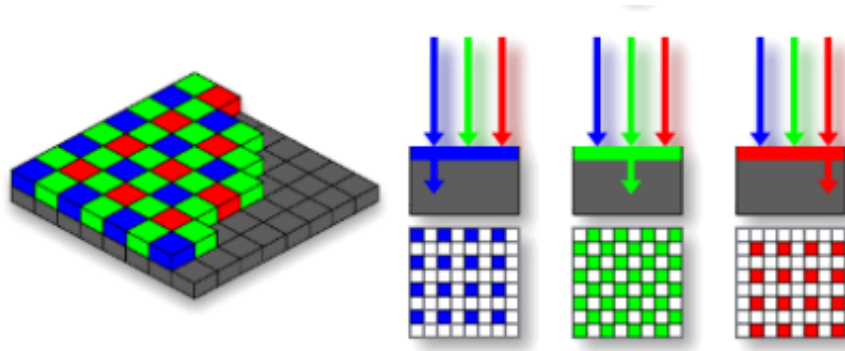


Figura 3.6: Filtro de Bayer

#### 3.2.1.4. Representación de una imagen

Una imagen estará representada mediante la función  $f(u,v)$ , cuyo argumento representa la localización de cada píxel en el plano de la imagen, mientras que el valor de la función contendrá la información acerca de la intensidad de la imagen. Un ejemplo de la repercusión de elegir diferentes valores de este parámetro se aprecian en la figura 3.7 [34]. Este valor se obtiene a través de la digitalización mediante una conversión analógico digital de la radiación captada.

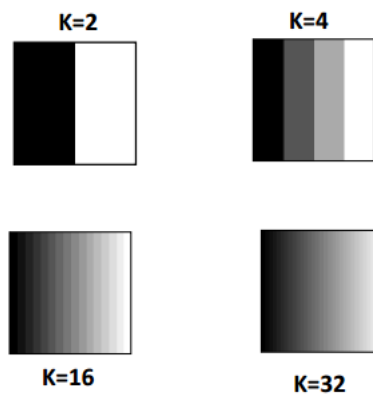


Figura 3.7: Diferentes niveles cuantificación

Por tanto podemos definir dos tipos de resoluciones, la resolución espacial, o los posibles valores que pueden tomar  $u$  y  $v$  o lo que es lo mismo el número total de posiciones dentro de nuestro plano imagen, y la cuantificación o posibles valores discretos que pueden tomar cada píxel.

En el presente proyecto se trabaja con imágenes en blanco y negro formadas por 8 bits, lo que genera un rango de 255 valores de grises, siendo el 255 blanco y 0 el negro.

**Espacio (o modelo) de color** Es una especificación de un sistema de coordenadas 3D y un sub-espacio dentro de dicho sistema donde cada color se representa por un punto. Los espacios de color son siempre tridimensionales. Los espacios más frecuentes son: RGB ("Red-Green-Blue")(utilizado habitualmente en imágenes digitales, pantallas de ordenador, y vídeo cámaras). CYM ("Cyan/Magenta/Yellow"): (utilizado en impresoras de color), YUV y YIQ ("Intensity/Chromaticity"): (se usan para transmisión de señales de televisión). HSV ("Hue/Saturation/Value")(este espacio se usa típicamente en imágenes artísticas). Muchas aplicaciones de tratamiento de imágenes digitales requieren transformaciones entre el espacio RGB y otros espacios de color. En el caso de este trabajo en particular se hace uso del espacio RGB utilizando únicamente uno de los subespacios, el canal rojo.

### 3.2.2. Método práctico

Se tomaron diferentes muestras con distintos voltajes de alimentación, así como de diferentes ángulos de incidencia para el láser y la cámara, también se modificó la distancia de estos a las muestras de las que obtener las imágenes digitales, para que permitiesen obtener los mejores resultados para su análisis, lo que se consigue con los siguientes parámetros:

- Distancia de 17,5 cm tanto del láser como de la cámara a la muestra.
- Ángulo de 45 grados con respecto a la normal de la superficie, tanto par el láser de iluminación como para la cámara fotográfica.

Para el posterior análisis de las imágenes se ha utilizado el programa ImageJ, programa de procesamiento de imágenes basado en Java.

El procedimiento total seguido para la obtención de las medidas ha sido el siguiente, basado en el método desarrollado por Rojas *et al.* [19].

1. Posicionar la muestra de metacrilato o madera convenientemente tratada y señalizada en el raíl al efecto situado dentro de la caja, que consta de las marcas definitivas para el posicionamiento de todos los elementos, con el fin asegurar que todas las imágenes se toman siempre bajo las mismas condiciones.

2. Iluminar cada una de las muestras con el láser rojo desenfocado.
3. Fotografiar con la cámara digital la imagen reflejada por la muestra mediante un temporizador, para poder cerrar la caja y obtener las condiciones de iluminación adecuadas, las imágenes se guardan en formato TIFF.
4. Abrir las imágenes con el software imageJ junto con los plugins java desarrollados para obtener los componentes o imágenes requeridas.
5. Separar la imagen en los tres canales de color que la componen, y seguir el proceso solo con el canal rojo.
6. Pasar la imagen a 8 bits.
7. Obtener datos que permitan caracterizar las muestras.
8. Realizar 4 autoconvoluciones sucesivas.
9. Clasificar cada una de las muestras obtenidas y encontrar parámetros o características que permitan diferenciarlas, dependiendo del tratamiento previo, tanto del tipo de lijado en metacrilato como del tipo de corte transversal o radial y lijado posterior en cada una de las muestras de maderas disponibles.

Por último todo el proceso matemático de las imágenes obtenidas se ha realizado mediante el programa ImageJ. En la figura 3.8 se puede ver un esquema del proceso completo utilizado.

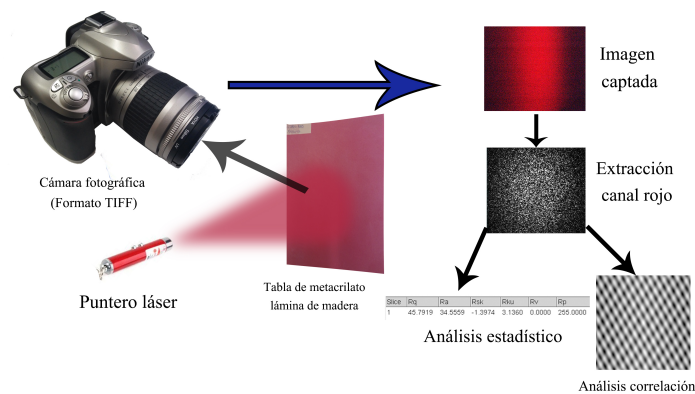


Figura 3.8: Esquema general del proceso

En el experimento se pueden considerar las superficies lijadas como una aproximación a una superficie lambertiana, superficie ideal que al ser iluminada refleja la energía por igual en todas las direcciones. Es, por tanto, una superficie ideal

de reflexión difusa. Ampliando una zona de una superficie difusora lambertiana se aprecia que es áspera, es decir, que no tiene ningún ángulo de reflexión bien definido.

Cuando se iluminan las muestras se observa que la intensidad de la luz dispersa decrece con la distancia al centro de iluminación, lo que puede provocar complicaciones a la hora de analizar las imágenes, afortunadamente las muestras tomadas de cada imagen son de un tamaño que no permite que estas variaciones de intensidad afecten al área analizada, pese a ello hay que tener cuidado añadido en intentar analizar zonas que presenten un nivel de intensidad elevado y homogéneo. Se puede observar un ejemplo de una imagen (canal rojo) captada con la cámara en la figura 3.9.

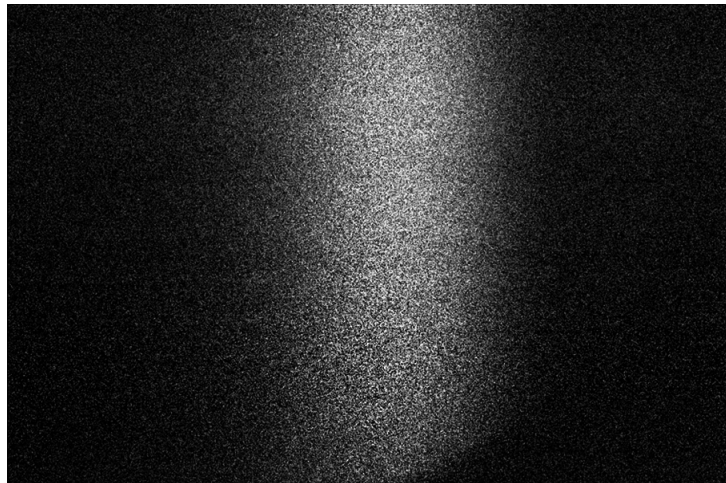


Figura 3.9: Foto captada (canal rojo).

Este estudio está basado en las técnicas de interferometría de moteado estelar usadas en Astronomía, y en interferometría electrónica de patrones de motas (ES-PI), entre otros Rabal *et al.* [36]. La idea principal es que las motas captadas en la imagen presentan un patrón que está relacionado con las estructuras de la superficie analizada. Al tratarse del estudio de interferencias se pueden utilizar herramientas matemáticas que permitan obtener características imperceptibles al ojo humano, consiguiéndose resultados de detalles del orden de la longitud de onda usada, que en este estudio es de 640 nm. El patrón obtenido en las motas captadas en las imágenes no es apreciable o distinguible a primera vista, por ello se usarán procesos de autocorrelación y la determinación de parámetros estadísticos para intentar obtener información útil de dichos patrones.



### 3.2.2.1. Moteado

Para entender mejor el fenómeno estudiado, se presentan los principios de este moteado.

El moteado se produce cuando una superficie rugosa es iluminada mediante una fuente de luz coherente que genera una interferencia múltiple, originando diferentes zonas con mayor o menor luminosidad dando lugar a un patrón. Este moteado varía si se modifican las características de la superficie iluminada, por lo que se intentará utilizar este fenómeno para medir y estudiar dichas características. Las diferentes técnicas que se aprovechan de esta idea se denominan Metrologías del Moteado.

El fenómeno de moteado es fácilmente observable. Utilizando un láser con el haz expandido y proyectado sobre una pared o una hoja de papel, se puede ver como en el disco iluminado aparece un moteado, con regiones brillantes y oscuras; esto se produce debido al fenómeno de interferencia cuando dos ondas de la misma frecuencia e intensidad se superponen.

Una solución de la ecuación diferencia de onda de una perturbación que se propaga a lo largo del eje x puede escribirse como:

$$E(x, t) = E_0 \sin[\omega t - kx] \quad (3.2)$$

donde  $E_0$  es la amplitud de la perturbación. Si se dispone de dos ondas de esta clase con misma amplitud, podemos representar la perturbación resultante de la superposición lineal como

$$\begin{aligned} E &= E_1 + E_2 = 2E_0 \sin\left(\frac{(\omega t - kx_1) + (\omega t - kx_2)}{2}\right) \cos\left(\frac{(\omega t - kx_1) - (\omega t - kx_2)}{2}\right) = \\ &= 2E_0 \sin\left(\omega t - k\frac{(x_2 + x_1)}{2}\right) \cos\left(\frac{k(x_2 - x_1)}{2}\right) \end{aligned} \quad (3.3)$$

Si denotamos como nueva amplitud al termino del coseno como  $A_t$ , y las dos ondas que interfieren constan de la misma longitud de onda y amplitud, el punto en el que interfieren vibrará con la misma frecuencia que la frecuencia del foco, pero con una amplitud que no dependerá del tiempo pero si de la diferencia de caminos entre los dos focos, variando su valor entre 0 y el doble de la amplitud inicial.

$$A_t = 2E_0 \cos\left(\frac{k(x_2 - x_1)}{2}\right) \quad (3.4)$$

Resolviendo los casos en los cuales el coseno se hace 1 o 0 se obtienen las siguientes condiciones para los valores máximo y mínimo del valor de esta amplitud,

$$\text{máximo}(At) = 2E_0 \Rightarrow (x_2 - x_1) = n\lambda \quad (3.5)$$

$$\text{mínimo}(At) = 0 \Rightarrow (x_2 - x_1) = (2n + 1)\frac{\lambda}{2} \quad (3.6)$$

La interferencia constructiva tiene lugar cuando las ondas llegan en fase, es decir, cuando las crestas (o los valles) de una onda coinciden con las crestas (o los valles) de la otra onda, formando una onda con una cresta (o un valle) mayor. En este caso particular, las ondas que interfieren son tales que cuando una de ellas tiene un máximo, la otra también lo tiene; mientras que cuando una de ellas adquiere un mínimo, la otra también lo adquiere. Se dice que las ondas que interfieren están en fase. La onda resultante tiene una amplitud igual a la suma de las amplitudes de cada una de las ondas que interfieren. Las ondas, por decirlo así, se refuerzan una a la otra. Este caso se llama interferencia constructiva.

La interferencia destructiva se produce cuando las ondas llegan en oposición de fase, es decir, cuando la cresta de una onda coincide con el valle de la otra onda, cancelándose mutuamente para producir una onda más pequeña o no producir onda alguna. En las ondas que interfieren se observa que cuando en un punto determinado una de ellas tiene una amplitud en un sentido, la otra tiene una amplitud en el sentido opuesto. Se dice que estas ondas están fuera de fase.

Consideremos un punto, en el cual la onda  $a$  tiene amplitud  $A$  y la onda  $b$  tiene amplitud  $B$ . A diferencia del caso anterior, ahora los sentidos de las ondas son opuestos; mientras una tiene amplitud positiva, la otra tiene amplitud negativa. Por lo tanto, la amplitud neta ahora es la diferencia entre  $A$  y  $B$ . Notamos que en este caso la amplitud de la onda resultante es menor. Por decirlo así, una onda cancela el efecto de la otra. Hay interferencia destructiva. Si ocurriese el caso en que las ondas que interfieren tuvieran justamente la misma amplitud, pero estuvieran absolutamente en contrafase, entonces la cancelación sería completa; en este caso las cantidades  $A$  y  $B$  serían iguales, por lo que su diferencia sería cero [37].

Cuando la luz coherente del láser ilumina una superficie rugosa, siempre que estas rugosidades se encuentren dentro del orden de magnitud de la longitud de onda, estos puntos actuarán como una nuevas fuentes puntuales generando ondas esféricas, éstas interfieren como acabamos de ver ocasionando zonas brillantes y oscuras, tal como se puede observar en la figura 3.10 [38].

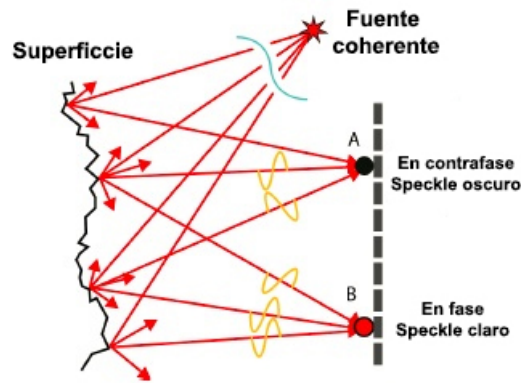


Figura 3.10: Interferencia de luz sobre superficie rugosa

Considerando todas las superficies refractantes que forman la superficie rugosa y que contribuyen con una onda esférica, se obtiene una interferencia múltiple. Esta distribución múltiple de zonas brillantes y oscuras se vuelve sumamente compleja, lo que ofrece la apariencia de moteado, se puede observar un ejemplo del mismo en la figura 3.11.

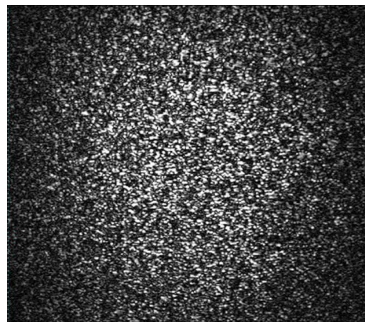


Figura 3.11: Patrón típico de speckle

Si se utilizase luz natural no coherente, la distribución del patrón de interferencias cambiaría continuamente con el tiempo, en cada punto se observaría el promedio temporal de la intensidad que es uniforme, lo que produciría la ausencia de estas motas. Sin embargo, sí podemos observar a partir de iluminación natural efectos derivados de este fenómeno cuando se observa la superficie de un CD.

Se pueden definir dos tipos de moteado[39]:

1. Moteado subjetivo. Si la imagen de moteado es el producto de la reflexión de la luz en una sola superficie, El tamaño y distribución de las motas depende de las características ópticas de lente y cámara. El tamaño medio de cada mota está dado por

$$\sigma = 1,22 \cdot \frac{\lambda \cdot d}{L} \quad (3.7)$$

donde  $\lambda$  es la longitud de onda del láser,  $L$  es el diámetro de la superficie iluminada y  $d$  es la distancia del plano a la superficie.

2. Moteado subjetivo. La imagen se obtiene a través de dos reflexiones consecutivas en distintas superficies; en este caso las motas son indiferentes a los parámetros ópticos de la cámara, y el tamaño medio de la mota está dado por

$$\sigma = 1,22 \cdot \frac{\lambda \cdot Z}{D} \quad (3.8)$$

donde  $D$  es el diámetro de la pupila de salida de sistema óptico y  $Z$  es la distancia desde el plano en que está situada dicha pupila y el sensor de la cámara.

En la figura 3.12 [39] se muestra un esquema de los dos sistemas expuestos: moteado objetivo y moteado subjetivo.

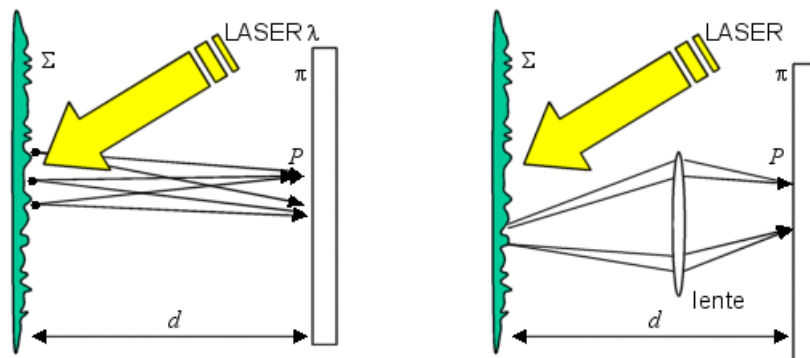


Figura 3.12: Moteado objetivo (izquierda) y moteado subjetivo (derecha)

En este trabajo se han tomado imágenes de moteado subjetivo, teniendo el cuidado de mantener siempre las mismas condiciones y ajustes en la cámara.

Las propiedades estadísticas de los patrones son muy complicadas, gracias a los estudios de Goodman [40] podemos obtener algunos fundamentos básicos, entre los que se encuentran la distribución de iluminación así como su función de probabilidad:

$$P(I) = \frac{I}{\langle I \rangle} \cdot e^{(-1/\langle I \rangle)} \quad (3.9)$$

donde  $\langle I \rangle$  es la media de a intensidad luminosa y  $P\langle I \rangle$  es la probabilidad de que supere el umbral  $I$ .

En el spekle subjetivo, el tamaño medio de una mota individual está estrechamente relacionado con el sistema óptico utilizado para su observación, siguiendo la siguiente expresión.

$$\sigma = 1,22 \cdot (1 + M) \cdot \lambda \cdot F \quad (3.10)$$

en la que M es el aumento de la imagen y F es la apertura de la lente; así, el tamaño de la mota aumentará cuando disminuya la apertura numérica de la lente.

## Aplicaciones

A comienzos de los años 60 aparecen los primeros láseres de onda continua, con lo que se dispuso de acceso a fuentes de luz coherente; cuando esta nueva herramienta se intentó utilizar como fuente de luz para la fotografía se encontró este granulado sobre las diversas imágenes captadas, considerado como ruido, por lo que se consideró un fracaso el uso de esta metodología. Sin embargo una vez se interpretó correctamente este fenómeno se descubrió un nuevo acceso a la observación de diferentes aspectos de las imágenes captadas, que ha dado lugar al surgimiento de nuevas aplicaciones.

Entre algunas de las aplicaciones más importantes mediante el estudio de este fenómeno, se encuentra la observación astronómica, usada en los telescopios terrestres, la medida de objetos en tres dimensiones estudiando la deformidad de la emisión de un patrón conocido, medidas en función de vibraciones estudiando las variaciones del moteado producido, evaluar el flujo bidimensional sanguíneo cerebral con alta resolución temporal y espacial, deformación en los planos de la dirección del desplazamiento y en la opuesta.

En ingeniería mecánica es posible utilizar este fenómeno para estudiar estados de tensión, inhomogeneidades en superficies, diferentes rugosidades o acabados superficiales, ... En lo que resta de trabajo se intentará ofrecer un estudio sobre este último aspecto.

### 3.2.3. Patrones obtenidos mediante autocorrelación.

El objetivo es descubrir si dentro de estas motas que presentan a priori una distribución espacial aleatoria, existen o no patrones repetitivos, y obtener características que permitan clasificar las diferentes muestras tratadas, para ello se han usado procesos de autocorrelación de modo iterativo.

La función de autocorrelación se define como la correlación cruzada de una señal consigo misma, ésta resulta de gran utilidad para encontrar patrones ocultos repetitivos dentro de una señal, como por ejemplo, la periodicidad de una señal enmascarada bajo el ruido.

### 3.2.3.1. Correlación espacial

El proceso de convolución calcula un nuevo valor de intensidad para cada pixel de la imagen, basándose en los vecinos que rodean a éste, que contribuyen con un porcentaje de su valor.

En el dominio espacial que define esta operación mediante la ecuación 3.11, en la que el parámetro S se corresponde con el sumatorio de todos los elementos de la máscara usada; es una normalización mediante la cual obtenemos valores de salida comprendidos entre los límites 0 y 255 valores de gris, que pueden tomar los pixels de las imágenes.

$$g(u, v) = \frac{1}{S_{m \times n}} \sum_i \sum_j [f(i, j) \cdot h(u - i, v - j)] \quad (3.11)$$

Una imagen más gráfica del proceso es la de la figura 3.13 [34]. El proceso básicamente consiste en rotar 180 grados la máscara usada, en nuestro caso la misma imagen, multiplicar cada elemento de la máscara con su correspondiente de la imagen y sumar todos los resultados para finalmente normalizar, se repite este proceso desplazando la máscara hasta completar todos los pixels de la imagen.

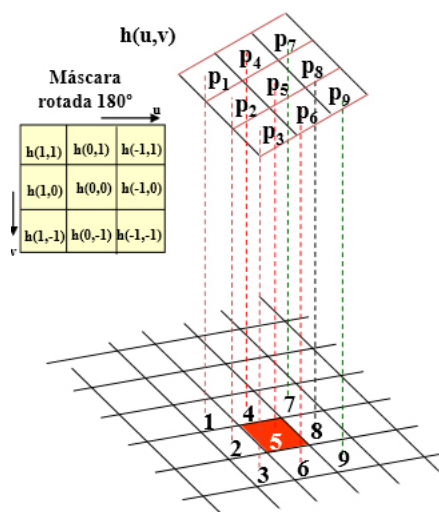


Figura 3.13: Convolución espacial.

Utilizar la autocorrelación da resultados similares que la autoconvolución, ya que solo se diferencian en un signo, lo cual se traduce en una rotación en el plano 2D. La función de autocorrelación se define como la correlación cruzada de la señal consigo misma. Esta resulta de gran utilidad para encontrar patrones repetitivos dentro de una señal, como, la periodicidad de una señal enmascarada bajo el ruido o para identificar la frecuencia fundamental de una señal que no contiene dicha componente, pero aparecen numerosas frecuencias armónicas de esta [41].

Las primeras autocorrelaciones de las imágenes presentan un pico de intensidad completamente blanco en el centro lo que se corresponde con lo que se obtendría de una imagen compuesta por ruido blanco gaussiano. Según aumentamos el número de iteraciones de autocorrelación aparecen estructuras más regulares, que ofrecen información sobre la estructura microscópica de las muestras analizadas.

Este proceso requiere un procesamiento computacional elevado, que puede simplificarse si se utilizan técnicas basadas en otras transformaciones, como la transformada de Fourier, como hace el programa imageJ. En concreto la DFT, transformada discreta de Fourier, matemáticamente se define:

$$X_n = \sum_{k=0}^{N-1} x_k e^{-\frac{2\pi i}{N} nk}; n = 0, 1, \dots, N - 1 \quad (3.12)$$

Aunque como la información de las imágenes es toda real, realmente se suele utilizar la transformada discreta de Hartley (FHT) que solo usa parámetros reales, definida como:

$$H_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n [\cos(\frac{2\pi}{N} nk) + \sin(\frac{2\pi}{N} nk)]; k = 0, 1, \dots, N - 1 \quad (3.13)$$

Usando esta transformada las operaciones se simplifican y mediante la transformada inversa de Hartley con el factor de escala apropiado se pueden obtener los resultados descritos anteriormente.

La convolución, empleando la FHT se define de la siguiente manera:

$$Z_k = \frac{1}{2} [X_k(Y_k + Y_{N-k}) + X_{N-k}(Y_k - Y_{N-k})] \quad (3.14)$$

$$Z_{N-k} = \frac{1}{2} [X_{N-k}(Y_k + Y_{N-k}) + X_N(Y_k - Y_{N-k})] \quad (3.15)$$

En la figura 3.14 se puede observar un ejemplo de este resultado. Se observa como al aumentar el número de iteraciones aparecen estructuras más regulares con períodos medibles.

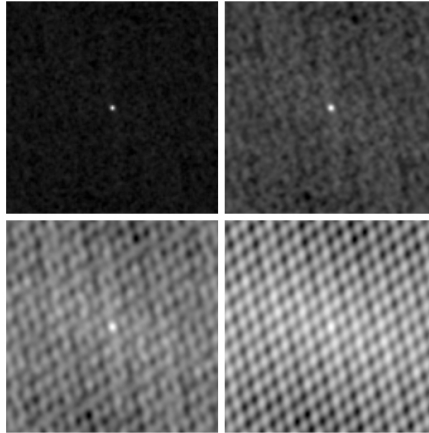


Figura 3.14: Proceso de autocorrelación iterativa.

Pese a que los patrones son visibles al ojo humano, es recomendable obtener gráficas que permitan caracterizar estos patrones que, además de ser más fáciles de reconocer visualmente, puedan ser medibles matemáticamente.

Para ello se intentó obtener una gráfica de la variación de grises en una dimensión de las muestras obtenidas anteriormente, mediante el uso de la herramienta plot.

Cuando se intentó llevar a cabo este método apareció la problemática de la dirección correcta para analizar esta variación, muchas de estas muestras tienen disposiciones de elipsoides, mediante la transformada de hough podemos encontrar las elipses que mejor se adaptan a estas formas y que nos permiten obtener la dirección del eje mayor, como se muestra en la figura 3.15.

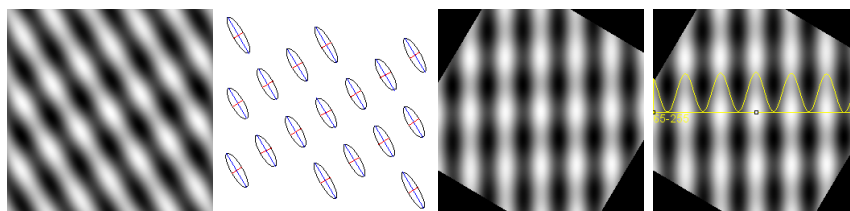


Figura 3.15: De izquierda a derecha: muestra, elipses detectadas, imagen girada, plot.



A continuación en la figura 3.16 se muestran las diferentes gráficas obtenidas de las muestras sin girar y giradas:

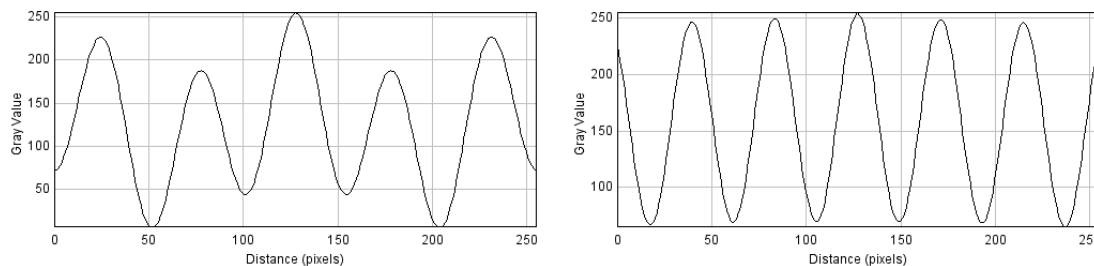


Figura 3.16: Gráficas sin girar (izquierda) y girada (derecha)

Parecía que el problema estaba resuelto pero cuando se obtuvieron más muestras se observó que aparecían patrones más complicados que no tenían una sola dirección de variación, por lo que este procedimiento no daba buenos resultados o no era totalmente válido ya que se perdían datos.

Para subsanar este problema se dispuso a crear un stack superponiendo una serie de imágenes obtenidas a partir de la misma muestra pero girada un grado cada vez. Posteriormente se unieron todas las imágenes obteniendo la media y la mediana que toma cada pixel del stack anterior, las dos muestras tienen cierto parecido pero la mediana muestra un contraste más alto que resulta más útil a la hora de evaluar las muestras. De esta manera obtenemos una imagen con información de la variación de gris en todas las direcciones para poder obtener los gráficos de la variación de gris correspondientes, en la figura 3.17 se muestran dos ejemplos de los resultados de este procedimiento, a la izquierda el resultado con la media y a su derecha con la mediana se puede observar como esta presenta un mayor contraste..

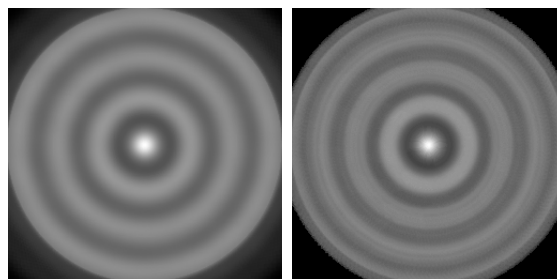


Figura 3.17: Ejemplo de resultado de rotación media (derecha), mediana (izquierda)

### 3.2.4. Análisis estadístico

El método anteriormente visto trata de encontrar y acentuar los patrones subyacentes en la muestra obtenida para que sean claramente visibles, en este segundo análisis el objetivo es encontrar características estadísticas, sobre la propia imagen del moteado sin tratar, las cuales nos permitan diferenciar las diferentes muestras de prueba. Puesto que la luz procedente de nuestro láser pertenece al espectro visible del rojo, realizaremos el proceso únicamente quedándonos con este canal, para evitar posibles problemas con luz exterior, o ruido que presente el mismo sensor cmos.

Para este experimento se utilizaron los mismos parámetros que se utilizan normalmente a la hora de analizar las texturas superficiales por otros métodos mecánicos. En particular parámetros de rugosidad que miden las irregularidades más finas en la textura de la superficie que son inherentes en el proceso de producción, estos parámetros miden variaciones en la verticalidad de la superficie.

Todas las muestras se analizaron con distintos parámetros como son los valores máximos y mínimos alcanzados la desviación media aritmética, valor cuadrático medio, curtosis, asimetría. Los mejores resultados se obtuvieron con la desviación media aritmética y el valor cuadrático medio, como se verá en el siguiente capítulo.

**Valor máximo:** Valor máximo que toman todos los pixeles que forman parte de nuestra imagen.

**Valor mínimo:** Valor mínimo que toman todos los pixeles que forman parte de nuestra imagen.

**Desviación media aritmética:** La desviación respecto a la media es la diferencia en valor absoluto entre cada valor de la variable estadística y la media aritmética.

$$Di = |x - \bar{x}| \quad (3.16)$$

La desviación media es la media aritmética de los valores absolutos de las desviaciones respecto a la media, la denotaremos como Ra, este parámetro describe la media de elevación de la superficie en N puntos.

$$Ra = \frac{\sum |x_i - \bar{x}|}{N} \quad (3.17)$$

**Curtosis:** En teoría de la probabilidad y estadística, la curtosis es una medida de la forma. Así, las medidas de curtosis tratan de estudiar la proporción de la varianza

que se explica por la combinación de datos extremos respecto a la media en contraposición con datos poco alejados de la misma. Una mayor curtosis implica una mayor concentración de datos muy cerca de la media de la distribución. Se define como

$$Rku = \frac{\mu_4}{\sigma^4} - 3 \quad (3.18)$$

donde  $\mu_4$  es el cuarto momento en torno a la media y  $\sigma$  es la desviación estándar, al final se ha sustraído 3 (que es la curtosis de la Normal) con objeto de generar un coeficiente que valga 0 para la Normal

- Una distribución gaussiana tiene un valor de curtosis de 0.
- Una distribución más plana tiene una curtosis negativa.
- Una distribución más estrecha que una distribución de Gauss tiene una curtosis positiva.

**Asimetría:** Las medidas de asimetría son indicadores que permiten establecer el grado de simetría (o asimetría) que presenta una distribución de probabilidad de una variable aleatoria. Si es positiva, la distribución es asimétrica positiva o a la derecha. Si es negativa, la distribución es asimétrica negativa o a la izquierda. Se define como:

$$Rsk = \frac{\mu_3}{\sigma^3} \quad (3.19)$$

donde  $\mu_3$  es el tercer momento en torno a la media y  $\sigma$  es la desviación estándar.

**Valor cuadrático medio (desviación típica):** Normalmente en la industria se emplea el valor cuadrático medio, que denominaremos Rq, para una colección de N valores de una variable discreta x, este parámetro es más sensible que Ra a los valores extremos debido a la operación de la raíz cuadrada, viene dado por la fórmula:

$$Rq = \sqrt{\sum \frac{|\bar{x} - x_i|^2}{N}} \quad (3.20)$$



# Capítulo 4

## Resultados

Una vez realizadas todas las medidas y cálculos como se ha especificado en el capítulo anterior se procede a mostrar los resultados que arroja dicho procedimiento.

Se presentan los resultados obtenidos mediante la autocorrelación iterativa y posteriormente mediante el análisis de parámetros tanto del metacrilato como de las maderas.

### 4.1. Autocorrelación

A continuación se muestran los diversos resultados obtenidos para cada uno de los casos, de cada una de las muestras se ha repetido el procedimiento para distintas zonas de cada tabla analizada, lo que se muestra es la mediana de los resultados obtenidos en cada zona, para posteriormente obtener los resultados en conjunto de todas las diferentes muestras con la mediana de todas las zonas así como la desviación típica.

Se tomaron 10 muestras diferentes de cada lijado, con un análisis de 8 zonas de cada muestra, variando los ángulos y voltajes hacen un total de 2480 muestras solo de metacrilato, aquí solo se presentan 3 muestras significativas por cada lijado. Pese a que se tomaron muestras con distintos ángulos de inclinación e intensidades para el láser, se presentan las que han ofrecido mejores resultados, 45 grados de inclinación para el láser y la cámara y 3 voltios de alimentación para el láser.

#### 4.1.1. Metacrilato

A continuación se presentan los resultados obtenidos para las láminas de metacrilato, para cada uno de los distintos lijados. Se muestra los resultados de las cuartas iteraciones de cada muestra de cada zona analizada mostrando su mediana.

#### 4.1.1.1. Lijado P80

Así, para el lijado P80 de la muestra 1 se representa la cuarta iteración de cada una de sus zonas figura 4.1 y la media de todas ellas y su desviación típica figura 4.2.

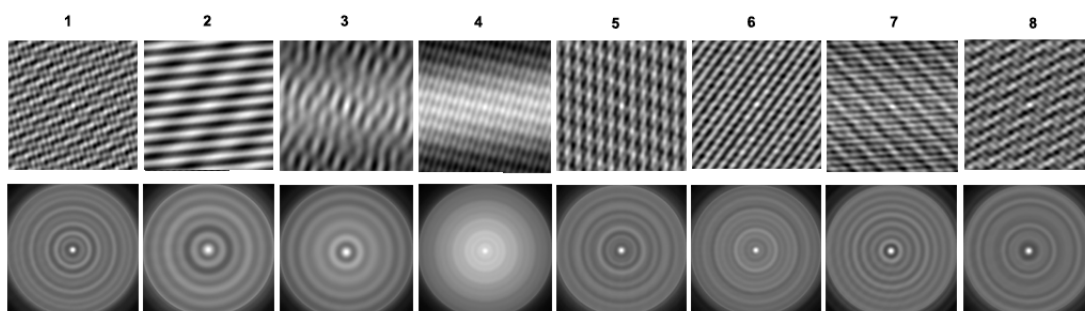


Figura 4.1: P80 Cuarta iteración de cada zona de la muestra 1

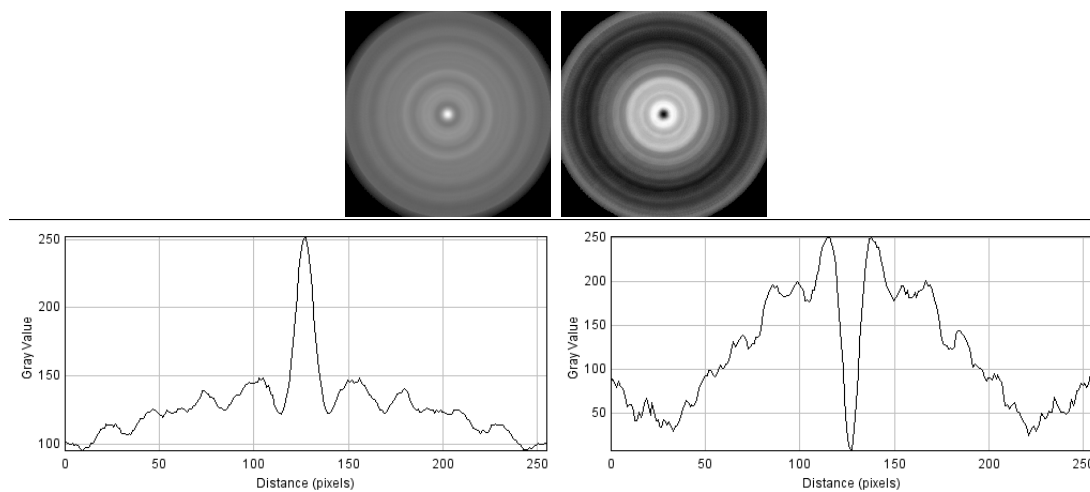


Figura 4.2: P80 Media y desviación típica totales muestra 1

Para el lijado P80 de la muestra 2 se representa la cuarta iteración de cada una de sus zonas figura 4.3 y la media de todas ellas y su desviación típica figura 4.4.

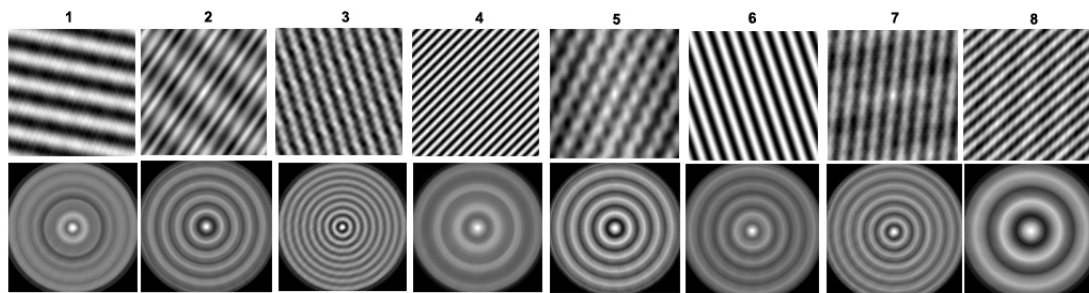


Figura 4.3: P80 Cuarta iteración de cada zona de la muestra 2

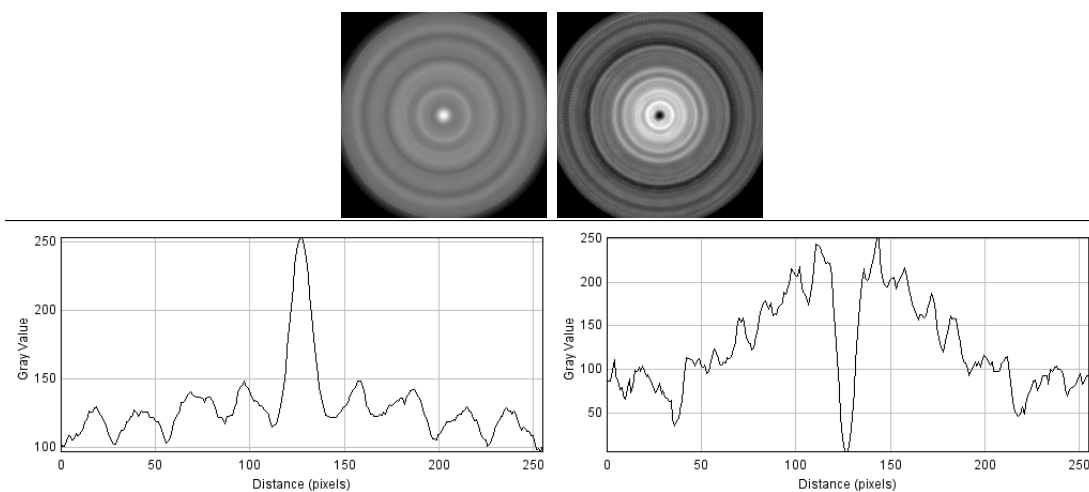


Figura 4.4: P80 Media y desviación típica totales muestra 2

Para el lijado P80 de la muestra 3 se representa la cuarta iteración de cada una de sus zonas figura 4.5 y la media de todas ellas y su desviación típica figura 4.6.

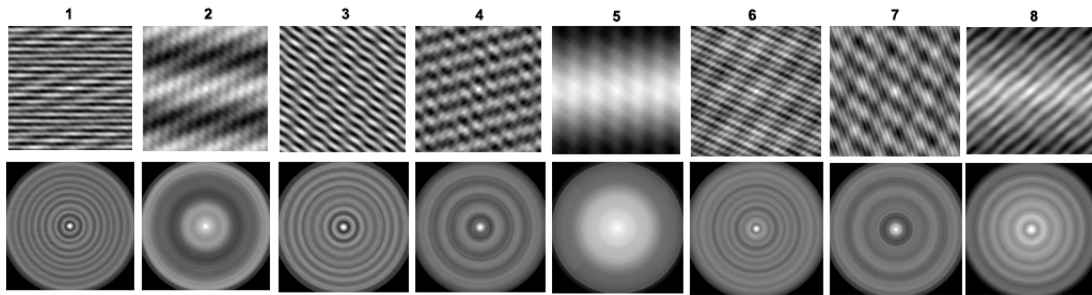


Figura 4.5: P80 Cuarta iteración de cada zona de la muestra 3

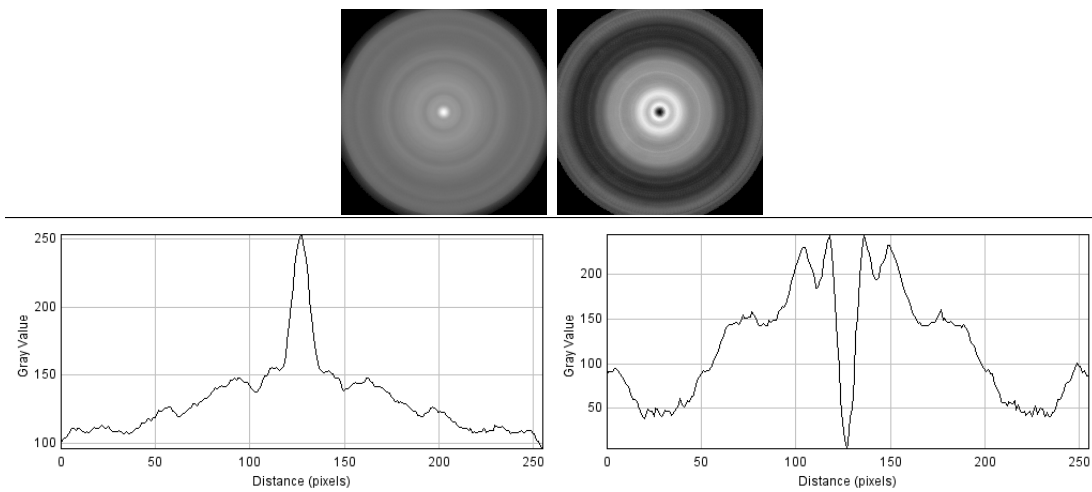


Figura 4.6: P80 Media y desviación típica totales muestra 3

Considerando todas las muestras anteriores, en la figura 4.7 se representa la media y la desviación típica del conjunto de todas ellas.

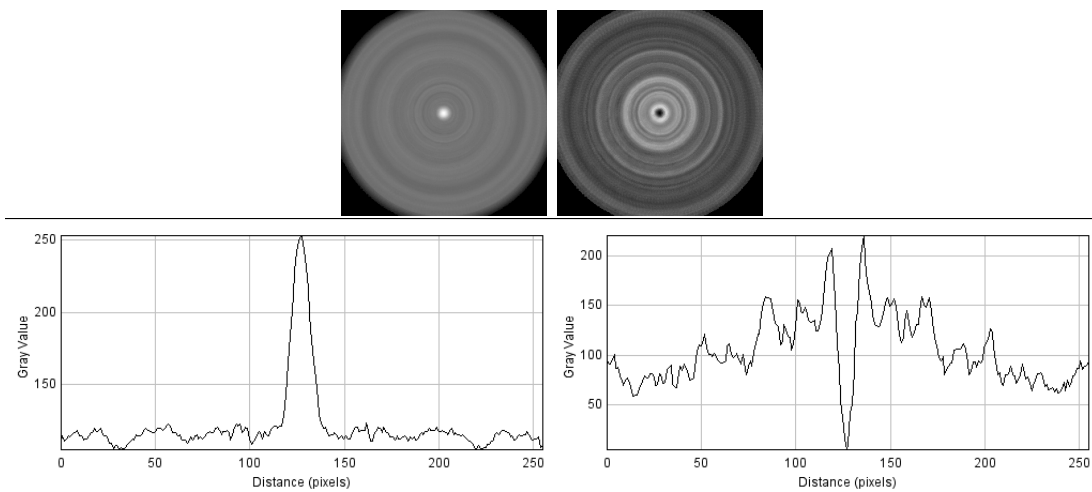


Figura 4.7: P80 Media y desviación típica de todas las muestras



#### 4.1.1.2. Lijado P120

Así, para el lijado P120 de la muestra 1 se representa la cuarta iteración de cada una de sus zonas figura 4.8 y la media de todas ellas y su desviación típica figura 4.9.

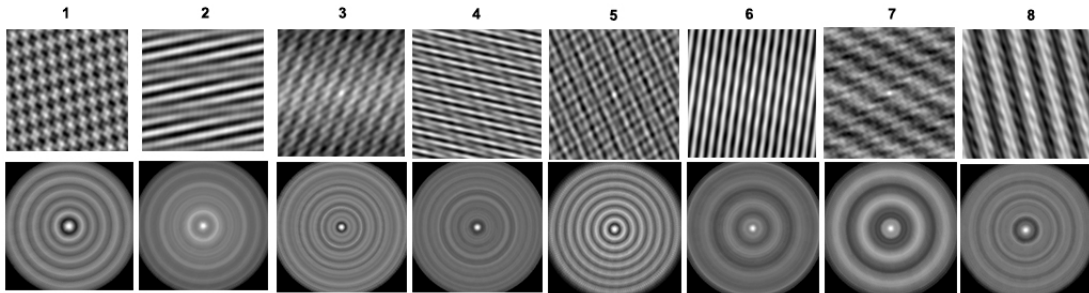


Figura 4.8: P120 Cuarta iteración de cada zona de la muestra 1

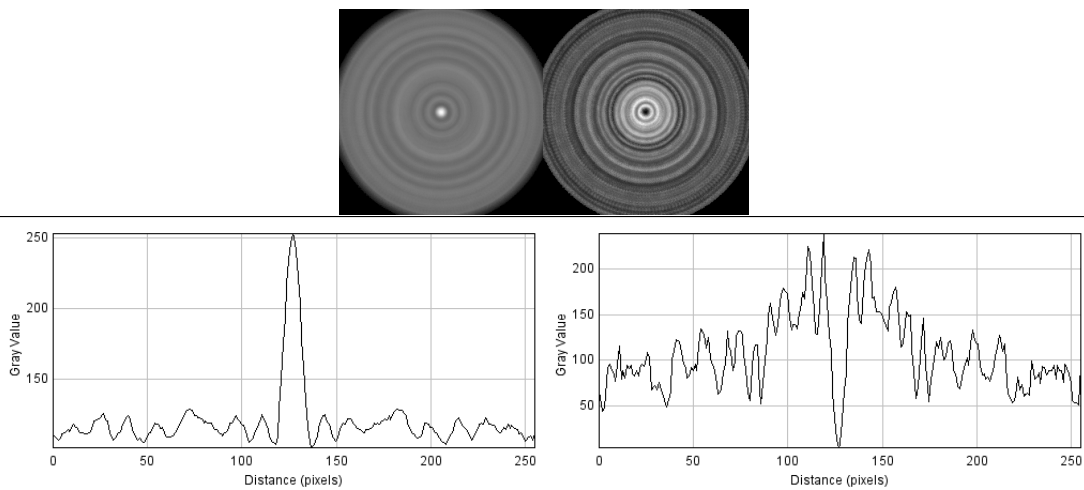


Figura 4.9: P120 Media y desviación típica totales muestra 1

Para el lijado P120 de la muestra 2 se representa la cuarta iteración de cada una de sus zonas figura 4.10 y la media de todas ellas y su desviación típica figura 4.11.

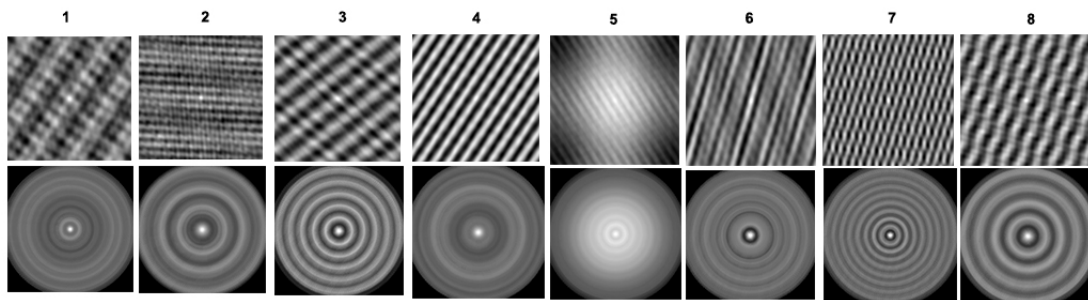


Figura 4.10: P120 Cuarta iteración de cada zona de la muestra 2

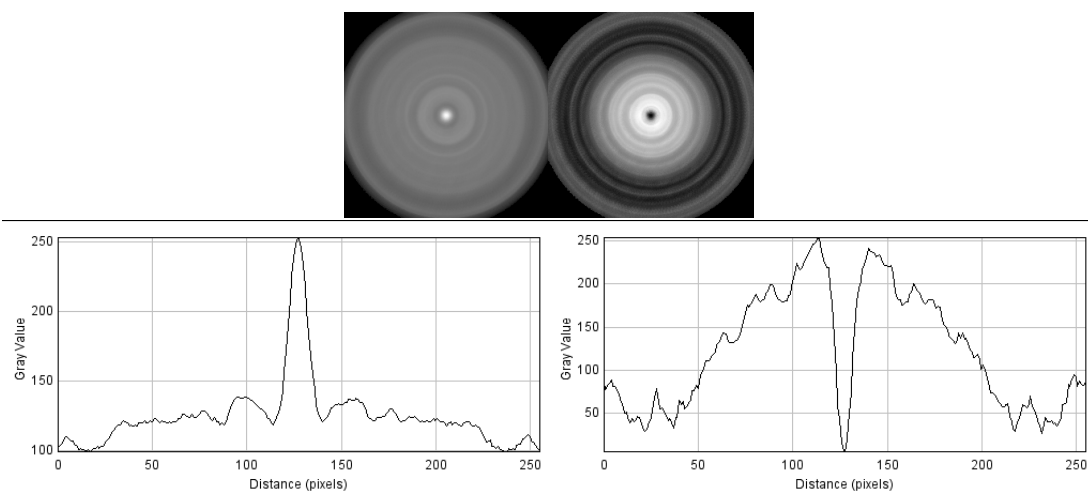


Figura 4.11: P120 Media y desviación típica totales muestra 2

Para el lijado P120 de la muestra 3 se representa la cuarta iteración de cada una de sus zonas figura 4.12 y la media de todas ellas y su desviación típica figura 4.13.

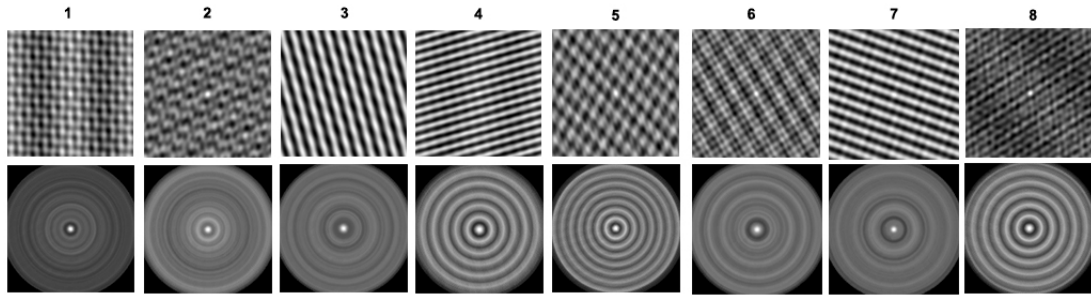


Figura 4.12: P120 Cuarta iteración de cada zona de la muestra 3

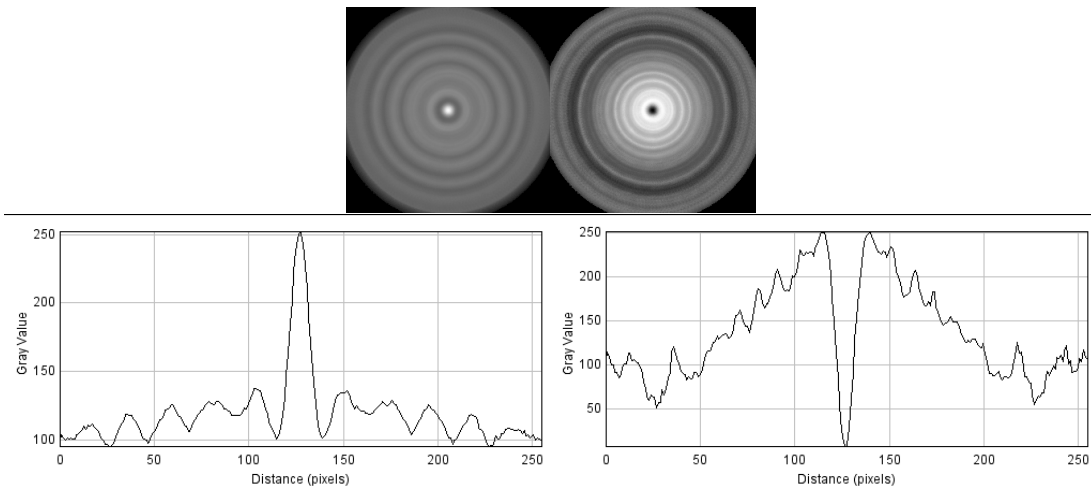


Figura 4.13: P120 Media y desviación típica totales muestra 3

Considerando todas las muestras anteriores, en la figura 4.14 se representa la media y la desviación típica del conjunto de todas ellas.

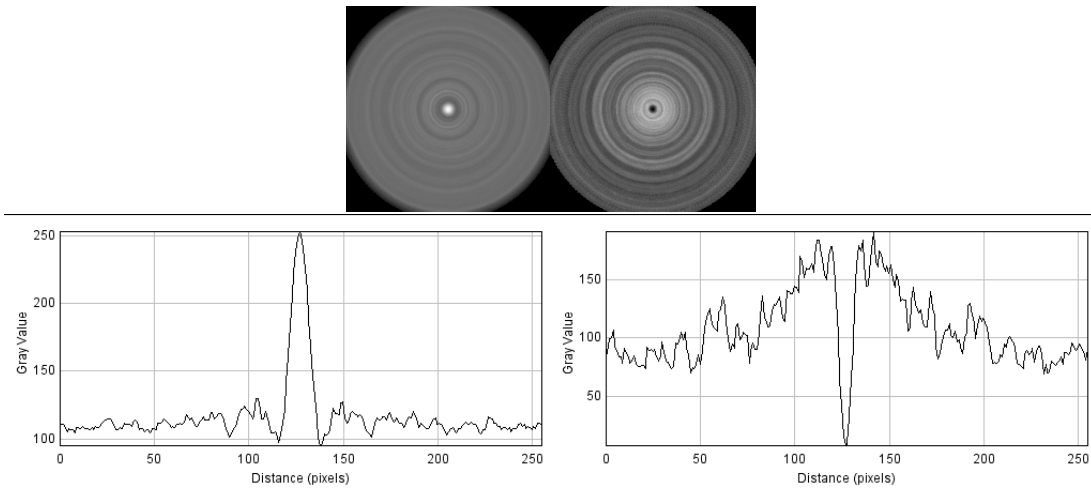


Figura 4.14: P120 Media y desviación típica de todas las muestras

#### 4.1.1.3. Lijado P220

Así, para el lijado P220 de la muestra 1 se representa la cuarta iteración de cada una de sus zonas figura 4.15 y la media de todas ellas y su desviación típica figura 4.16.

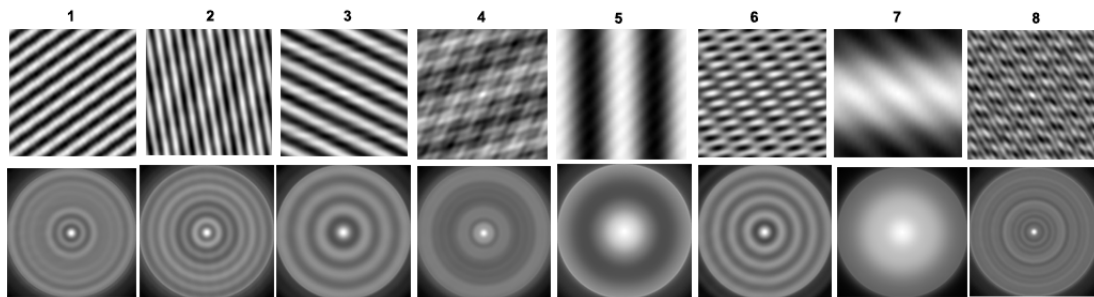


Figura 4.15: P220 Cuarta iteración de cada zona de la muestra 1

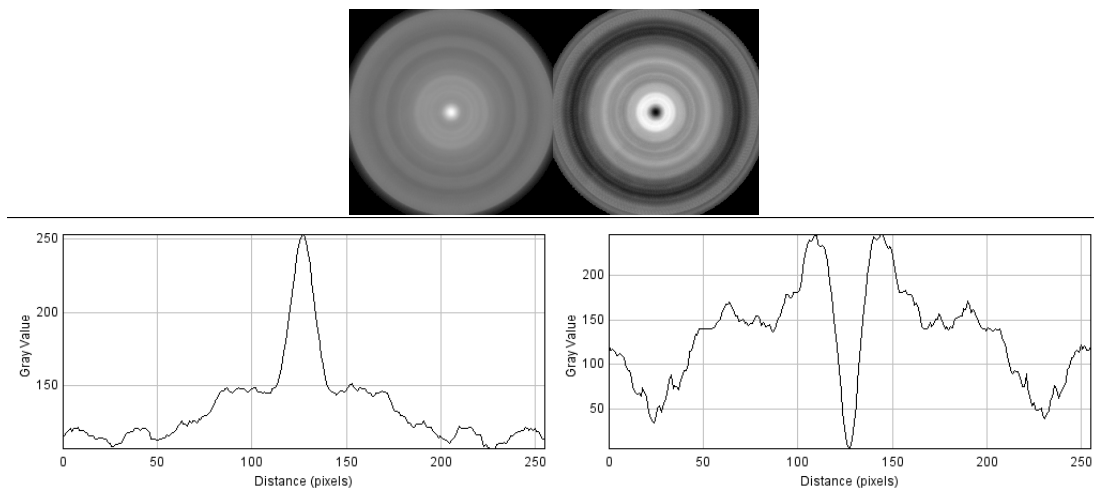


Figura 4.16: P220 Media y desviación típica totales muestra 1

Para el lijado P220 de la muestra 2 se representa la cuarta iteración de cada una de sus zonas figura 4.17 y la media de todas ellas y su desviación típica figura 4.18.

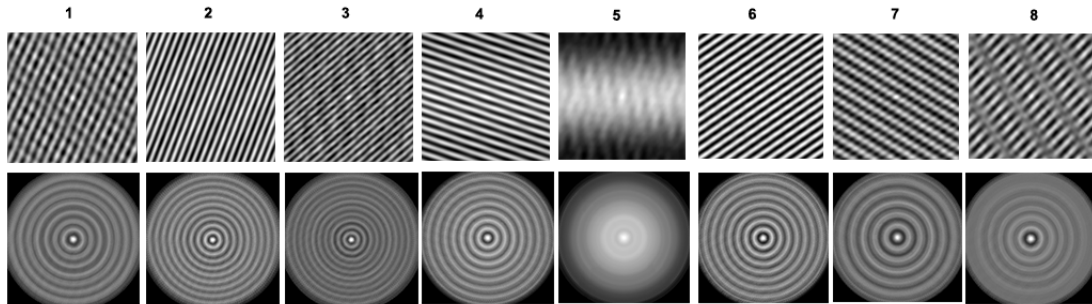


Figura 4.17: P220 Cuarta iteración de cada zona de la muestra 2

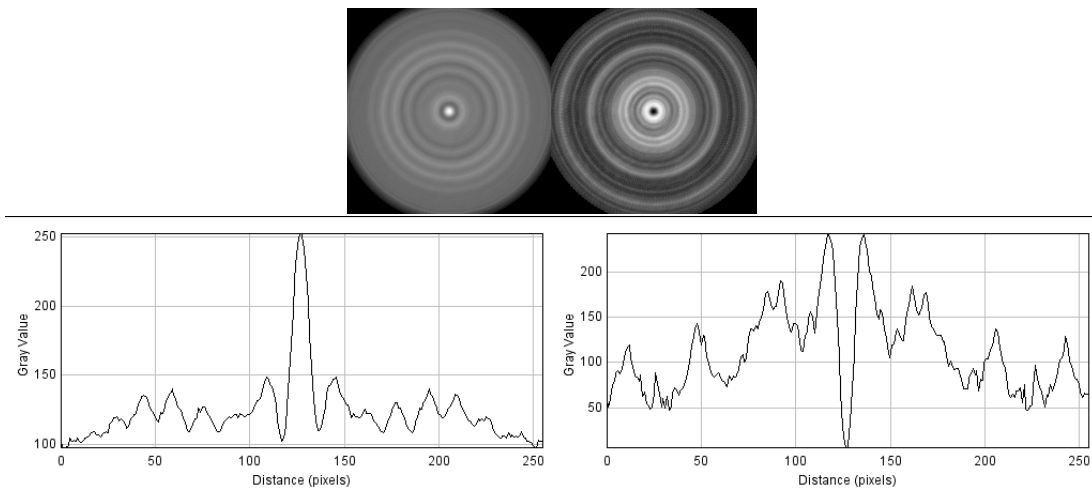


Figura 4.18: P220 Media y desviación típica totales muestra 2

Para el lijado P220 de la muestra 3 se representa la cuarta iteración de cada una de sus zonas figura 4.19 y la media de todas ellas y su desviación típica figura 4.20.

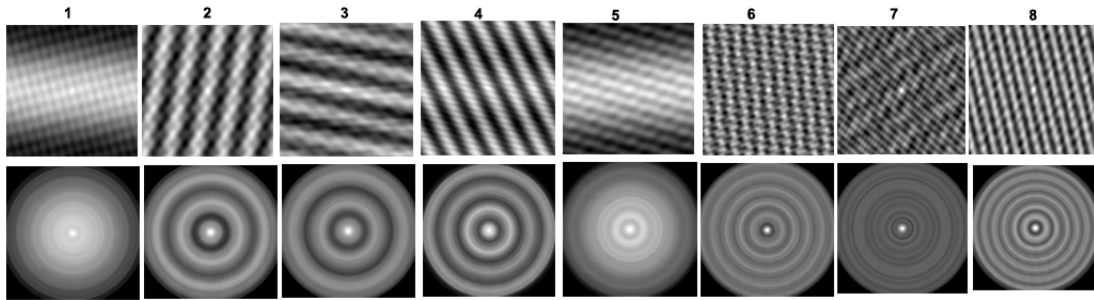


Figura 4.19: P220 Cuarta iteración de cada zona de la muestra 3

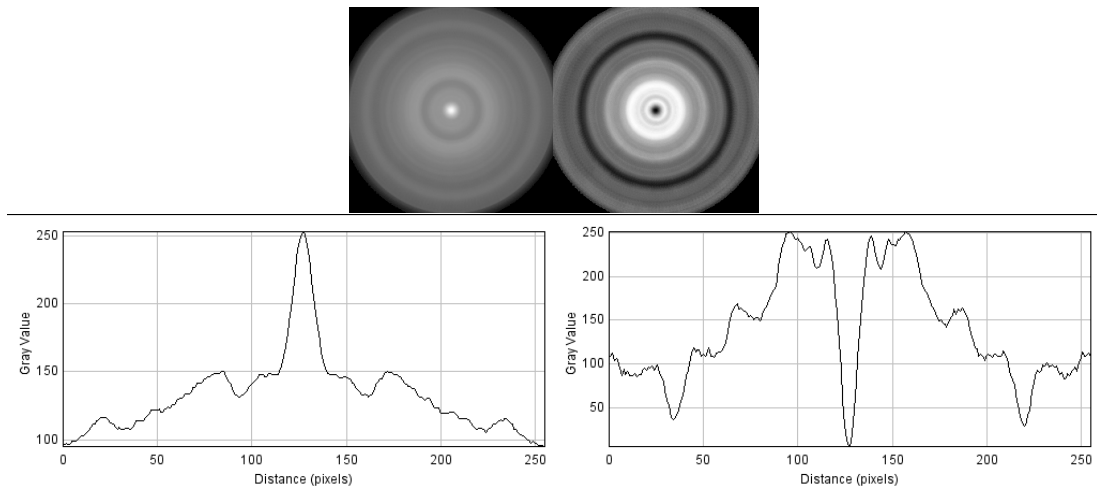


Figura 4.20: P220 Media y desviación típica totales muestra 3

Considerando todas las muestras anteriores, en la figura 4.21 se representa la media y la desviación típica del conjunto de todas ellas.

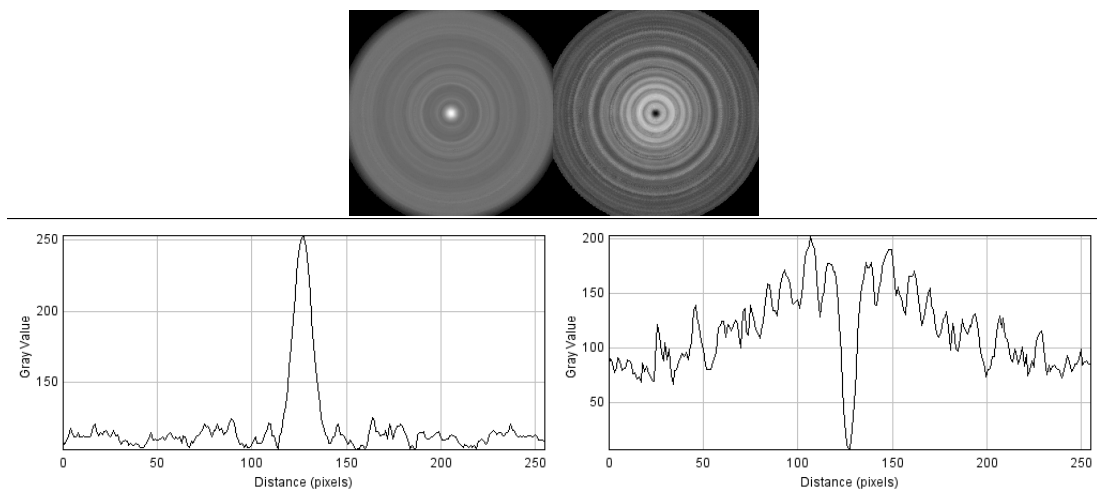


Figura 4.21: P220 Media y desviación típica de todas las muestras

#### 4.1.1.4. Sin lijar

Así, para la muestra sin lijar 1 se representa la cuarta iteración de cada una de sus zonas figura 4.22 y la media de todas ellas y su desviación típica figura 4.23.

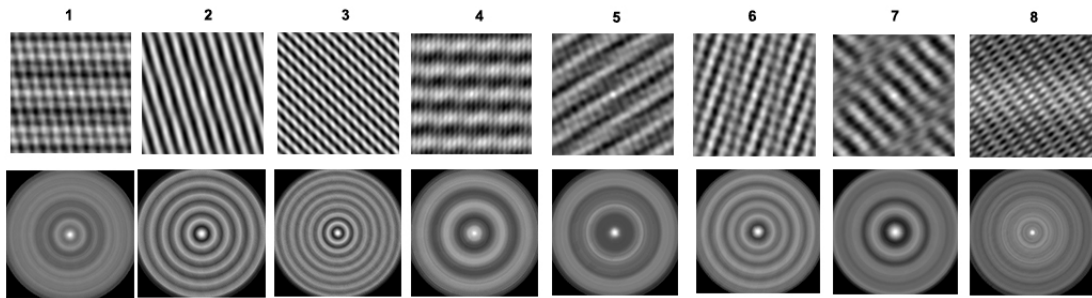


Figura 4.22: Sin lijar Cuarta iteración de cada zona de la muestra 1

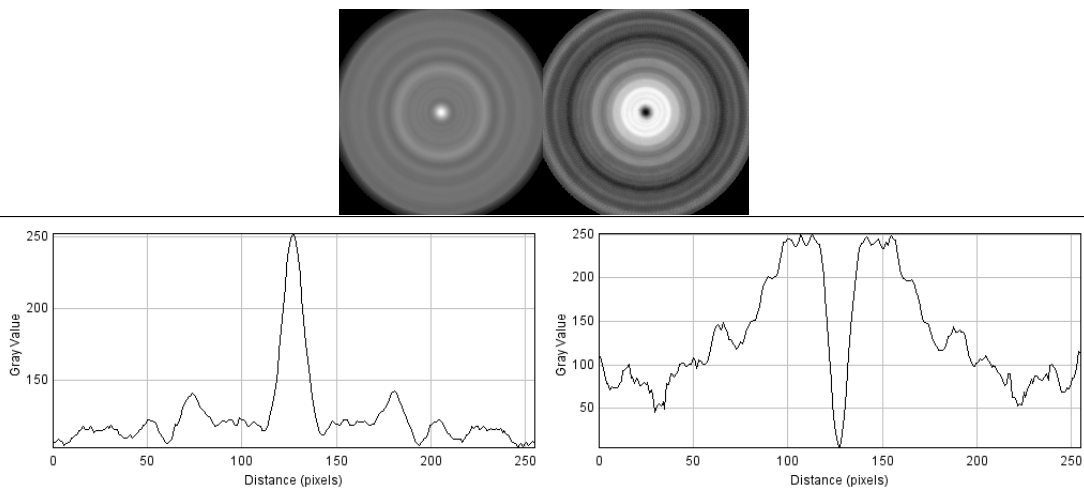


Figura 4.23: Sin lijar Media y desviación típica totales muestra 1

Para la muestra sin lijar 2 se representa la cuarta iteración de cada una de sus zonas figura 4.24 y la media de todas ellas y su desviación típica figura 4.25.

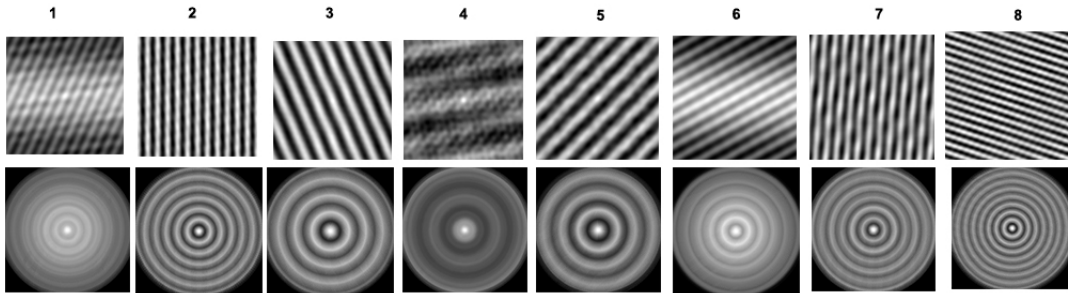


Figura 4.24: Sin lijar Cuarta iteración de cada zona de la muestra 2

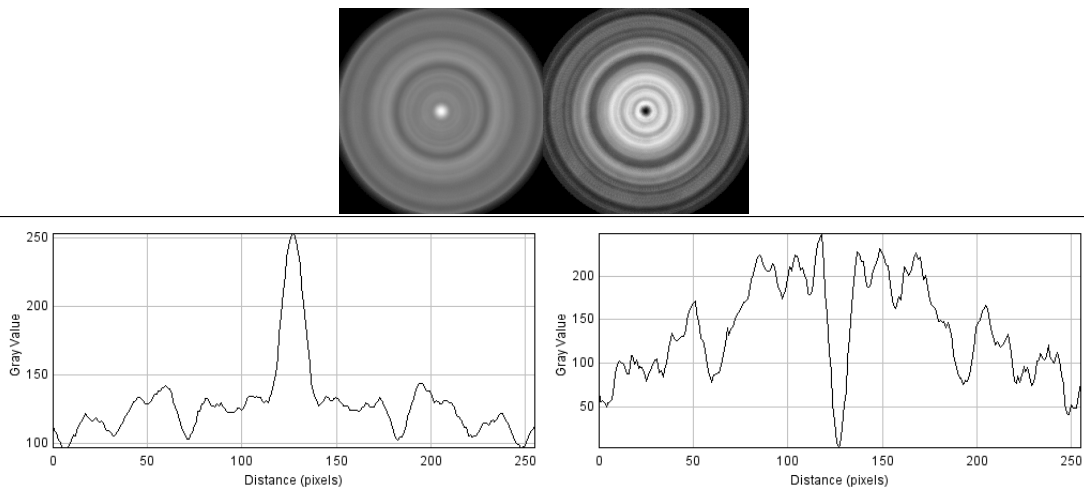


Figura 4.25: Sin lijar Media y desviación típica totales muestra 2



Para la muestra sin lijar 3 se representa la cuarta iteración de cada una de sus zonas figura 4.26 y la media de todas ellas y su desviación típica figura 4.27.

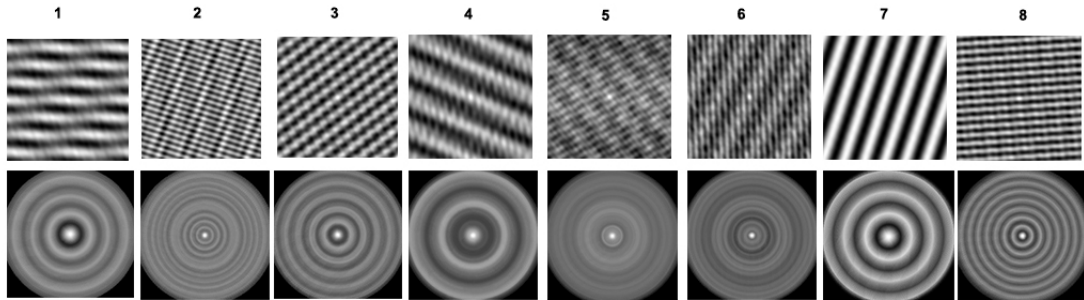


Figura 4.26: Sin lijar Cuarta iteración de cada zona de la muestra 3

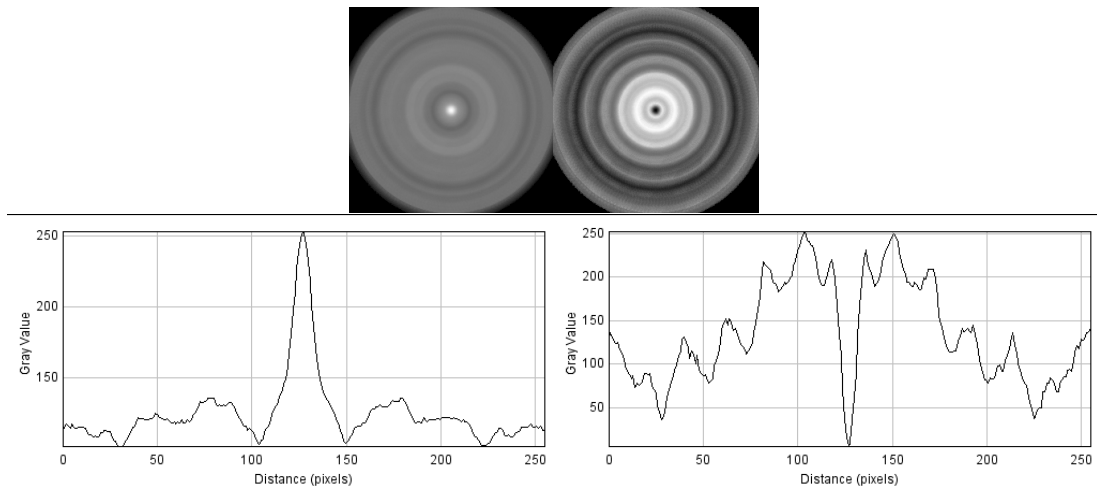


Figura 4.27: Sin lijar Media y desviación típica totales muestra 3

Considerando todas las muestras anteriores, en la figura 4.21 se representa la media y la desviación típica del conjunto de todas ellas.

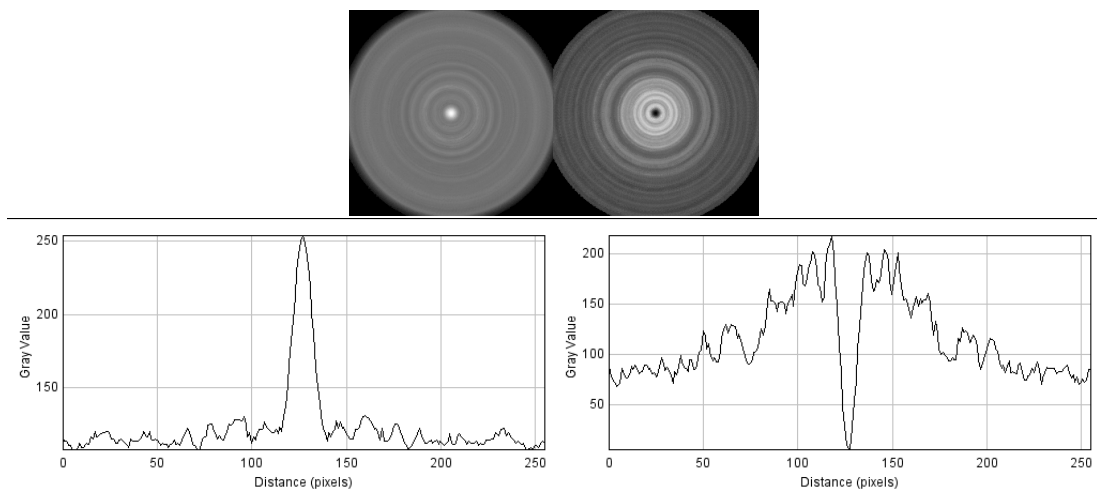


Figura 4.28: Sin lijar Media y desviación típica de todas las muestras

### 4.1.2. Madera

Una vez realizado el procedimiento con un material controlable y lijado por nosotros mismos como es el metacrilato, se procede a analizar muestras más complicadas y menos controladas como son tablillas de madera. Se cuenta con muestras las cuales se han obtenido mediante un corte transversal y otras en las que el corte es radial con respecto al tronco del árbol, de cada una de estas dos categorías se tienen otros tres tipos de muestras con solo el corte sin lijar, con un lijado fino y con un lijado más tosco. Puesto que el número de muestras de los que se dispone es menor que en el caso del metacrilato se representan solo dos imágenes de cada muestra representativas, que contienen la cuarta iteración, su imagen obtenida con la mediana al girarla y la gráfica obtenida correspondiente.

#### CORTE RADIAL

Así, para las muestras con el corte radial se representa la cuarta iteración de cada lámina y sus gráficas correspondientes figura 4.29.

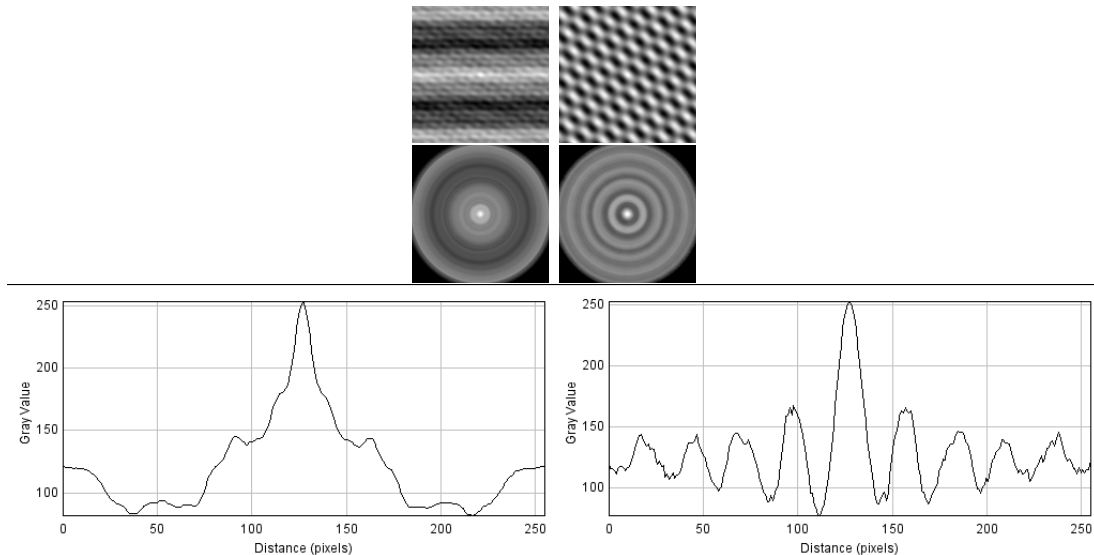


Figura 4.29: Cuarta iteración y gráfica corte radial

### LIJADO GRUESO CORTE RADIAL

Así, para las muestras con el corte radial y posterior lijado grueso se representa la cuarta iteración de cada lámina y sus gráficas correspondientes figura 4.30.

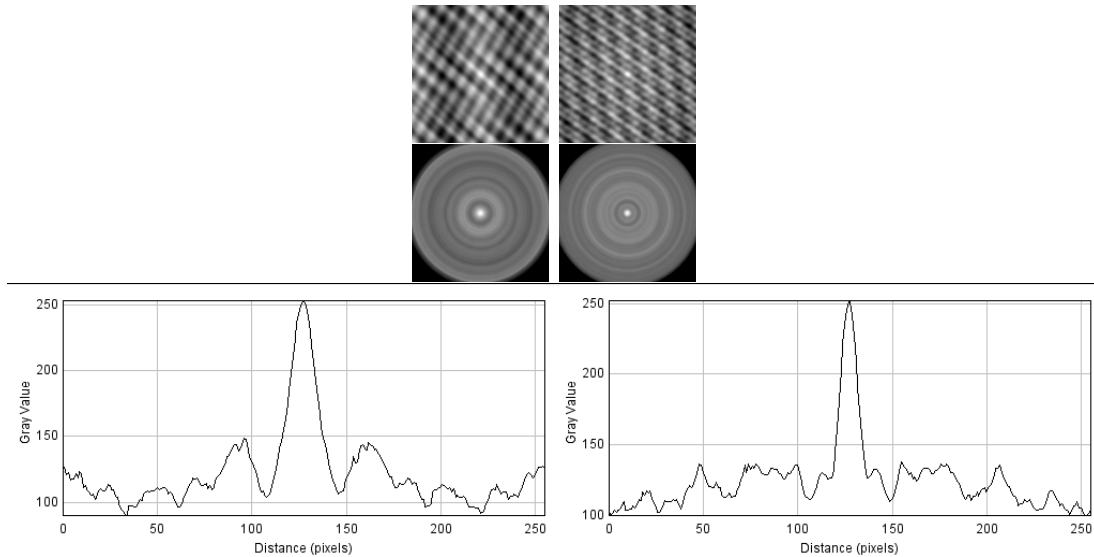


Figura 4.30: Cuarta iteración y gráfica lijado grueso corte radial

### LIJADO FINO CORTE RADIAL

Así, para las muestras con el corte radial y posterior lijado fino se representa la cuarta iteración de cada lámina y sus gráficas correspondientes figura 4.31.

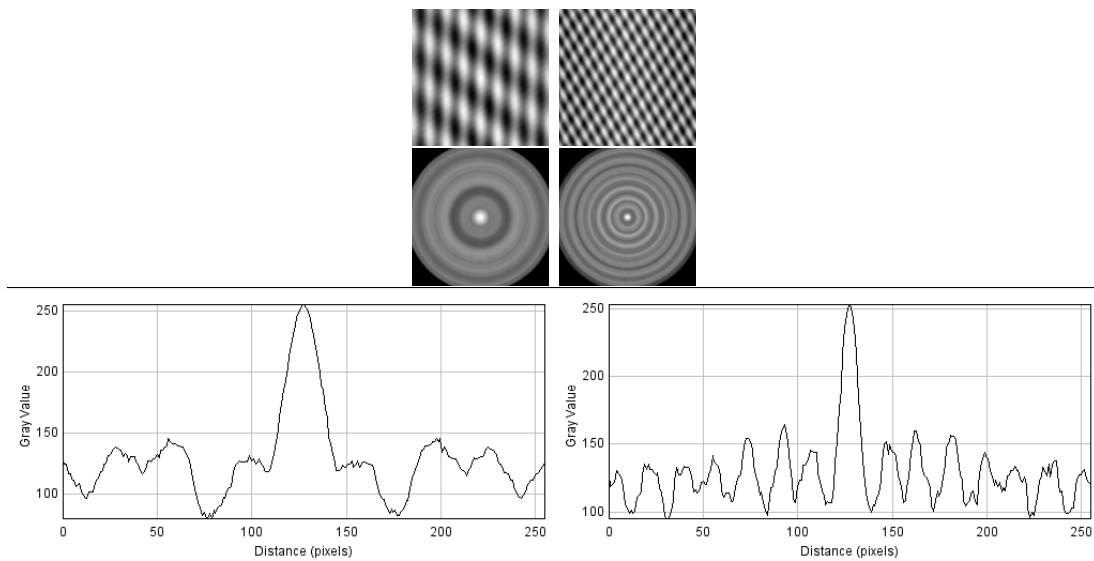


Figura 4.31: Cuarta iteración y gráfica lijado fino corte radial

### CORTE TRANSVERSAL

Así, para las muestras con el corte transversal se representa la cuarta iteración de cada lámina y sus gráficas correspondientes figura 4.32.

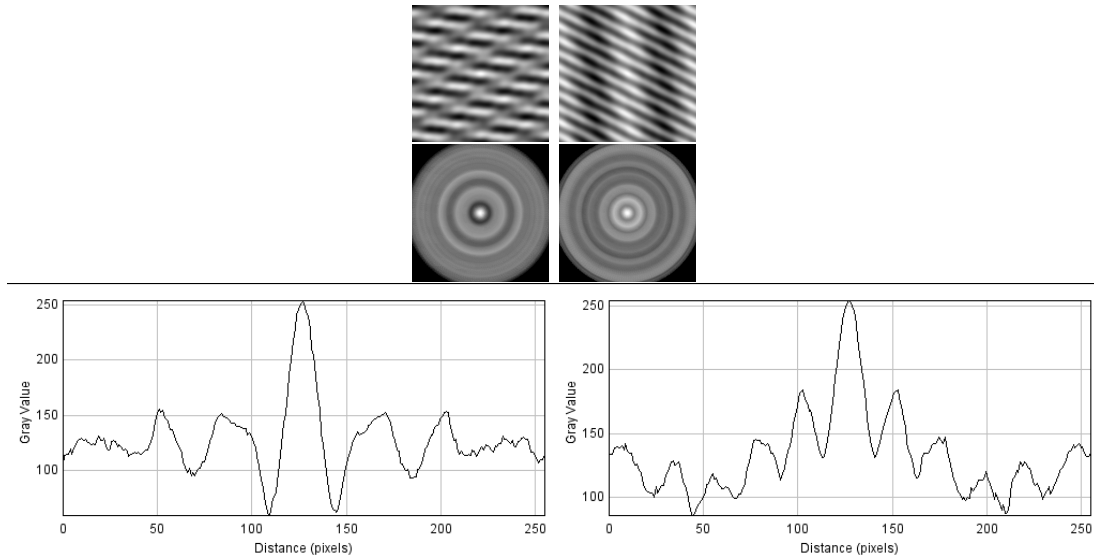


Figura 4.32: Cuarta iteración y gráfica corte transversal

### LIJADO GRUESO CORTE TRANSVERSAL

Así, para las muestras con el corte transversal y posterior lijado grueso se representa la cuarta iteración de cada lámina y sus gráficas correspondientes figura 4.33.

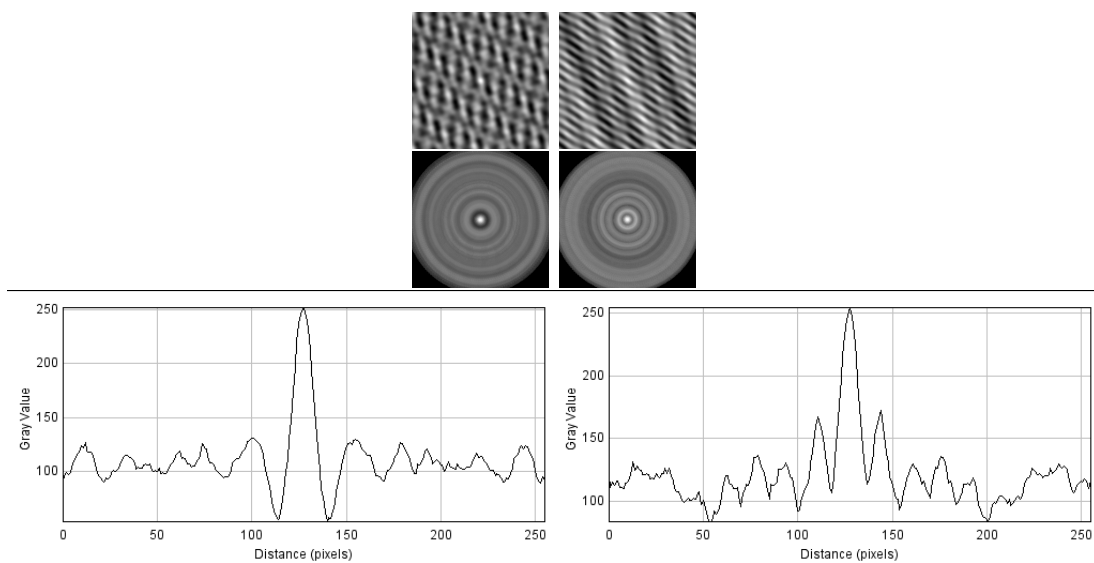


Figura 4.33: Cuarta iteración y gráfica lijado grueso corte transversal

### LIJADO FINO CORTE TRANSVERSAL

Así, para las muestras con el corte transversal y posterior lijado fino se representa la cuarta iteración de cada lámina y sus gráficas correspondientes figura 4.34.

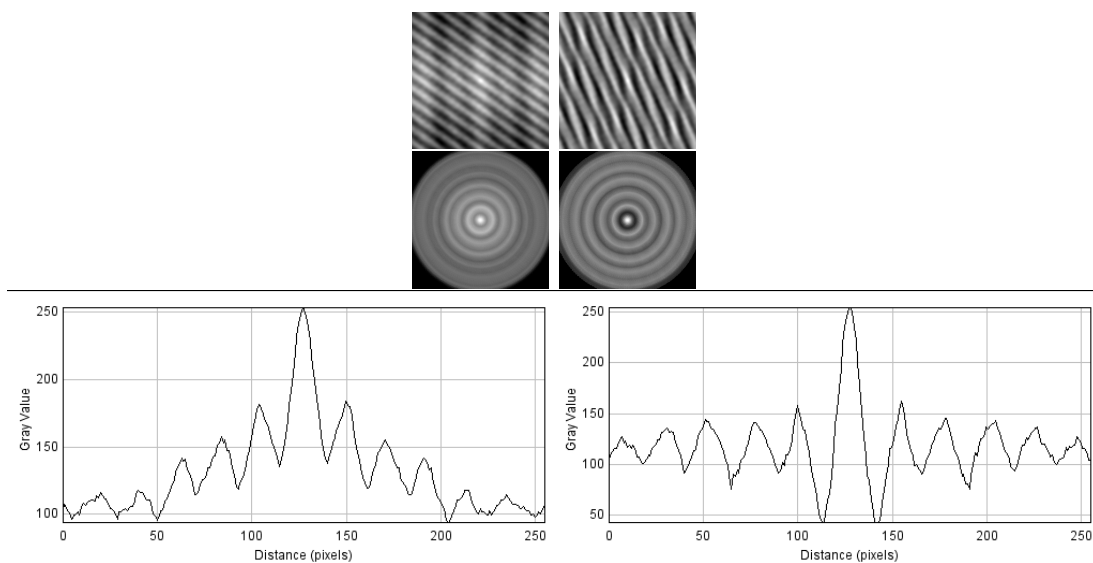


Figura 4.34: Cuarta iteración y gráfica lijado grueso corte transversal

## 4.2. Análisis de componentes.

### 4.2.1. Metacrilato

A continuación se mostrarán los diversos resultados obtenidos para cada caso, se muestran en tablas los diferentes valores para cada uno de los parámetros obtenidos, y para cada una de las distintas zonas evaluadas. Estos datos se han obtenido analizando directamente la imagen de moteado obtenida, pero extrayendo solo el canal rojo, eliminando los otros dos canales de la imagen, sin sufrir ningún otro proceso como el de autocorrelación visto anteriormente.

Como se vio en el anterior capítulo se han tomado diversos parámetros para el análisis, a continuación se muestran los resultados que justifican uso final de las dos variables que ofrecían los mejores resultados, el valor cuadrático medio y la desviación media aritmética en la tabla 4.1 y su representación gráfica en las figuras 4.35 y 4.36.

Tabla N°	Rq	Ra	Asimetría	Curtosis	Valor máximo	Valor mínimo	
p80	1	46.0694	34.7783	-1.3088	2.8513	255.0000	0.0000
	2	44.3680	33.4593	-1.3882	3.1992	255.0000	0.0000
	3	44.5808	33.7803	-1.3693	3.1427	255.0000	0.0000
	4	44.5298	33.6700	-1.3560	3.0885	255.0000	0.0000
	5	44.7449	33.8097	-1.3477	3.0889	255.0000	0.0000
	6	44.8569	33.7413	-1.4054	3.2797	255.0000	0.0000
	7	44.6772	33.6698	-1.3904	3.2508	255.0000	0.0000
	8	45.2219	34.0332	-1.3545	3.0917	255.0000	0.0000
	9	45.2692	34.1020	-1.3598	3.0723	255.0000	0.0000
p120	1	46.716	35.168	-1.367	2.991	255.000	0.000
	2	45.898	34.473	-1.412	3.224	255.000	0.000
	3	46.943	35.528	-1.339	2.836	255.000	0.000
	4	46.677	35.174	-1.376	2.986	255.000	0.000
	5	46.076	34.845	-1.374	3.011	255.000	0.000
	6	46.223	34.912	-1.355	2.951	255.000	0.000
	7	45.672	34.463	-1.367	3.082	255.000	0.000
	8	47.681	35.913	-1.346	2.834	255.000	0.000
	9	45.792	34.556	-1.397	3.136	255.000	0.000
p220	1	52.525	39.558	-1.272	2.190	255.000	0.000
	2	52.617	39.858	-1.267	2.136	255.000	0.000
	3	53.240	40.476	-1.247	1.998	255.000	0.000
	4	52.529	39.802	-1.250	2.107	255.000	0.000
	5	52.529	39.802	-1.250	2.107	255.000	0.000
	6	53.090	40.271	-1.250	2.052	255.000	0.000
	7	53.661	40.671	-1.234	1.984	255.000	0.000
	8	52.409	39.798	-1.252	2.107	255.000	0.000
	9	52.409	39.798	-1.252	2.107	255.000	0.000

Tabla 4.1: Tabla de datos obtenidos de los diferentes parámetros

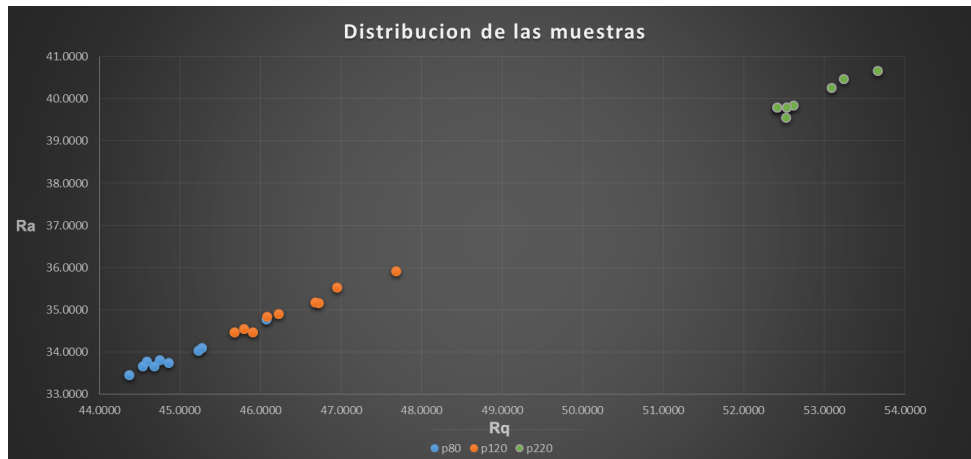


Figura 4.35: Gráficas obtenidas de los diferentes parámetros Ra-Rq

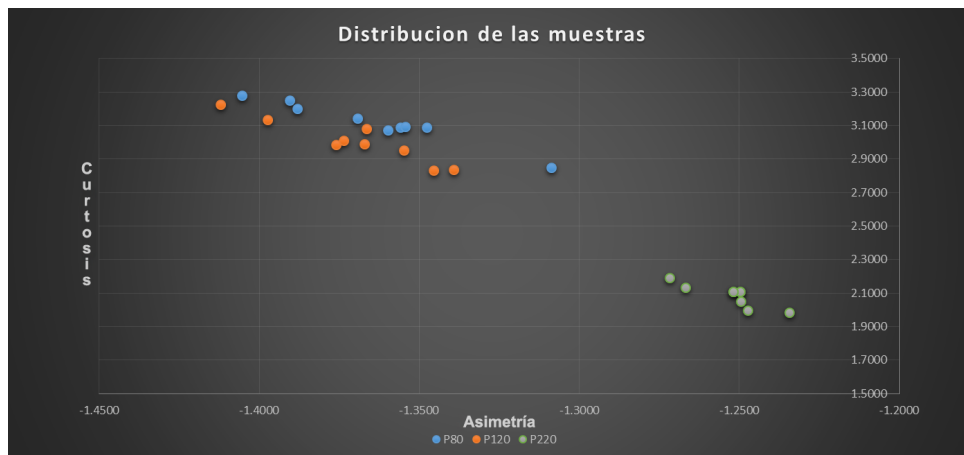


Figura 4.36: Gráficas obtenidas de los diferentes parámetros Rqu-Rsk

Como puede observarse los valores máximos y mínimos no ofrecen resultados significativos, mientras que los parámetros curtosis y asimetría ofrecen ciertas diferencias, pese a ésto es evidente que los mejores parámetros para diferenciar y analizar nuestras muestras son Ra y Rq lo que justifica su utilización frente a las otras planteadas.

Pese a que se tomaron muestras con distintos ángulos de inclinación e intensidades para el láser, aquí se muestran las que han ofrecido mejores resultados, 45 grados de inclinación para el láser y la cámara y 3 voltios de alimentación para el láser.

P80

Así, para el lijado P80 se muestran los resultados de los parámetros de todas las zonas de cada muestra tabla 4.2.

tablilla 1	Zona			2	Zona			3	Zona			4	Zona		
	Rq	Ra			Rq	Ra			Rq	Ra			Rq	Ra	
1	44.35	33.538		1	44.445	33.617		1	45.628	34.317		1	44.544	33.622	
2	44.233	33.334		2	44.182	33.545		2	45.32	34.122		2	44.758	33.844	
3	44.468	33.549		3	44.115	33.418		3	44.89	33.862		3	44.447	33.524	
4	44.733	33.741		4	43.592	33.032		4	46.059	34.715		4	44.263	33.367	
5	45.012	33.961		5	43.678	33.035		5	46.11	34.675		5	44.357	33.409	
6	44.825	33.838		6	44.049	33.306		6	45.978	34.55		6	44.778	33.731	
7	44.587	33.602		7	45.519	34.212		7	45.611	34.298		7	45.85	34.526	
media:	44.6011429	33.6518571		media:	44.2257143	33.4521429		media:	45.6565714	34.3627143		media:	44.7138571	33.7175714	
5	Rq	Ra		6	Rq	Ra		7	Rq	Ra		8	Rq	Ra	
1	45.183	34.022		1	44.833	33.743		1	44.586	33.656		1	45.181	33.977	
2	44.742	33.793		2	45.079	33.96		2	44.557	33.542		2	45.226	34.079	
3	44.863	33.819		3	45.495	34.29		3	44.646	33.825		3	44.906	33.918	
4	44.78	33.723		4	45.321	34.17		4	44.646	33.825		4	45.303	34.228	
5	45.135	33.955		5	44.973	33.838		5	44.592	33.693		5	45.329	34.066	
6	45.344	34.079		6	46.2	34.733		6	45.468	34.37		6	44.805	33.682	
7	45.681	34.368		7	46.052	34.699		7	45.753	34.511		7	45.662	34.41	
media:	45.104	33.9655714		media:	45.4218571	34.2047143		media:	44.8925714	33.9174286		media:	45.2017143	34.0514286	
9	Rq	Ra		10	Rq	Ra									
1	44.848	33.745		1	45.221	33.971									
2	45.395	34.209		2	45.315	34.063									
3	44.415	33.546		3	45.335	34.187									
4	44.375	33.58		4	44.795	33.849									
5	45.254	34.114		5	44.444	33.508									
6	45.983	34.58		6	44.684	33.611									
7	46.136	34.698		7	45.707	34.39									
media:	45.2008571	34.0674286		media:	45.0715714	33.9398571									

Tabla 4.2: Tabla metacrilato lijado P80

P120

Para el lijado P120 se muestran los resultados de los parámetros de todas las zonas de cada muestra tabla 4.3.

tablilla 1	Zona			2	Zona			3	Zona			4	Zona		
	Rq	Ra			Rq	Ra			Rq	Ra			Rq	Ra	
1	46.752	35.254		1	45.911	34.545		1	47.227	35.64		1	45.904	34.669	
2	46.489	34.966		2	45.768	34.358		2	46.941	35.519		2	46.896	35.317	
3	46.023	34.672		3	45.957	34.609		3	46.762	35.311		3	46.773	35.126	
4	46.22	34.768		4	46.493	35.052		4	46.971	35.408		4	46.775	35.168	
5	46.485	35.056		5	46.334	34.976		5	46.527	35.103		5	46.768	35.154	
6	47.431	35.764		6	47.177	35.533		6	46.767	35.277		6	47.723	35.886	
7	47.661	35.858		7	47.642	35.897		7	47.694	35.953		7	48.572	36.545	
media:	46.723	35.1911429		media:	46.4688571	34.9957143		media:	46.9841429	35.4587143		media:	47.0587143	35.4092857	
5	Rq	Ra		6	Rq	Ra		7	Rq	Ra		8	Rq	Ra	
1	46.238	34.927		1	45.932	34.655		1	48.103	36.297		1	47.169	35.558	
2	46.199	34.911		2	46.241	34.882		2	47.374	35.701		2	47.541	35.771	
3	46.456	35.214		3	46.561	35.105		3	46.861	35.377		3	47.483	35.787	
4	46.662	35.271		4	46.309	34.833		4	46.454	35.028		4	47.24	35.649	
5	46.369	34.964		5	46.457	34.929		5	45.953	34.743		5	47.834	36.107	
6	46.836	35.204		6	46.454	34.96		6	45.537	34.394		6	47.795	35.986	
7	47.951	36.103		7	47.72	35.996		7	45.469	34.306		7	48.604	36.665	
media:	46.673	35.2277143		media:	46.5248571	35.0514286		media:	46.5358571	35.1208571		media:	47.6665714	35.9318571	
9	Rq	Ra		10	Rq	Ra									
1	45.842	34.567		1	45.611	34.365									
2	45.807	34.616		2	45.848	34.51									
3	46.489	35.028		3	46.117	34.807									
4	47.28	35.602		4	46.344	35.014									
5	46.994	35.374		5	46.432	35.101									
6	46.295	34.883		6	46.777	35.308									
7	47.212	35.603		7	47.571	35.814									
media:	46.5598571	35.0961429		media:	46.3857143	34.9884286									

Tabla 4.3: Tabla metacrilato lijado P120



P220

Para el lijado P220 se muestran los resultados de los parámetros de todas las zonas de cada muestra tabla 4.4.

tablilla 1	Zona			Zona	Zona			Zona	Zona						
	Rq	Ra			Rq	Ra			Rq	Ra		Rq	Ra		
	1	52.662	39.883	2	1	54.022	40.937	3	1	52.766	39.992	4	1	53.023	40.282
	2	53.05	40.142		2	54.067	40.97		2	52.671	39.882		2	53.197	40.418
	3	53.359	40.406		3	53.233	40.233		3	52.566	39.712		3	52.721	39.91
	4	53.243	40.329		4	53.186	40.161		4	52.987	40.132		4	53.152	40.254
	5	53.485	40.447		5	52.984	39.901		5	53.63	40.678		5	53.569	40.649
	6	53.986	40.858		6	52.874	39.78		6	54.596	41.489		6	54.181	41.064
	7	54.365	41.234		7	52.95	39.986		7	55.973	42.473		7	55.592	42.183
media:		53.45	40.4712857			53.3308571	40.2811429			53.5984286	40.6225714			53.635714	40.68
	5			6				7				8			
	1	52.469	39.725		1	52.289	39.535		1	52.796	39.953		1	53.496	40.51
	2	52.975	40.131		2	52.635	39.881		2	53.06	40.216		2	53.545	40.576
	3	52.439	39.733		3	53.129	40.293		3	53.568	40.517		3	52.851	40.103
	4	52.803	39.997		4	53.016	40.178		4	53.786	40.787		4	52.585	39.871
	5	53.963	40.962		5	52.689	39.91		5	53.648	40.743		5	53.297	40.441
	6	54.431	41.338		6	53.534	40.628		6	54.053	40.934		6	54.217	41.193
	7	54.343	41.253		7	54.812	41.684		7	55.109	41.739		7	55.033	41.815
media:		53.3461429	40.4484286			53.1577143	40.3012857			53.7171429	40.6984286			53.5748571	40.6441429
	9			10											
	1	52.473	39.876		1	54.056	40.972								
	2	52.307	39.695		2	54.14	41.052								
	3	52.467	39.747		3	53.654	40.607								
	4	53.456	40.388		4	53.35	40.353								
	5	53.601	40.57		5	53.066	40.12								
	6	53.763	40.728		6	53.47	40.465								
	7	54.229	41.187		7	55.293	41.949								
media:		53.1851429	40.313			53.8612857	40.7882857								

Tabla 4.4: Tabla metacrilato lijado P220

Sin lijar

Para las muestras sin lijar se muestran los resultados de los parámetros de todas las zonas tabla 4.5.

tablilla 1	Zona			Zona	Zona			Zona	Zona						
	Rq	Ra			Rq	Ra			Rq	Ra		Rq	Ra		
	1	54.56	41.41	2	1	53.102	40.162	3	1	53.23	40.209	4	1	52.059	39.316
	2	54.72	41.51		2	53.026	40.061		2	54.111	41.023		2	52.363	39.561
	3	54.77	41.644		3	54.106	41.022		3	54.632	41.438		3	52.632	39.791
	4	55.442	42.179		4	55.437	42.197		4	55.138	41.868		4	52.837	39.932
	5	56.308	42.979		5	54.957	41.744		5	55.418	42.038		5	53.476	40.492
	6	55.055	41.91		6	53.569	40.522		6	55.913	42.434		6	53.827	40.769
	7	54.259	41.151		7	56.109	42.737		7	54.541	41.446		7	54.548	41.394
media:		55.0162857	41.8261429			54.3294286	41.2064286			54.7118571	41.4937143			53.106	40.1792857
	5			6				7				8			
	1	54.952	41.853		1	55.174	41.912		1	53.058	40.205		1	53.832	40.894
	2	52.639	39.807		2	54.78	41.706		2	53.696	40.717		2	54.035	41.043
	3	52.524	39.778		3	55.063	41.739		3	54.018	41.006		3	54.675	41.571
	4	52.47	39.765		4	55.109	41.893		4	55.058	41.805		4	55.171	42.006
	5	52.736	39.957		5	54.959	41.664		5	55.368	42.066		5	55.184	41.977
	6	53.348	40.458		6	55.103	41.789		6	55.692	42.276		6	55.333	42.125
	7	54.139	41.155		7	55.313	41.994		7	55.862	42.432		7	55.504	42.241
media:		53.2582857	40.3961429			55.0715714	41.8138571			54.6788571	41.501			54.8191429	41.6938571
	9			10											
	1	51.977	39.168		1	52.228	39.451								
	2	52.401	39.484		2	52.655	39.804								
	3	53.011	40.102		3	53.064	40.102								
	4	53.239	40.284		4	53.298	40.28								
	5	54.056	40.971		5	53.657	40.561								
	6	54.972	41.752		6	54.337	41.214								
	7	56.118	42.708		7	55.018	41.812								
media:		53.682	40.6384286			53.4652857	40.4605714								

Tabla 4.5: Tabla metacrilato sin lijar

Todas las muestras

A continuación se muestra un gráfico que recoge todos los datos presentados anteriormente en la figura 4.37 y 4.38.

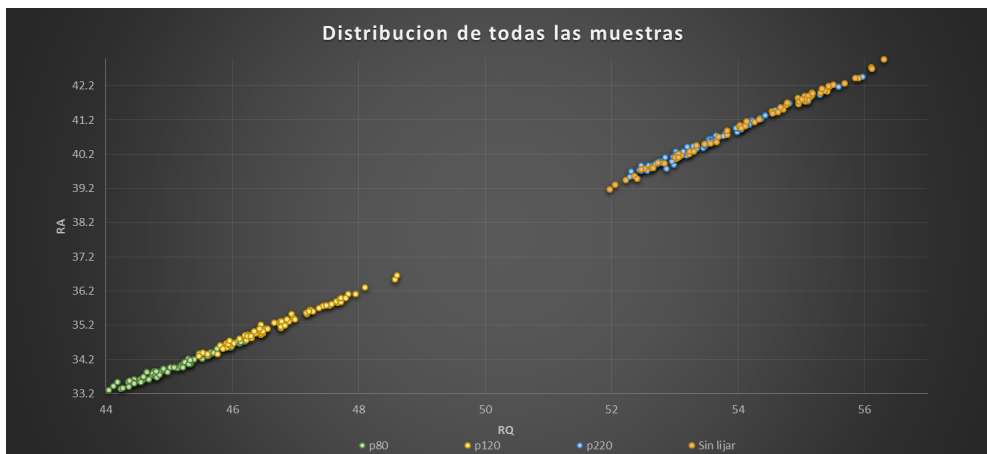


Figura 4.37: Gráfica de todas las muestras obtenidas

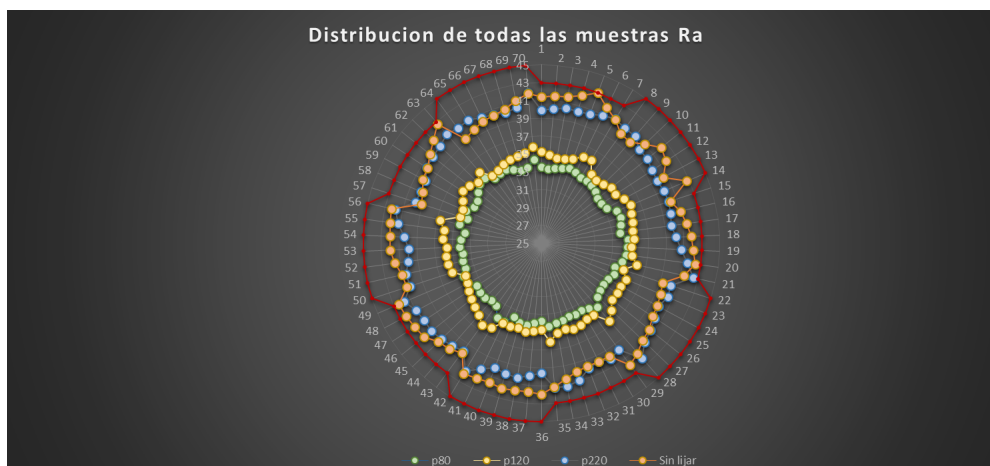


Figura 4.38: Gráfica circular de todas las muestras obtenidas

Medias

A continuación se muestra un gráfico que recoge los valores de las medias de todas las zonas para cada lámina figuras 4.39 y 4.40.

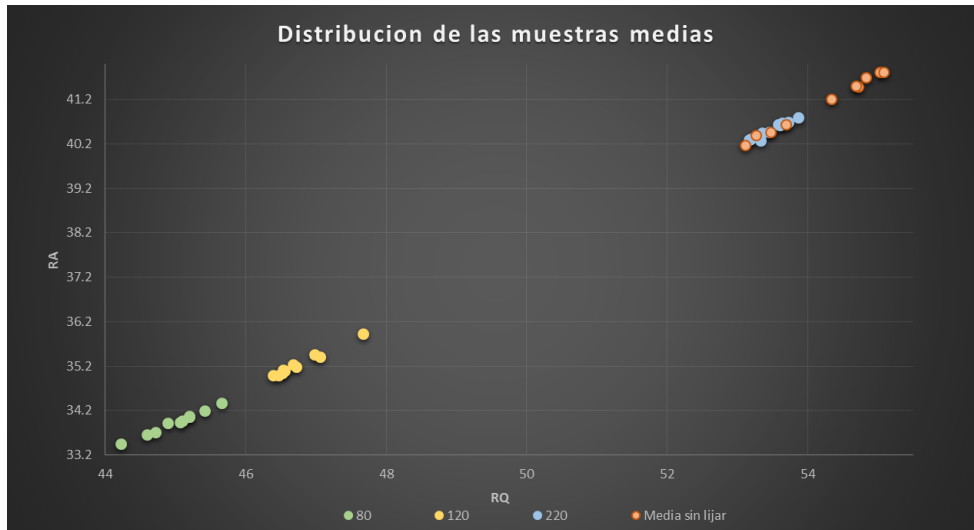


Figura 4.39: Gráfica de las medias las muestras obtenidas

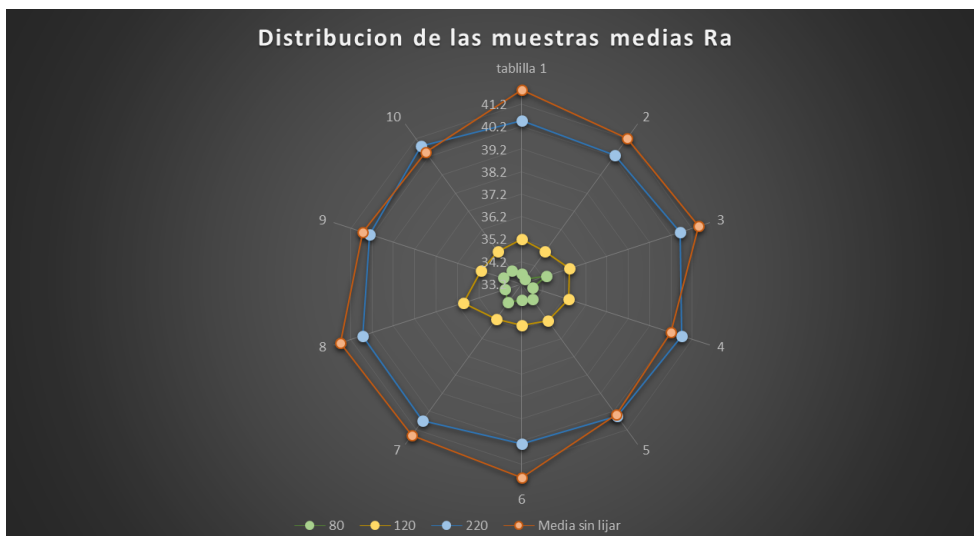


Figura 4.40: Gráfica circular de las medias de las muestras obtenidas

### 4.2.2. Madera

Puesto que en las muestras de la madera se disponen de dos formas de talar corte radial y corte transversal, se representan en primer lugar por separado los resultados de cada corte, los resultados han sido normalizados para poder compararlos, finalmente se muestra una gráfica de todo el conjunto.

#### CORTE RADIAL

Así, para las muestras con corte radial se representa en la tabla 4.6 los resultados obtenidos y posteriormente de forma visual en la gráfica 4.41.

Fino	Zona	Rq	Ra	Corte	Zona	Rq	Ra	Lijado grueso	Zona	Rq	Ra
	1	0.98877778	0.96873017		1	0.88401852	0.84704976		1	0.97724074	0.95048944
	1	0.96496296	0.93059458		1	0.88575926	0.85423276		1	0.98937037	0.97024835
	1	0.97105556	0.94448473		2	0.9137037	0.88921871		2	0.98503704	0.97856431
	2	0.96987037	0.98765068		2	0.91327778	0.90822986		2	0.97588889	0.98758271
	2	0.985000	0.99510559		3	0.89724074	0.89311611		3	0.9867963	1
	2	0.96927778	0.97693284		3	0.91135185	0.88174114		3	0.9912037	0.98132874
	3	0.98690741	0.97870026		4	0.89418519	0.86857609		4	0.99777778	0.99007523
	3	1.00003704	0.98774132		4	0.89538889	0.86109852		4	0.98237037	0.95293664
	3	0.97898148	0.9670987		5	0.88333333	0.85004079		5	0.98862963	0.9614792
	4	0.9797037	0.95785371		5	0.88803704	0.85590954		5	0.97522222	0.94500589
	4	0.97807407	0.94951509		6	0.87444444	0.83950421		6	0.98246296	0.95255144
	4	0.97692593	0.95434152		6	0.8927963	0.87773045		6	0.99301852	0.99347412
	5	0.985000	0.97953866		7	0.88955556	0.85930844		7	0.97462963	0.94158434
	5	0.99890741	0.9863591		7	0.86909259	0.83132421		7	0.99388889	0.97292214
	5	0.97896296	0.97002175		8	0.90805556	0.90609988		8	0.97309259	0.9885344
	6	0.97612963	0.95354845		8	0.89051852	0.88783649		8	0.98124074	0.99995468
	6	0.97231481	0.94140306								
	6	0.96861111	0.94142572								
	7	0.97294444	0.99002991								
	7	0.98496296	0.9980513								
	7	0.97181481	0.97924409								
media:		1.71326852	1.69486427			1.78634491	1.73887712			1.9684838	1.94584145

Tabla 4.6: Tabla madera corte radial

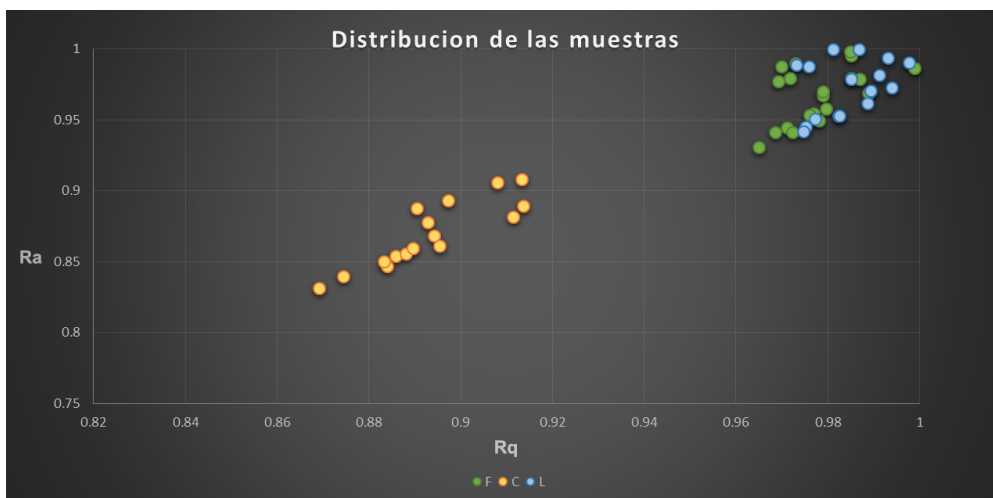


Figura 4.41: Gráfica madera corte radial

CORTE TRANSVERSAL

Para las muestras con corte transversal se representa en la tabla 4.7 los resultados obtenidos y posteriormente de forma visual en la gráfica 4.42.

Fino	Zona	Rq	Ra	Corte	Zona	Rq	Ra	Lijadogrueso	Zona	Rq	Ra
	1	0.9642963	0.93959032		1	0.85662963	0.82946615		1	0.97314815	0.94570833
	1	0.97055556	0.946728		1	0.83844444	0.82151273		1	0.96794444	0.94666002
	1	0.97944444	0.96560319		2	0.8615	0.85987492		1	0.9497963	0.92191607
	2	0.9737963	0.97557555		2	0.85137037	0.8612798		2	0.97733333	0.98472764
	2	0.97133333	0.98094353		3	0.83344444	0.84145291		2	0.96022222	0.97310342
	2	0.96909259	0.98203118		3	0.86364815	0.85201215		2	0.97051852	0.98441041
	3	0.97788889	0.97149461		4	0.83457407	0.82840116		3	0.98242593	0.95667543
	3	0.98724074	0.9767289		4	0.85792593	0.83078039		3	0.97568519	0.96682679
	3	0.98292593	0.97629838		5	0.83603704	0.8142391		3	0.97198148	0.95928125
	4	0.96740741	0.94647875		5	0.85909259	0.83458715		4	0.9657037	0.93159159
	4	0.97974074	0.95626756		6	0.82690741	0.79910269		4	0.96040741	0.93093447
	4	0.98005556	0.96268014		6	0.83761111	0.83628659		5	0.995	0.98345871
	5	0.9767963	0.96841294		7	0.85333333	0.8277667		5	0.98198148	0.98515816
	5	0.98672222	0.98112481		7	0.82433333	0.79941992		5	0.97553704	0.97140397
	5	0.984	0.98509018		8	0.84837037	0.86245808		6	0.96814815	0.93666727
	6	0.97105556	0.94980966		8	0.83344444	0.84419469		6	0.95494444	0.92264117
	6	0.9615	0.93181818						6	0.95783333	0.92862322
	6	0.97527778	0.9525741						7	0.97805556	0.98991661
	7	0.96861111	0.98114747						7	0.9532963	0.974395
	7	0.9697963	0.9826883						7	0.96253704	0.98615517
	7	0.96751852	0.98654038								
media		1.7054213	1.69163551			1.68958333	1.66785439			1.61520833	1.59835456

Tabla 4.7: Tabla madera corte transversal

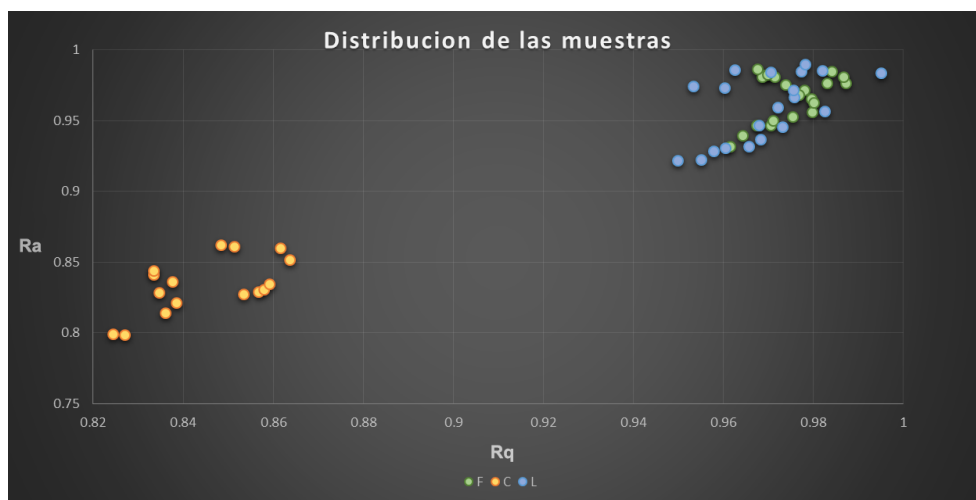


Figura 4.42: Gráfica madera corte transversal

### CONJUNTO TOTAL

Así, finalmente se muestra en la misma gráfica los resultados de todas las muestras analizadas gráfica 4.43.

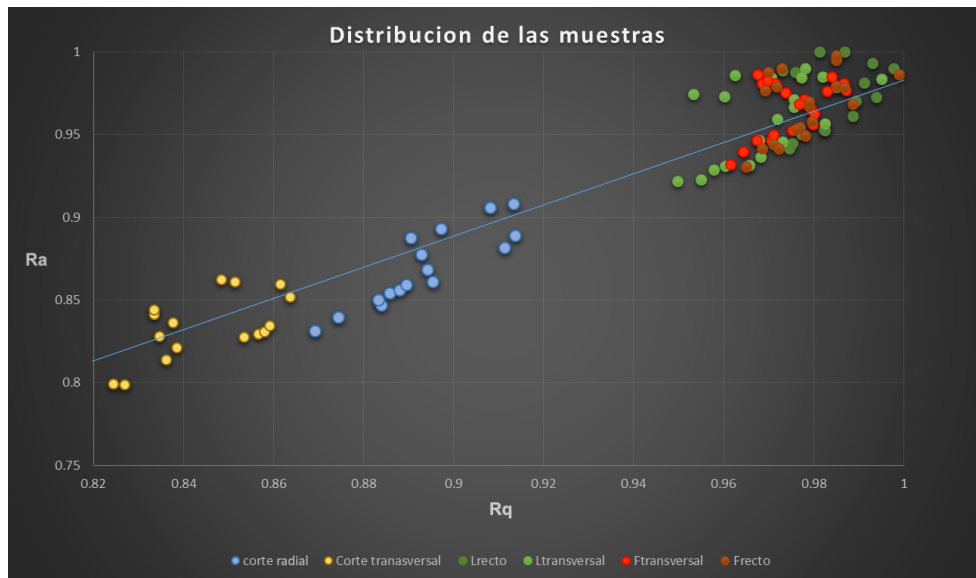


Figura 4.43: Gráfica madera todas las muestras

# Capítulo 5

## Evaluación de los resultados

Se han mostrado en el Capítulo 5 los resultados obtenidos tras la realización del experimento analizado en el presente trabajo. A continuación se intentaran exponer los resultados de estos datos.

### 5.1. Resultados experimentales obtenidos a partir del estudio de la correlación iterativa.

Observando las imágenes se puede ver cómo según se aumenta el orden de la autocorrelación se obtienen imágenes más o menos suavizadas donde se acentúan detalles que se corresponden con escalas más regulares, con menos ruido de la superficie, capaces de revelar detalles de la superficie como la dimensión estimada del grano. Los patrones más regulares se obtienen con la cuarta iteración. Si nos quedamos en un número de iteraciones menor, el ruido aleatorio que se presenta no desaparece del todo, y si aumentamos las iteraciones los patrones terminan por desaparecer perdiendo toda fuente de información.

Observamos como las muestras presentan casi siempre una elevada periodicidad y simetría. *"En términos matemáticos, la información de los patrones de moteado contienen propiedades espaciales de alta frecuencia"* [27]. En otras palabras estas imágenes ponen en relieve las diferencias más acentuadas y cambios en de la superficie, y mediante la autocorrelación se acentúan las estructuras que presentan mayores propiedades de periodicidad, haciendo desaparecer el resto de características de la superficie.

Pese a que la autocorrelación nos permite estudiar la existencia de componentes regulares, no aleatorias dentro de las imágenes captadas no permite su medida ni localización absoluta de modo que solo podemos obtener estimaciones sobre la

anatomía subyacente de la superficie tratada. En concreto la medida de los periodos entre las líneas detectadas se verá afectada por el ensanchamiento propio que introduce la autocorrelación. Si se estimasen o conociesen los factores de deconvolución se podrían obtener medidas bastante precisas de las estructuras que forman dicha superficie a la escala observada.

Podemos concluir diciendo que una vez observados los resultados obtenidos mediante esta técnica que con el simple estudio de estas imágenes no somos capaces de determinar si la muestra pertenece a un nivel de tratamiento u otro, tanto para el metacrilato o la madera. Un análisis más exhaustivo sería necesario para arrojar unas conclusiones más útiles sobre las ventajas que este método puede ofrecer.

## **5.2. Resultados experimentales obtenidos a partir de análisis de las componentes analizadas.**

Después de obtener todos los datos y representarlos se puede observar como existe una clara relación entre el tipo de lijado que se le a aplicado a las láminas de metacrilato con los valores obtenidos, como se puede ver en la figura 4.37. Según aumenta el valor de los parámetros  $R_a$  y  $R_q$  nos indica que el lijado usado es más fino hasta llegar en el caso del metacrilato a una superficie totalmente lisa sin lijar.

En la gráfica 4.38 se puede observar y comparar los resultados para cada zona dentro de cada tablilla analizada, se ve de forma algo más clara los límites para cada uno de los tratamientos aplicados, como se puede observar hay algunas zonas donde puede haber una mayor variabilidad en los datos y que si solo se tuviesen en cuenta ciertas muestras se podría llegar a identificar erróneamente el tratamiento aplicado a esa zona. Por ello se propuso calcular la media de todas las muestras tomadas en las diferentes zonas de la misma tabla para caracterizarla. En las figuras 4.39 y 4.40 se puede apreciar como aplicando este método se pueden identificar con mayor facilidad. De estas gráficas se deduce que mediante este método si queremos diferenciar claramente el grado de lijado usado en la muestra podemos diferenciar lijados siempre y cuando éstos difieran en aproximadamente 40 niveles y existe un lijado máximo igual al lijado de P220 a partir del cual no somos capaces de distinguir lijados más finos ya que las muestras empiezan a tomar valores similares entre ellos, debido a las limitaciones de la longitud de onda del láser utilizado.

Las fronteras de separación entre cada lijado son tan claras que pueden delimitarse manualmente, aunque podrían usarse técnicas más avanzadas para un mayor



ajuste, como son: distancia euclídea, distancia de Mahalanobis, Clasificador por K vecinos más cercanos, Clasificador estadístico. Naïve/Normal Bayes, etc.

Se han observado buenos resultados con este método cuando hemos utilizado láminas de metacrilato fáciles de analizar ya que hemos elegido el color rojo para que funcione bien con el láser elegido y hemos lijado nosotros mismos a mano cada muestra analizada, una vez vista la validez de este método se ha intentado comprobar la validez con un material no tan controlado más real, se ha aplicado a láminas de madera de pino, observando los resultados de las figuras 4.41, 4.42 y 4.43 se deduce que no solo somos capaces de distinguir el nivel de lijado aplicado sino que somos capaces de discernir entre el tipo de corte que se le ha aplicado a la madera. Pese a esta nueva ventaja, se puede observar como el análisis del nivel del lijado se complica con respecto al metacrilato ya que la propia composición más compleja de la madera compuesta por fibras influye en estos datos. Si queremos distinguir entre lijados que no se diferencian enormemente sería conveniente aplicar alguna técnica más complicada para poder distinguir correctamente de qué tipo de muestra estamos tratando.



# Capítulo 6

## Conclusiones y futuras líneas de trabajo

### 6.1. Conclusiones

Del estudio realizado se ha llegado a una serie de conclusiones que resultarán útiles para posibles estudios futuros. Las conclusiones obtenidas son las siguientes:

- Debido a las propiedades del material iluminado, la dispersión del láser sobre dichas superficies depende en gran medida del ángulo de inclinación tanto del láser como de la cámara.
- Haces próximos a los  $45^{\circ}$  son los que han ofrecido mejores resultados, ya que ofrecen patrones de interferencia a escala microscópica.
- La autocorrelación iterativa es una poderosa técnica de procesado de imágenes que proporciona información interesante, si bien permite estudiar si existen componentes regulares, no aleatorias, dentro de la imagen, solo permite extraer estimaciones sobre la anatomía de la superficie tratada.
- Es posible identificar y clasificar los diferentes tipos de tratamientos superficiales aplicados a los dos materiales estudiados, metacrilato y madera, mediante la aplicación de metodologías no destructivas y de bajo coste.
- El estudio a partir del análisis de componentes ha resultado un método robusto, que nos ofrece resultados suficientes para concluir el tipo de lijado aplicado a superficies sencillas como el metacrilato. Para superficies más complejas como es la madera los datos obtenidos presentan una mayor dificultad para su clasificación, debido en gran medida a la complejidad de la propia estructura de la misma, pese a ello se ha podido observar claras diferencias entre los di-

ferentes lijados aplicados así como del tipo de corte aplicado a la lámina de madera, diferenciando si es radial o transversal.

- El estudio de imágenes del moteado láser es una técnica completamente no invasiva aplicable a casi cualquier entorno concebible, capaz de proporcionar precisiones submicrométricas.
- La implementación del control de piezas para inspección de la calidad industrial de productos manufacturados es económicamente factible a partir de este sistema de reconocimiento de rugosidad debido al bajo costo.

## 6.2. Futuras líneas de trabajo

- Utilizar técnicas de "machine learning" para una mejor clasificación de las muestras obtenidas, en concreto para los diferentes tipos de lijado en maderas.
- Conseguir automatizar el algoritmo expuesto para realizar estudios en tiempo real.
- Aumentar el número de variables observables para mejorar la detección de características en las maderas, y evaluar sus resultados con respecto a estos.
- Uso de láseres de diferentes longitudes de onda para ver si mejoran los resultados observando los patrones de moteado.
- Establecer la relación de los resultados obtenidos con los estándares vistos en el capítulo 2, con la ayuda de instrumentos comerciales para establecer las correspondencias adecuadas.

# Apéndice A

## Presupuesto

### A.1. Desglose de costes

En este apartado se va a presentar una estimación detallada de los costes de realización de este trabajo de fin de grado. Estos costes se presentan agrupados en diversas categorías. Los grupos en los que se han dividido los costes son:

- Costes del personal involucrado en el proyecto.
- Costes de elementos software y hardware.

Además, al final del cálculo del presupuesto se pondrán las herramientas hardware utilizadas para la realización del proyecto, ya que en el coste de los equipos aparecen dichos elementos.

#### A.1.1. Costes de Hardware

Hardware	Precio Unitario	Cantidad	Subtotal
Ordenador Toshiba *	85 €	1	85 €
Fuente de alimentación IMHY3003D-3 *	38 €	1	38 €
Cámara Nikon D50 *	43 €	1	43 €
Láminas Metacrilato	1,20 €	40	48 €
Láminas Madera	0 €	15	0 €
Láser rojo	4 €	2	8 €
Papel lija	0,58 €	3	1,74 €
Material caja	20 €	1	20 €
Subtotal			243,74 €

Tabla A.1: Costes de Hardware

### A.1.2. Costes de Software

Hardware	Precio Unitario	Cantidad	Subtotal
SO Windows 8.1 (incluido en el ordenador)	0 €	1	0 €
ImageJ 1.48v (software de dominio público)	0 €	1	0€
Editor Latex	0 €	1	0 €
Subtotal			0€

Tabla A.2: Costes de software

### A.1.3. Costes de Recursos Humanos

Costes de los recursos humanos del proyecto, se considerará el trabajo de un ingeniero a media jornada y el de un mecanógrafo 5 horas diarias.

Recursos Humanos	Precio (€/hora)	Horas	Subtotal
Ingeniero	16 €/hora	240 horas	3840 €
Mecanógrafo	10 €/hora	120 horas	1200 €
Subtotal			5040 €

Tabla A.3: Costes en recursos humanos

### A.1.4. Coste Total del desarrollo del Proyecto

Por último en este apartado se va a mostrar el coste total que supondría el proyecto sumando el coste del personal y el coste de los equipos:

Concepto	Precio Unitario	Cantidad	Subtotal
Costes Hardware	981,34 €	1	1211,61 €
Costes Software	0 €	1	0 €
Costes recursos humanos	6650 €	1	5040 €
Total			5283,74 €

Tabla A.4: Costes Totales

Los precios expresados en este apéndice incluyen el 21 %de IVA.

Los elementos con \* presentan el valor amortizado en el tiempo de uso.

### **A.1.5. Herramientas Hardware**

En este apartado se van a especificar las herramientas hardware que se han utilizado para el desarrollo del trabajo de fin de grado. El ordenador que se ha utilizado para desarrollar la implementación del proyecto es un Toshiba de 15'3 pulgadas con las siguientes especificaciones:

- Procesador: 2.6 GHz Intel Core i5
- Memoria RAM: 4 GB DDR3
- Software: Windows 8.1
- Disco duro: 500 GB





# Bibliografía

- [1] Vorburger, T. V., Rhee, H. G., Renegar, T. B., Song, J. F., Zheng, A.; "Comparison of optical and stylus methods for measurement of surface texture" in The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol.33, pp.110 - 118, 2007.
- [2] Hocken, R. J.; Chakraborty, N., Brown, C.; Optical metrology of surfaces. Ann CIRP Vol.54(2), pp.705-719, 2005.
- [3] Rhee, H. G., Vorburger, T. V., Lee, J. W., Fu, J.; Discrepancies between roughness measurements obtained with phase-shifting interferometry and white-light interferometry. Appl Opt Vol.44, pp.5919-5927, 2005.
- [4] Harasaki, A., Schmit, J., Wyant, J. C.; Improved vertical-scanning interferometry. Appl Opt Vol.39, pp.2107-2115, 2000.
- [5] Reddy, N. S. K., Rao, P. V.; "Selection of optimum geometry and cutting conditions using surface roughness prediction model for end milling", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol.26, pp.1202 - 1210, 2005.
- [6] Oktem, H., Erzurumlu, T. y Kutaran, H.; Applications of response surface methodology in the optimization of cutting conditions for surface roughness, Journal of Materials Processing Technology, 2005.
- [7] Prakasvudhisarn, C., Kunnapapdeelert, S., Yenradee, P.; "Optimal cutting condition determination for desired surface roughness in end milling", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol.41, pp.440 - 451, 2009.
- [8] ISO 25178-6, Geometrical product specifications (GPS) - Surface texture: areal, classification of methods for measuring surface, texture International Organization for Standardization Committee, 2010.

- [9] ISO 4287, Geometrical product specifications (GPS) - Surface texture: profile method-terms, definitions and surface texture parameters, International Organization for Standardization, Geneva , Switzerland , 1997.
- [10] Bongaerts, J. H. H., Foutouni, K., Sotokes, J. R.; Soft-tribology: “Lubrication in a compliant PDMS-PDMS contact”. Tribology International, Vol. 40, pp. 1531-1542, 2007.
- [11] Ozcelik, B., Bayramoglu, M.; “The statistical modeling of surface roughness in high-speed flat end milling”, International Journal of Machine Tool & Manufacture, Vol.46, pp.1395-1402, 2006.
- [12] Zain, A. M., Haron, H., Sharif, S.; “Application of GA to optimize cutting conditions for minimizing surface roughness in end milling machining process”. Expert Systems and Applications. Vol. 37, pp. 4650-4659, 2010.
- [13] Bashar, M. K. Tsumoto, T. M. y Ohnishi, N. ; “Wavelet Transform-Based Locally Orderless Images For Texture Segmentation”, Pattern Recognition Letters, Vol 24 , pp.2633-2650, 2003.
- [14] Sengur, A.; Turkoglu, I., y Ince, M. C.; “Wavelet packet neural networks for texture classification”, Expert Systems with Applications Vol 32(2), pp.527-533, 2007.
- [15] Yang, X. y Liu, J.; “Maximum entropy random fields for texture analysis”, Pattern Recognition Letters, Vol23, pp.93-101, 2002.
- [16] Varma, M., Zisserman, A.; “A statistical approach to texture classification from single images”, International Journal of Computer Vision, Vol.62 , pp.61-81, 2005.
- [17] Ginneken, B. van, Romeny, B. M. ter H.; “Multi-scale texture classification from generalized locally ordeless images”, Pattern Recognition Vol.36, pp.899-911, 2003.
- [18] Paschos, G.; Petrou, M.; “Histogram ratio features for color texture classification”, Pattern Recognition Letters, Vol 24, pp.309-314, 2003.
- [19] Rojas, J.A.M.; Bolívar, E.; Alpuente, J.; López, P. y Sánchez, R. “Aplicación de técnicas láser no invasivas para el estudio de maderas.” Conama 9. Madrid, Diciembre 2008.
- [20] Rodríguez, O.F. Máquinas, “Calidad superficial: rugosidad” Métodos y Control Dimensional del Procesamiento. [Online]. Available:

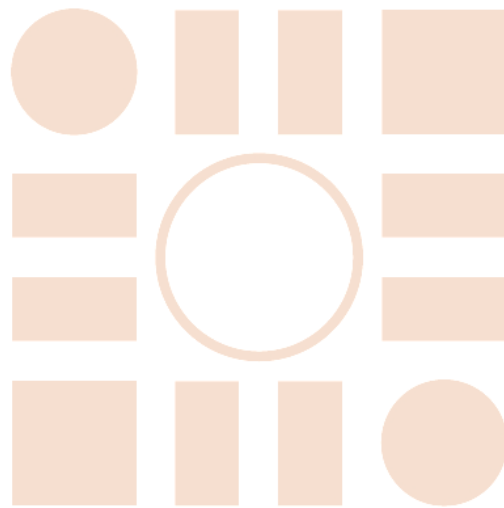
- <http://mmcdp.webcindario.com/metrologia/metrologia.htm>. [Accessed: May. 08, 2015]
- [21] “Signos Superficiales de Calidad”. Portal de Dibujo Técnico, [Online], Available: [http://dibujo.ramondelaguila.com/?page\\_id=2771](http://dibujo.ramondelaguila.com/?page_id=2771). [Accessed: May. 02, 2015]
- [22] Mayorga, J. C., Acabados superficiales: Normas de acabado y simbología, [Online], <http://www.monografias.com/trabajos70/acabados-superficiales-normas-simbologia/acabados-superficiales-normas-simbologia2.shtml>. [Accessed: Jan. 09, 2015]
- [23] Verdalet, D., Estados Superficiales., Dec 14, 2014. [Online], <http://myslide.es/documents/estados-superficiales.html>. [Accessed: Jun. 02, 2015]
- [24] Ontiveros R. A., Tipos y necesidades de acabados superficiales, pp.2 [Online], <http://redsocialeducativa.euoinnova.edu.es/pg/blog/read/484553/tipos-y-necesidades-de-acabados-superficiales>. [Accessed: Jan. 08, 2015]
- [25] Kjell, J.G., Optical metrology, 3rd edition, John Wiley & Sons, 2002.
- [26] Quesada, L. Componentes de un PC, [Online], [http://dis.um.es/~lopezquesada/documentos/IES\\_1213/LMSGI/curso/xhtml/xhtml19/docs/escaner.html](http://dis.um.es/~lopezquesada/documentos/IES_1213/LMSGI/curso/xhtml/xhtml19/docs/escaner.html). [Accessed: Jan. 09, 2015]
- [27] Rojas, I.M. Análisis y clasificación de maderas mediante técnicas no invasivas de baja energía. 2012.
- [28] Uso del microscopio óptico. [Online], <http://wikiliber1c.wikispaces.com/Uso+del+microscopio+optico>. [Accessed: Jan. 09, 2015]
- [29] Equipos de medida - Balanzas - Regulación y control, Microscopio USB PCE-MM200. [Online], <http://www.pce-iberica.es/medidor-detalles-tecnicos/instrumento-de-optico/microscopio-pce-mm200.htm> [Accessed: Jan. 07, 2015]
- [30] Miceli, P., Diferentes granos de papel de lija. [Online], [www.ehowenespanol.com/diferentes-granos-papel-lijas-info\\_237048/](http://www.ehowenespanol.com/diferentes-granos-papel-lijas-info_237048/) [Accessed: May. 15, 2015]
- [31] Lagos, C., El láser. 2014, [Online], [https://prezi.com/stwp\\_2r\\_d8m1/el-laser/](https://prezi.com/stwp_2r_d8m1/el-laser/) [Accessed: Jun. 07, 2015]

- [32] Abril, J. E., “Componentes de los Sistemas de Comunicaciones Ópticas”, Láseres Semiconductores. [Online], [http://delibes.tel.uva.es/tutorial/Tema\\_II/Laser/TUTORIAL/Laser.html](http://delibes.tel.uva.es/tutorial/Tema_II/Laser/TUTORIAL/Laser.html) [Accessed: May. 30, 2015]
- [33] Amud, M.I., Elaboración de una propuesta de enseñanza - aprendizaje de los fundamentos de la microscopía óptica mediante el uso de las NTIC haciendo énfasis en el procesamiento y análisis digital de las imágenes. 2014, [Online], [http://ludifisica.medellin.unal.edu.co/recursos/microscopia/practica\\_5.pdf](http://ludifisica.medellin.unal.edu.co/recursos/microscopia/practica_5.pdf) [Accessed: Jun. 09, 2015]
- [34] Bergasa, L. M. “Apuntes de la asignatura Visión Artificial”, Universidad Alcalá de Henares 2015.
- [35] Rafael, “Partes de una cámara reflex” Cultura Audiovisual 2, [Online]. <http://culturaaudiovisualheliopolis2.blogspot.com.es/2012/12/2312-partes-de-una-camara-reflex.html> [Accessed: Jun. 09, 2015]
- [36] Ricardo Arizaga, Marcelo Trivi, Héctor Rabal. “Speckle time evolution characterization by the co-occurrence matrix analysis” Optics & Laser Technology, Vol.31, pp.163-169, 1999.
- [37] Zambrano, P., Metrología y normalización. Interferometría, [Online]. <http://www.monografias.com/trabajos16/interferometro/interferometro.shtml#BIBLIO> [Accessed: May. 29, 2015]
- [38] Olsson, O., NorHull navigation, [Online]. <http://brioffshore.no/norhull-navigation>. [Accessed: May. 26, 2015]
- [39] J.M. Diazdelacruz, A.M. Sánchez y A. Valero Difracción. Speckles, Difracción. [Online]. <http://mecfunnet.faii.etsii.upm.es/difraccion/interfholspk/aspk.html>. [Accessed: May. 20, 2015]
- [40] J.W.Goodman, “Statistical Optics” Wiley Classics Library, John Wiley and Sons, 2000.
- [41] Zwillinger, D. (Ed.). CRC Standard Mathematical Tables and Formulae. Boca Raton, FL: CRC Press, p. 223, 1995.





Universidad de Alcalá  
Escuela Politécnica Superior



ESCUELA POLITECNICA  
SUPERIOR

