



**Universidad
Zaragoza**

Trabajo Fin de Grado

Estrategias de análisis de imagen para la detección de defectos en la superficie de rodadura de rodamientos utilizando visión industrial.

Image analysis strategies for the detection of defects on the bearing's rolling surface trough industrial vision.

Autor/es

Fabio Jiménez Olalla

Director/es

Francisco Javier Brosed Dueso

Escuela de ingeniería y arquitectura, Universidad de Zaragoza

Ingeniería Mecánica

Junio 2017



Escuela de
Ingeniería y Arquitectura
Universidad Zaragoza

*Estrategias de análisis de imagen
para la detección de defectos
en la superficie de rodadura
de rodamientos
utilizando visión industrial*



AGRADECIMIENTOS

En primer lugar me gustaría agradecer a mi familia y amigos su apoyo durante toda esta etapa de realización del Grado de Ingeniería Mecánica y presente TFG.

A mi tutor por aconsejarme y ayudarme cuando lo he necesitado.

A la Universidad de Zaragoza por facilitarme todo el material necesario para la elaboración del Trabajo de Fin de Grado, y a Fersa Bearings[®] por la documentación aportada.

A todos ellos y muchos otros compañeros y profesores con los que he compartido esta etapa, gracias.

Fabio Jiménez Olalla.



RESUMEN

En el presente trabajo se pretende estudiar diferentes estrategias de análisis de imagen, con el objetivo de detectar dos tipos de defectos superficiales en rodamientos.

Para ello se empleará una muestra facilitada por Fersa Bearings, en la que se diferencian tres grupos, y se dispone de la magnitud de los errores para cada pieza.

El proceso que hemos seguido ha sido capturar imágenes de las piezas mediante visión industrial, segmentar estas imágenes, para así aislar la zona donde aparecen estos defectos. Inicialmente se trabaja con las piezas catalogadas como correctas, para así extraer los valores “normales” que debe presentar una pieza para ser considerada como pieza sin defecto superficial, y una vez se dispone de ellos, se extrapola el procedimiento a toda la muestra, recalculando y/o ajustando dicho procedimiento si fuera necesario.

Para el tratamiento de las imágenes y el procesamiento de los datos se ha empleado el software Matlab®, el cual dispone de un gran potencial para el análisis de imagen y procesado de datos extraídos de la misma (histograma, filtrado...)

Por último se comparan los datos obtenidos con los facilitados por Fersa Bearings para analizar el posible potencial industrial de este proceso de análisis de piezas.



(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

TRABAJOS DE FIN DE GRADO / FIN DE MÁSTER

D./D^a. Fabio Jiménez Olalla

con nº de DNI 72897027E en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo

de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la

Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)

Grado en Ingeniería Mecánica, (Título del Trabajo)

Estrategias de análisis de imagen para la detección de defectos en la superficie
de rodadura de rodamientos utilizando visión industrial

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada
debidamente.

Zaragoza, a 24 de Septiembre de 2016

Fdo: Fabio Jiménez Olalla



ÍNDICE

1. Introducción	11
1.1 Motivación y objetivos	11
2. Descripción de la pieza y de los defectos analizados	12
2.1 Descripción de la pieza objeto de inspección.	12
2.2 Descripción de los defectos.	13
3. Muestra a analizar, hardware y captura de imágenes	15
3.1 Hardware y captura de imágenes.	16
4. Estrategias básicas de análisis digital de imagen	19
5. Análisis de las capturas de imagen tomadas	21
5.1 Características de la banda de rodadura.	22
5.2 Puntos iniciales de la banda de rodadura.	25
5.3 Vectores límites de la banda de rodadura y representación	31
5.4 Aislamiento de la banda de rodadura	32
5.5 Histograma de la banda de rodadura.	32
5.6 Análisis de errores.	43
5.6.1 Análisis de error de testa sin limpiar.	44
5.6.2 Análisis de error de retalón en testa.	48
6. Módulos de programación.	53
7. Conclusión y líneas futuras.	58
7.1 Líneas futuras.	59
BIBLIOGRAFIA	60
ANEXOS	62
ANEXO I. Documentación Errores.	63
ANEXO II. Material empleado.	67
ANEXO III. Capturas de Imagen.	71
ANEXO IV. Graficas nivel de gris para $u = 1$.	89
ANEXO V. Gráficas del histograma de la banda de rodadura.	102
ANEXO VI. Código Matlab® comentado.	111



Índice de figuras

Figura 1. Especificaciones rodamientos analizados. Fersa Bearings	12
Figura 2. Ejemplo de rodamiento con error de retalón en testa.....	13
Figura 3. Comparativa de una pieza sin error superficial con una pieza con error de testa sin limpiar.	14
Figura 5. Sistema de captura de imagen. El autor.....	16
Figura 6. Croquis posicionamiento pieza-cámara. El autor.	17
Figura 7. Ejemplo capturas OK, retalón y testa sin limpiar, respectivamente.	18
Figura 8. Fases Procesamiento Digital de Imagen.....	19
Figura 9. Ejemplo "offtopic" de diferentes resultados al segmentar una misma imagen	20
Figura 10. Representación en imagen de los límites de la banda de rodadura.....	21
Figura 11. Inicio y fin de la pieza (P1-P2) y de la banda de rodadura (A-B).....	22
Figura 12. Ejemplo gráficas de los niveles de gris $u = 1$. Pieza OK1.	23
Figura 13. Ejemplo umbrales según Otsu, Sobel y Prewitt	26
Figura 14. Ejemplo umbrales según Roberts, Canny y Log	27
Figura 15. Operación de erosión de píxeles	27
Figura 16. Operación de dilación de píxeles	27
Figura 17. Localización punto inicial del vector inferior	28
Figura 18. Localización píxel con menor ndg	29
Figura 19. Umbral 2 para punto inicial superior.....	30
Figura 20. Resultado de las operaciones de dilatación y erosión	30
Figura 21. Límites banda de rodadura.....	31
Figura 22. Ejemplo aislamiento banda de rodadura	32
Figura 23. Ejemplo histograma OK vs. R vs. TS.....	33
Figura 24. Comparativa gráfica de las medias de nivel de gris de cada columna. En este caso se comparan dos piezas sin error (OK1, OK2), con cuatro con error (TS6,8,13,14). Cabe indicar que el comportamiento de TS13 es el de una pieza sin error, puesto que este se encuentra fuera de la superficie analizada.	34
Figura 25. Gráfica de la curva formada por los el valor mínimo de la media de nivel de gris de cada columna. En la imagen representado en magenta.....	35
Figura 26. Comparativa de las "curvas ndg50" de las piezas con error de testa sin limpiar (TS3, 6,8,13,14) y de las piezas sin error (OK1, OK2)	36
Figura 27. Representación de la "curva de máximos ndg50" formada por los puntos máximos de cada una de las curvas de las piezas sin error. En la imagen destacado en magenta.	36
Figura 28. Comparativa pieza con error de retalón (R5), con pieza sin error (OK2). En la imagen se comparan gráficamente los píxeles de la columna central de cada una de las piezas.....	37
Figura 29. Ejemplo picos en una pieza OK. (OK2)	38
Figura 30. Zona comparada para describir el error de retalón. La imagen de la izquierda se corresponde a una pieza con error de retalón (R5). La imagen de la derecha es una pieza del grupo OK (OK4).....	39
Figura 31. Gráfica máximos, de la zona destacada en la Figura anterior.	39
Figura 32. Representación de los máximos relativos en la banda de rodadura y equivalencia con la posición de la iluminación. (Pieza sin error R4).	40
Figura 33. Comparativa máximos relativos entre piezas con error de retalón y piezas OK.....	40



Figura 34. Comparativa en detalle de los máximos de nivel de gris en la banda de rodadura. Destacando los valores de las piezas del grupo de error de retalón.	41
Figura 35. Gráfica de la curva de máximos de las piezas OK. "Curva de máximos OK".	43
Figura 36. Zona de análisis. En rojo delimitada la zona en la que se van a realizar los siguientes análisis. En azul el "ruido" que se pretende evitar.	44
Figura 37. Representación sobre imagen de las columnas con error de testa sin limpiar. Delimitada en rojo la zona analizada, 1608 columnas. En verde la zona medida en la que se da el error. Imagen correspondiente a la pieza TS4.....	46
Figura 38. Representación de la zona con error de testa sin limpiar. Delimitada en rojo se encuentra la zona analizada, 1608 comunas. En verde la marca hasta donde se ha comprobado el error. Imagen correspondiente a la pieza TS8.....	48
Figura 39. Zona de análisis de máximos de nivel de gris. Las franjas A-B se corresponden con los primeros 35 píxeles activos de la banda de rodadura, zona donde se sitúa el retalón.	49
Figura 40. Comparativa pieza R4 con el "patrón".	50
Figura 41. Filtrado de la curva formada por los máximos de nivel de gris de la pieza R6.	51
Figura 42. Representación sobre imagen del error obtenido. Imagen correspondiente a la pieza R5.	52
Figura 43. Esquema general de los módulos de programación.....	53
Figura 44. Módulo 1. Carga de imagen	54
Figura 45. Módulo 2. Detección de la banda de rodadura	54
Figura 46. Módulo 3. Aislamiento del ROI.....	55
Figura 47. Módulo 4. Variabilidad histograma.....	55
Figura 48. Módulo 5. Análisis de testa sin limpiar.....	56
Figura 49. Módulo 6. Análisis de retalón en testa	56
Figura 50. Módulo 7. Resultado	57
Figura 51. Documentación Fersa 1 testa 1	63
Figura 52. Documentación Fersa testa 2	64
Figura 53. Documentación Fersa retalón 1	65
Figura 54. Documentación Fersa retalón 2	66
Figura 55. Cámara Píxelink empleada.	67
Figura 56. Brazo soporte cámara	67
Figura 57. Objetivo GOYO Optical	68
Figura 58. Material de iluminación.....	69
Figura 59. Ejemplos de la muestra facilitados por Fersa Bearings	69
Figura 60. Pieza "u" utilizada como doble registro de la posición.....	70
Figura 61. Montaje completo en el momento de la captura	70
Figura 62. Captura pieza OK1.....	71
Figura 63. Captura pieza OK2.....	72
Figura 64. Captura pieza OK3.....	73
Figura 65. Captura pieza OK4.....	74
Figura 66. Captura pieza OK5.....	75
Figura 67. Captura pieza R1	76
Figura 68. Captura pieza R2	77
Figura 69. Captura pieza R4	78
Figura 70. Captura pieza R5	79
Figura 71. Captura pieza R6	80
Figura 72. Captura pieza TS3.....	81



Figura 73. Captura pieza TS4.....	82
Figura 74. Captura pieza TS6.....	83
Figura 75. Captura pieza TS8.....	84
Figura 76. Captura pieza TS10.....	85
Figura 77. Captura pieza TS11.....	86
Figura 78. Captura pieza TS13.....	87
Figura 79. Captura pieza TS14.....	88
Figura 80. Gráfica del nivel de gris del grupo OK, $u = 1$	89
Figura 81. Gráfica del nivel de gris del grupo R, $u = 1$	90
Figura 82. Gráfica del nivel de gris del grupo TS, $u = 1$	90
Figura 83. Gráfica del nivel de gris de OK1, $u = 1$	91
Figura 84. Gráfica del nivel de gris de OK2, $u = 1$	91
Figura 85. Gráfica del nivel de gris de OK3, $u = 1$	92
Figura 86. Gráfica del nivel de gris de OK4, $u = 1$	92
Figura 87. Gráfica del nivel de gris de OK5, $u = 1$	93
Figura 88. Gráfica del nivel de gris de R1, $u = 1$	94
Figura 89. Gráfica del nivel de gris de R2, $u = 1$	94
Figura 90. Gráfica del nivel de gris de R5, $u = 1$	95
Figura 91. Gráfica del nivel de gris de R4, $u = 1$	95
Figura 92. Gráfica del nivel de gris de R6, $u = 1$	96
Figura 938. Gráfica del nivel de gris de TS3, $u = 1$	97
Figura 7994. Gráfica del nivel de gris de TS4, $u = 1$	97
Figura 95. Gráfica del nivel de gris de TS6, $u = 1$	98
Figura 96. Gráfica del nivel de gris de TS8, $u = 1$	98
Figura 97. Gráfica del nivel de gris de TS11, $u = 1$	99
Figura 98. Gráfica del nivel de gris de TS10, $u = 1$	99
Figura 99. Gráfica del nivel de gris de TS13, $u = 1$	100
Figura 100. Gráfica del nivel de gris de TS14, $u = 1$	100
Figura 101. Histograma OK1.....	102
Figura 102. Histograma OK3.....	103
Figura 103. Histograma OK.....	104
Figura 104. Histograma R1.....	104
Figura 105. Histograma R4.....	105
Figura 106. Histograma R2.....	105
Figura 107. Histograma R5.....	106
Figura 108. Histograma R6.....	106
Figura 109. Histograma TS4.....	107
Figura 110. Histograma TS3.....	107
Figura 111. Histograma TS8.....	108
Figura 11200. Histograma TS10.....	109
Figura 113. Histograma TS11.....	109
Figura 114. Histograma TS14.....	110
Figura 115. Histograma TS13.....	110



Escuela de
Ingeniería y Arquitectura
Universidad Zaragoza

*Estrategias de análisis de imagen
para la detección de defectos
en la superficie de rodadura
de rodamientos
utilizando visión industrial*



1. Introducción

1.1 Motivación y objetivos

Este trabajo nace del interés de Fersa Bearings por un método no invasivo de control de la calidad, que pueda ser incluido en una nueva línea de fabricación. Es por ello que junto con del departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación de la Universidad de Zaragoza se inicia este proyecto.

Así el cometido de este trabajo, como parte de un sistema de detección de errores será diferenciar piezas sin error (OK), de piezas con error, siendo el sistema de fijación y posicionamiento competencia de otro trabajo. No obstante se explicará la metodología seguida a la hora de tomar las imágenes mediante un sistema provisional de fijación, que permita repetitividad de condiciones en la captura de imágenes.

Las tareas principales del proyecto podrían resumirse en*:

- Obtener una muestra de imágenes lo más representativamente posible de los fallos objeto de estudio.
- Segmentar las imágenes, separando la información útil para nuestro caso.
- Identificar y representar sobre las imágenes la banda de rodadura, nuestra “*Region Of Interest*” (de ahora en adelante ROI) donde se dan los defectos superficiales a estudio.
- Obtener datos objetivos del ROI, según su ubicación dentro los mismos, su valor en escala de grises...
- Diferenciar entre piezas correctas (OK) y piezas con defecto superficial.
- Diferenciar el tipo de defecto (retalón en testa y/o testa sin limpiar).
- Expresar la magnitud de los errores y su correspondencia con los datos facilitados por Fersa Bearings.

*Orden cronológico de ocurrencia



2. Descripción de la pieza y de los defectos analizados

2.1 Descripción de la pieza objeto de inspección.

El trabajo se basa en el estudio de rodamientos después de haber sido rectificadas, con el fin de conocer si este proceso de mecanizado ha sido correcto, es decir se detecta o no la presencia de defectos en la superficie del mismo.

En este caso se centrará por el momento solo en un tipo de rodamiento, en concreto en el anillo interior (o cono) de un rodamiento de rodillos ref.30211 XF con unas dimensiones de $D=100\text{mm}$ $d=57,150\text{mm}$ $T=21\text{mm}$.

Siendo un objetivo futuro comprobar si la metodología es extrapolable a piezas de distinto tamaño.



Figura 1. Especificaciones rodamientos analizados. Fersa Bearings



2.2 Descripción de los defectos.

Este proyecto se va a centrar en dos tipos de defectos superficiales. El cual presentan las piezas tras el proceso de mecanizado realizado por Fersa Bearings. Fersa los define como: defecto de **retalón en testa** y defecto de **testa sin limpiar**. Nombres que también serán empleados para designar estos defectos. La importancia del estudio de dichos defectos, radica en que bien pueden afectar directamente a la forma de servicio de la pieza (produciendo vibraciones, exceso de fricción...) o de una forma indirecta, realizando un correcto servicio pero reduciendo el número de ciclos de vida útil para los que en principio ha sido diseñada la pieza:

- **Retalón en testa:** se clasifica un defecto en la banda de rodadura como retalón, al escalón a distinta cota producido por un error en un proceso de refrentado debido a que la muela no “come” material en una zona de la superficie. Este defecto se encuentra en la parte interna de la banda de rodadura, y como se aprecia en la Figura 2, es una curva que presenta un mayor brillo que el resto de la banda de rodadura. Este defecto se cuantifica según la diferencia de cota relativa entre la banda de rodadura y el retalón (en μm).



Figura 2. Ejemplo de rodamiento con error de retalón en testa.



- **Testa sin limpiar:** se clasifica un defecto como testa sin limpiar cuando tras un proceso de rectificado, en la banda de rodadura se aprecia que la superficie no está mecanizada (bien por mal estado de la herramienta, por error en el posicionamiento...), en este caso el error se cuantifica en relación al total de la superficie trabajada, en tanto por ciento sobre la superficie total.

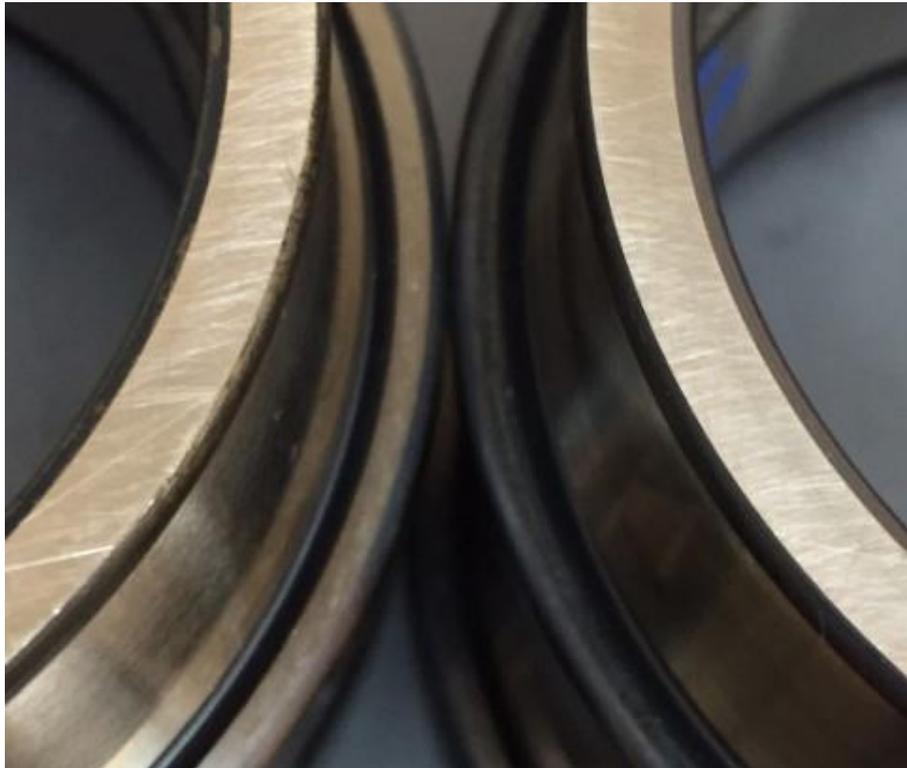


Figura 3. Comparativa de una pieza sin error superficial con una pieza con error de testa sin limpiar.



3. Muestra a analizar, hardware y captura de imágenes

Para la realización del trabajo se ha tenido acceso a 18 piezas de la muestra facilitada por Fersa Bearings, dividida en tres grupos según la presencia o no de defectos en la superficie, así las piezas quedan clasificadas en:

- Piezas OK: se dispone de 5 muestras.
- Piezas con retalón en testa: se dispone de 5 muestras para analizar.
- Piezas con testa sin limpiar: se dispone de 8 muestras.

Se presentan según el orden seguido por Fersa Bearings en el documento facilitado con la magnitud de los errores.

A modo de resumen del mismo (documentación completa en Anexo I)

Nº Pieza	Nombre	Grupo	Magnitud
1	OK1	OK	NO
2	OK2	OK	NO
3	OK3	OK	NO
4	OK4	OK	NO
5	OK5	OK	NO
6	R1	Retalón	2 μ m
7	R2	Retalón	10 μ m
8	R4	Retalón	OK
9	R5	Retalón	50 μ m
10	R6	Retalón	10 μ m
11	TS3	Testa sin limpiar	<10%
12	TS4	Testa sin limpiar	<10%
13	TS6	Testa sin limpiar	1
14	TS8	Testa sin limpiar	>25%
15	TS10	Testa sin limpiar	<25%
16	TS11	Testa sin limpiar	<25%
17	TS13	Testa sin limpiar	\approx 25%
18	TS14	Testa sin limpiar	<25%

Tabla 1. Resumen de la muestra disponible a analizar.



3.1 Hardware y captura de imágenes.

Para la captura de las imágenes utilizadas para el posterior análisis se ha montado un sistema de fijación y registro provisional para las piezas, intentando conseguir la mayor repetitividad de las condiciones en el momento de la toma de imágenes.

El hardware utilizado en la captura de las imágenes es (véase Anexo II):

- Cámara digital PixelINK PL-A781
- Iluminación (LED).
- Ordenador, para gestionar las opciones de cámara e iluminación.
- Brazo de posicionamiento y sujeción.
- Mesa soporte de piezas.
- Soporte anclado a la mesa, a modo de sistema de doble registro de la posición de las piezas.

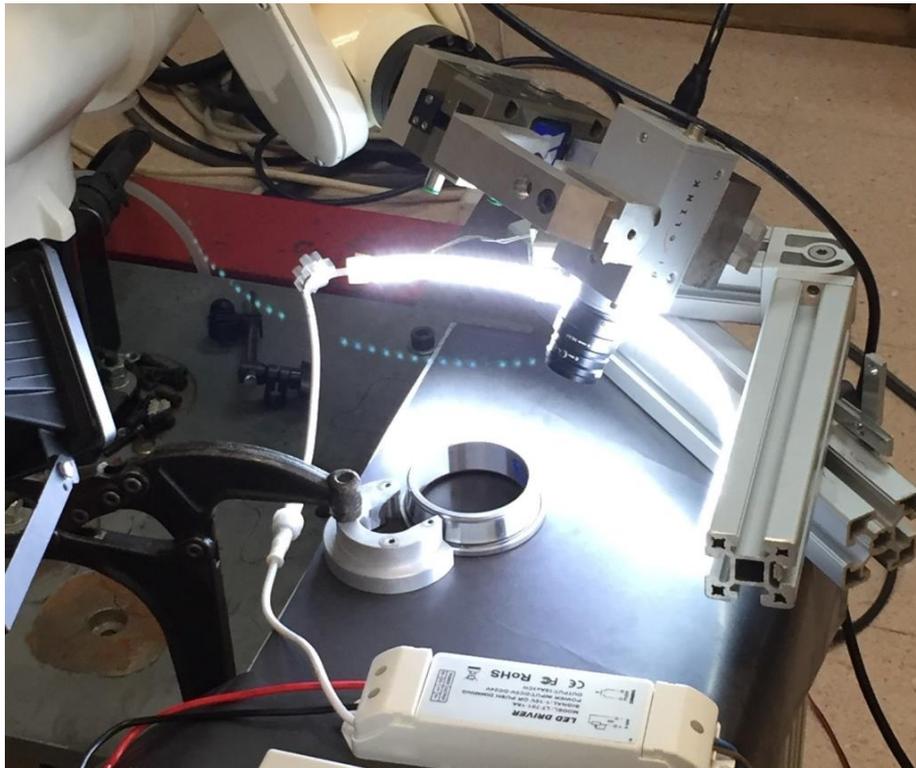


Figura 4. Sistema de captura de imagen. El autor.



Croquis Montaje:

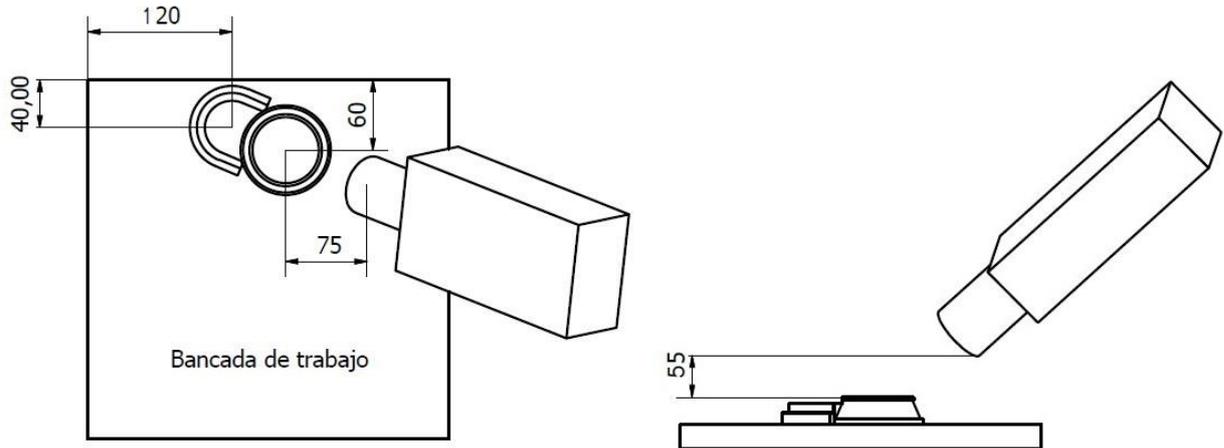


Figura 5. Croquis posicionamiento pieza-cámara. El autor.

Una vez realizado todo el montaje (provisional, competencia de otro proyecto) y después de varias pruebas se ha llegado a la siguiente configuración:

La iluminación ha sido establecida mediante una tira de LEDs fijos, colocados alrededor de la pieza, la cual registra su posición en dos puntos (mediante una pieza fijada a la bancada de trabajo) para conservar la misma posición al tomar las imágenes.

Los parámetros de captura elegidos finalmente son:

- Capturar directamente en escala de grises.
- Tiempo de exposición $t=50$ ms.
- Ganancia = 0 dB.
- 55 mm de distancia desde la lente hasta la pieza.
- Almacenar las capturas en formato .bmp con un tamaño de 2208 x 3000 píxeles (Todas las imágenes utilizadas en el presente trabajo se encuentra en el Anexo III).
- Aproximadamente las capturas cubren un 25% del total de la pieza.

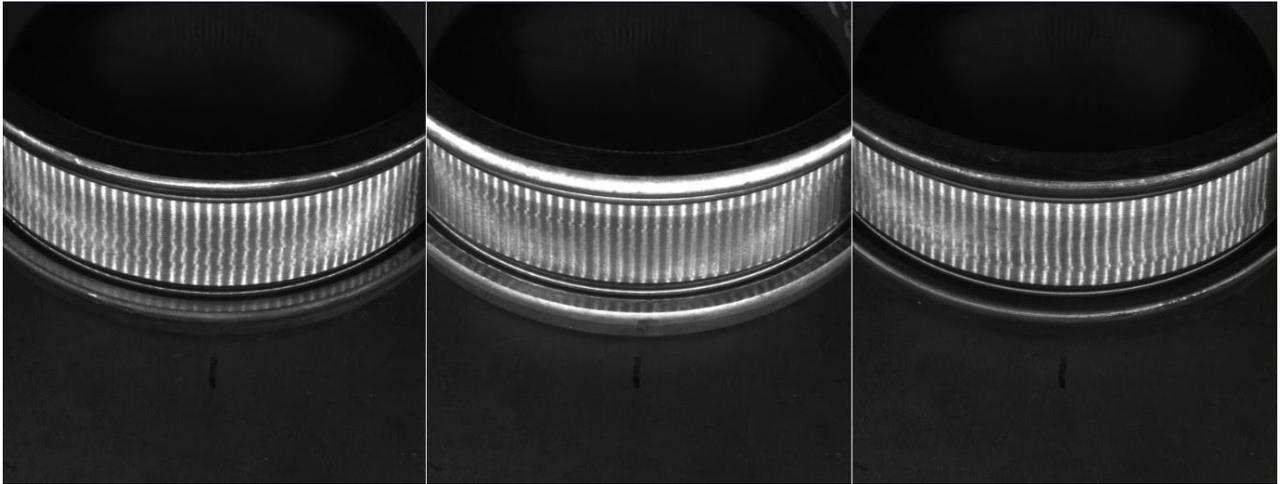


Figura 6. Ejemplo capturas OK, retalón y testa sin limpiar, respectivamente.



4. Estrategias básicas de análisis digital de imagen

Dentro del análisis digital de imagen (Digital Image Processing, DIP) un primer paso es la **captura** mediante la cual se obtiene la imagen digital

Es común que a la obtención de la imagen le siga un **preprocesado**, para reducir el ruido, modificar el contraste, hacer un primer realce de partes de interés o simplemente quitar información que no es necesaria (recortar la imagen por ejemplo).

Una vez la imagen está preparada comienza el proceso de **segmentación**, el cual **engloba diferentes procesos** mediante el cual diferenciamos la imagen en tantos objetos/partes como necesitemos, según nuestro interés, basándonos en diferentes descriptores de la imagen (color, nivel de gris, textura, posición, tamaño, forma...)

La **descripción** es el proceso que diferencia estos objetos según las características anteriormente mencionada según forma, tamaño, área...

El **reconocimiento** es el proceso que identifica los objetos como los caracteres de un texto, una cara, una moneda.

Y por último la **interpretación** mediante la cual se asocia un objeto con una descripción y forma determinada.

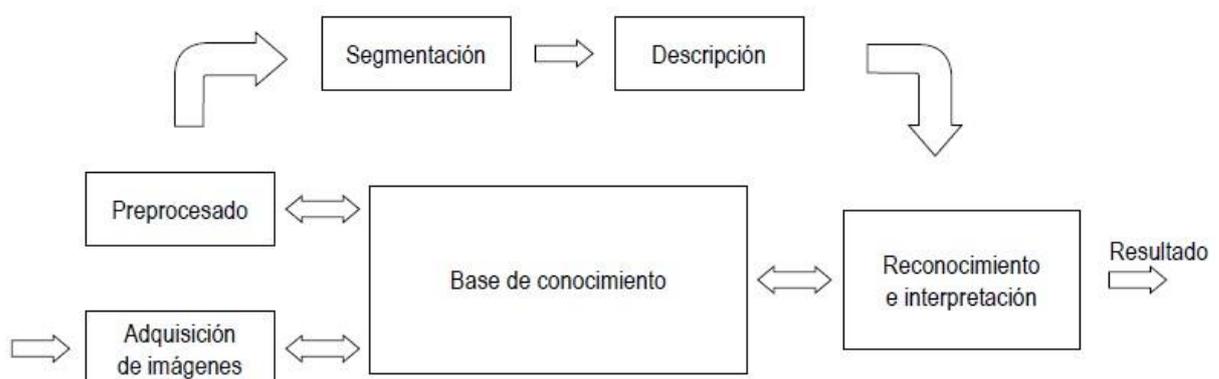


Figura 7. Fases Procesamiento Digital de Imagen



Los algoritmos de segmentación de imagen por lo general se basan en propiedades del nivel de gris y discontinuidades y similitudes. Mediante variaciones en el nivel de gris se intenta dividir/reconocer partes diferenciadas de la imagen basándose por ejemplo en cambios bruscos del nivel de gris que se dan en las transiciones entre formas. Estas relaciones de discontinuidad y similitud son en las que se basan las técnicas de Umbralizado que posteriormente utilizaremos con el fin de aislar la banda de rodadura, zona donde se centra el análisis de los defectos superficiales.

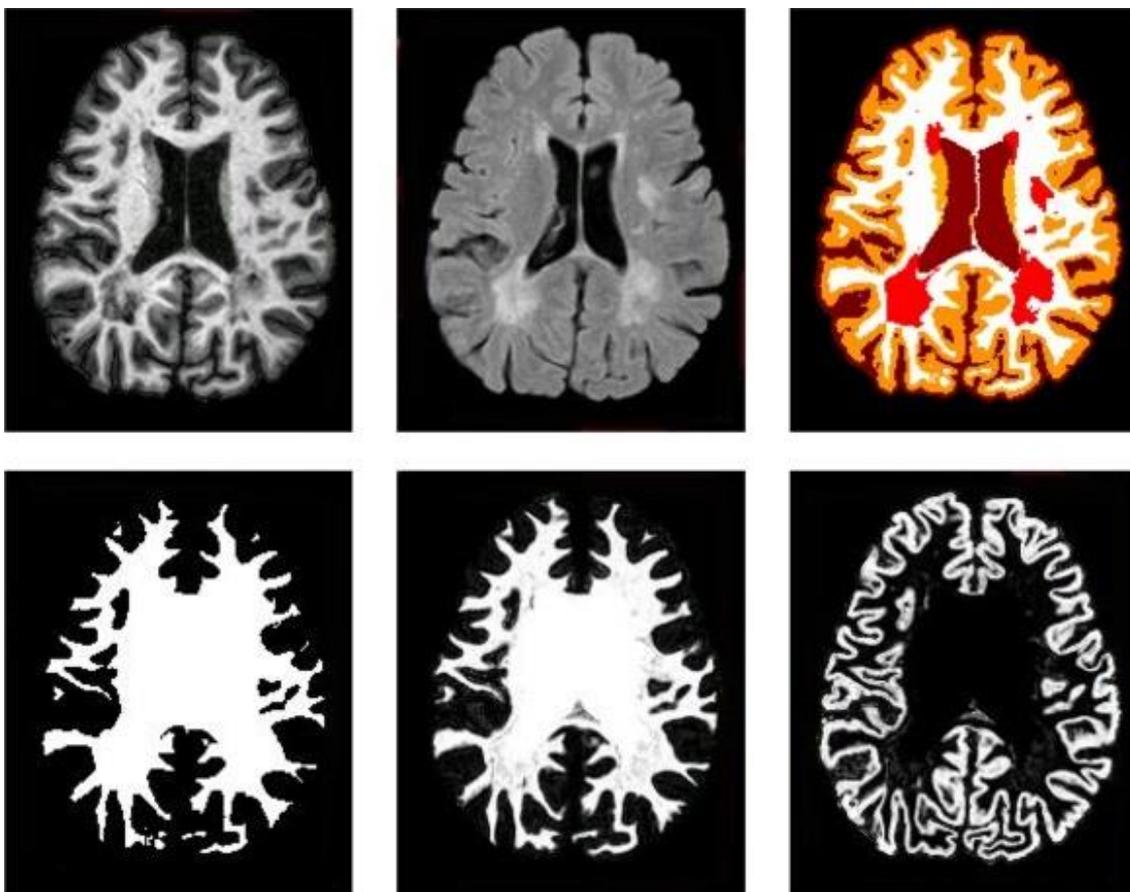


Figura 8. Ejemplo "offtopic" de diferentes resultados al segmentar una misma imagen



5. Análisis de las capturas de imagen tomadas

Ahora se procede a obtener la región de interés, es decir, la banda de rodadura del rodamiento delimitada de forma clara.

En las imágenes tomadas un primer objetivo que tenemos es poder identificar la banda de rodadura. Así para cada columna de la imagen buscamos dos puntos que limiten la banda de rodadura, para poder aislarla como se muestra en la siguiente figura:

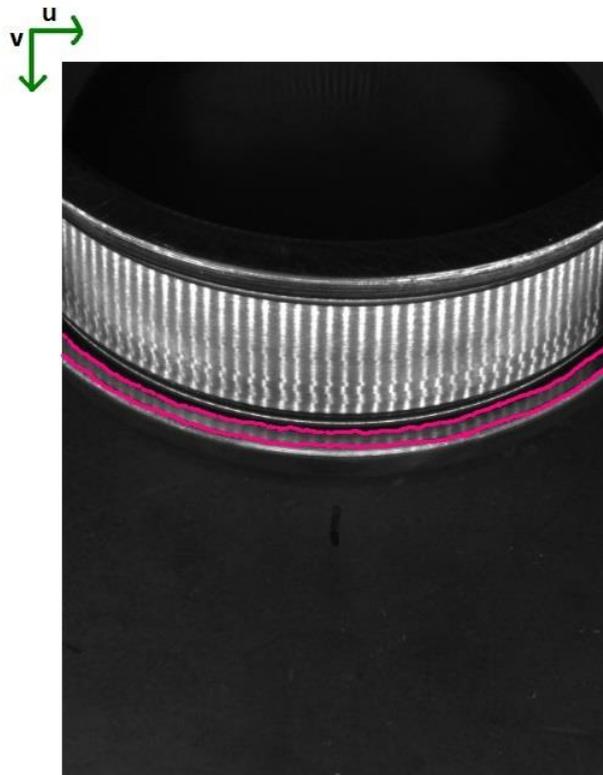


Figura 9. Representación en imagen de los límites de la banda de rodadura.

Estas imágenes son interpretadas como una matriz $u \times v$ de 2208 píxeles en dirección horizontal (u), y de 3000 en vertical (v) con origen en la esquina superior izquierda.

5.1 Características de la banda de rodadura.

Para poder aislarla primero es necesario tener una idea de su extensión y localización dentro de la imagen. Así se comienza a localizar puntos que limitan la banda de rodadura en la primera columna. Para ello antes de nada se examinan las imágenes con el objetivo de comprobar si en todas ellas estos puntos se encuentra en la misma posición (o similar en cuanto a píxeles de la imagen se refiere). Se cargan todas las capturas de imagen realizadas en el software Matlab®, y a partir de su visualizador de imagen se localizan los puntos en los que se observa que comienza y finaliza la banda de rodadura en la primera columna (A-B).

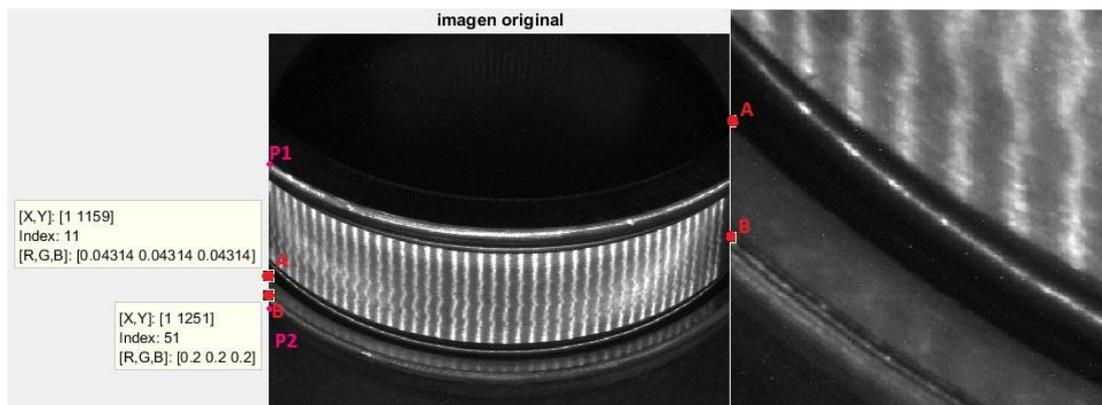


Figura 4. Inicio y fin de la pieza (P1-P2) y de la banda de rodadura (A-B).

Como se observa en la imagen se han marcado los puntos correspondientes al inicio y final de la pieza (P1-P2) y los puntos inicial y final de la banda de rodadura (A-B).

Para comprobar la información obtenida mediante el visualizador de imágenes de Matlab®, se representa gráficamente el valor del nivel de gris (ndg) para cada píxel de la primera columna $u = 1$.

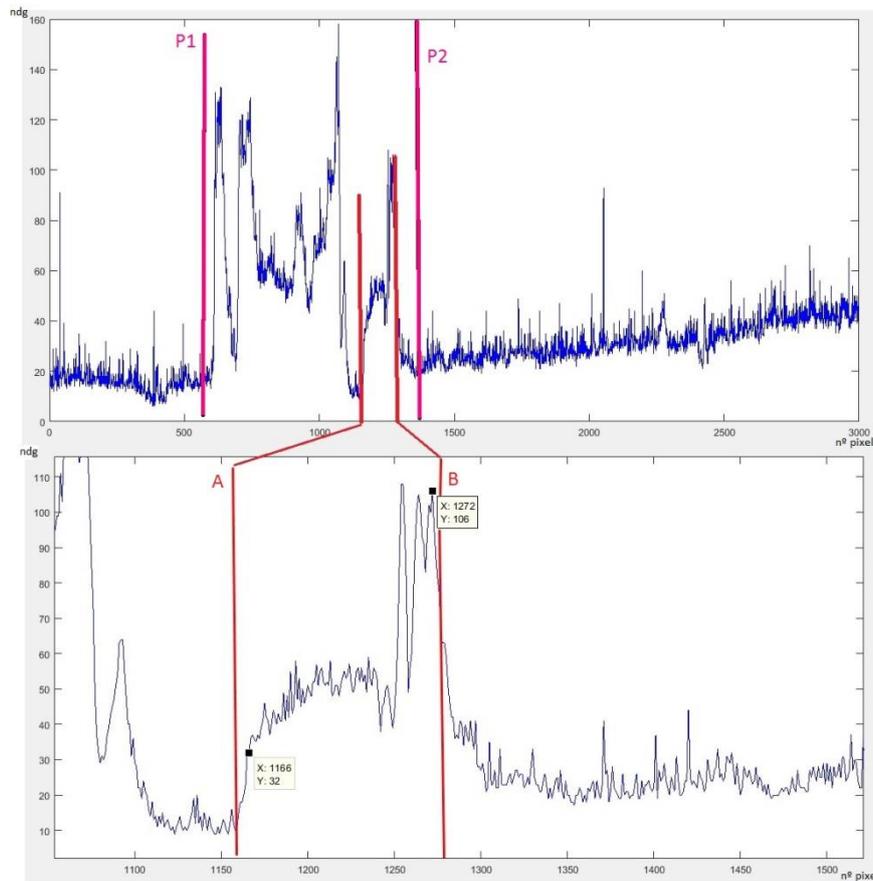


Figura 5. Ejemplo gráficas de los niveles de gris $u = 1$. Pieza OK1.

Como se observa en las gráficas de la figura 12, correspondientes a la primera columna, $u = 1$, en las que se delimita la zona correspondiente a la pieza completa P1-P2 en magenta y la correspondiente a la banda de rodadura (aproximadamente) A-B en rojo, los puntos de inicio y fin de la banda de rodadura son semejantes a los encontrados de forma manual mediante el visualizador de imágenes de Matlab®.

Llegados a este punto se graficará la primera columna para todas las piezas del estudio (véase Anexo IV). Con ello se conocerán los puntos de inicio y final de la banda de rodadura para toda la muestra (comparando los datos manuales y automáticos al final del Anexo IV), y otros descriptores relacionados con el tipo de error que presenta la pieza (niveles de gris menores comparados con los de piezas OK, picos de nivel de gris en una zona de valores homogéneos...).



A continuación tenemos una tabla en la que se recogen los puntos de inicio y fin de la banda de rodadura para la primera columna, $u = 1$. En ella se comparan los datos obtenidos directamente a partir del visualizador de imágenes de Matlab® y de forma automatizada, como se explica en el apartado 5.2.

Pieza	Punto sup manual	Punto sup auto	Punto inf manual	Pto inf auto
OK1	1163	1162	1277	1274
OK2	1179	1177	1268	1275
OK3	1162	1169	1290	1285
OK4	1159	1164	1288	1280
OK5	1158	1164	1274	1278
R1	1154	1161	1283	1304
R2	1154	1159	1305	1304
R4	1164	1177	1276	1306
R5	1142	1151	1278	1310
R6	1154	1159	1266	1304
TS3	1154	1164	1287	1287
TS4	1183	1189	1305	1310
TS6	1163	1174	1276	1281
TS7	1165	1174	1277	1281
TS8	1169	1172	1278	1280
TS10	1168	1171	1266	1275
TS11	1175	1174	1275	1280
TS12	1180	1183	1279	1283
TS13	1170	1176	1274	1279
TS14	1171	1172	1272	1276
Media	1108,90	1113,90	1218,76	1226,29
Desviacion estandar	10,36	9,10	10,82	13,06

Tabla 2. Comparativa puntos Manuales vs. Automáticos



5.2 Puntos iniciales de la banda de rodadura.

Una vez se conocen aproximadamente los límites de la banda de rodadura, se procederá a aislarla con el objetivo de posteriormente poder analizar únicamente los píxeles pertenecientes a la misma. Para ello se seguirán los siguientes pasos:

- Convertir las imágenes a blanco y negro según un determinado *umbral*, para así realizar los bordes/límites de la banda de rodadura y poder reconocer un punto de la misma.
- Seguido se tratará la imagen, mediante procesos de dilatación y erosión de los píxeles. Para conseguir una imagen “limpia”, que facilite la búsqueda de los límites.
- Se busca en la primera columna el último píxel perteneciente a la banda de rodadura, el cual se designa como punto límite inferior.
- A partir del punto encontrado, se busca en la imagen original el punto con el menor nivel de gris, el cual se utilizará (dándole un margen para asegurar píxeles activos), como nuevo nivel de umbral para buscar el punto superior.
- Al igual que en el primer caso se dilatan y erosionan los píxeles de los bordes de imagen, para tener la mayor cantidad de información con el mínimo ruido.
- En la imagen resultante se busca el primer píxel perteneciente a la banda de rodadura, el cual se define como punto límite superior.

Al finalizar estas operaciones se dispone de un par de puntos pertenecientes a la primera columna que delimitan la banda de rodadura.

Para las siguientes operaciones se utilizará el software Matlab®, mediante el siguiente procedimiento.

Inicialmente se carga la imagen en el programa, el cual como se ha comentado, interpreta la imagen como una matriz de píxeles de 3000 filas por 2208 columnas (u x v). Para definir el primer umbral se analizan los resultados de aplicar los distintos métodos predefinidos en Matlab®, los cuales convierten los píxeles de la imagen a blanco y negro dependiendo de un umbral relacionado con el tipo de umbral elegido.



Los métodos para definir el umbral que se han probado son:

- Otsu: calcula el valor umbral de forma que la dispersión dentro de cada segmento sea lo más pequeña posible
- Sobel: calcula el gradiente de la intensidad de una imagen en cada píxel. Así, para cada punto, este operador da la magnitud del mayor cambio posible, la dirección de éste y el sentido desde oscuro a claro. El resultado muestra cómo de abruptamente o suavemente cambia una imagen en cada punto analizado y, en consecuencia, cuán probable es que éste represente un borde en la imagen
- Prewitt: calcula el gradiente de la intensidad de la imagen en cada punto, dando la dirección del mayor incremento posible de luz a oscuridad.

Además se han probado otras funciones de umbral similares como son Roberts, Canny y la función logarítmica (Log), las cuales ofrecen peores resultados, como veremos a continuación por excesivo ruido o por menor nivel de detalle, para nuestros intereses.

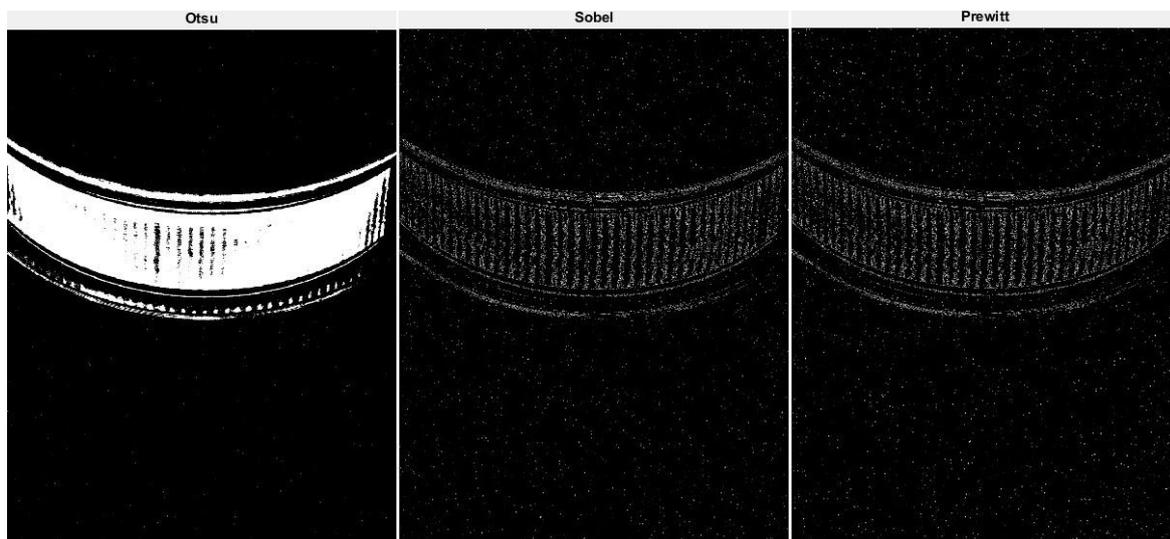


Figura 6. Ejemplo umbrales según Otsu, Sobel y Prewitt

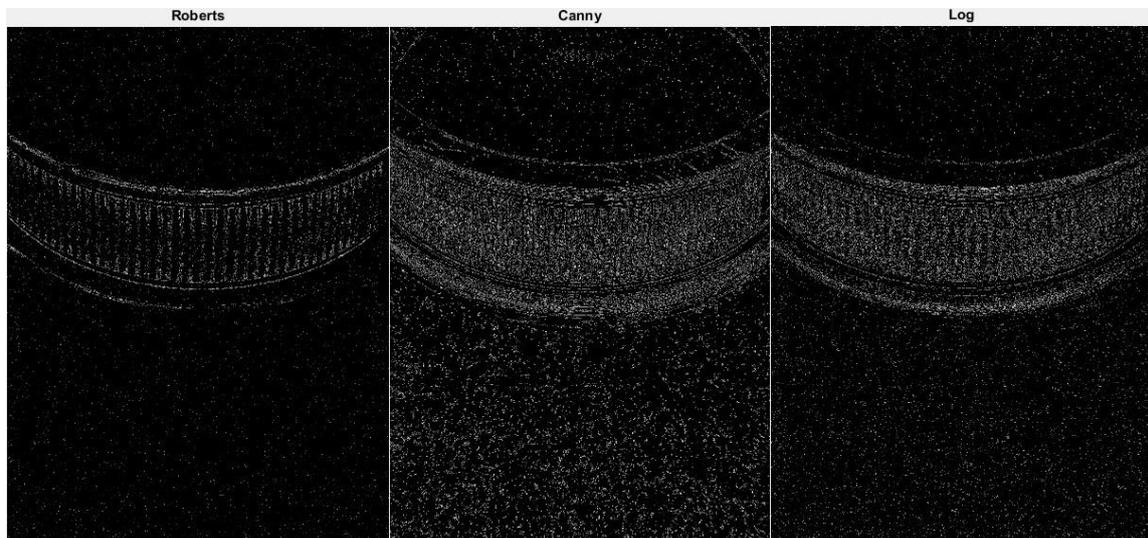


Figura 7. Ejemplo umbrales según Roberts, Canny y Log

En vista de los resultados mostrados en las imágenes anteriores se elige establecer el umbral mediante Otsu, pues es el que ha proporcionado una imagen con menor ruido y bordes de la banda de rodadura mejor definidos.

Una vez seleccionado el método para establecer el umbral, es necesario conseguir una imagen con la mayor información útil y el mínimo ruido. Para ello se realiza, después de establecer el umbral mediante Otsu, una operación de dilatación de los píxeles activos.



Figura 9. Operación de dilatación de píxeles



Figura 8. Operación de erosión de píxeles

Con esta operación se consigue mayor información en los bordes de la imagen, pero a su vez aumenta la cantidad de ruido, píxeles no deseados, en la imagen (figura 14). Por ello se debe realizar otra operación de erosión para conseguir una imagen sin este exceso de píxeles.

Una vez se dispone de una imagen “limpia” buscamos el punto perteneciente al límite inferior de la banda de la primera columna. Así puesto que esta imagen resultante se encuentra en blanco y negro, reconocida en Matlab® como una matriz lógica de 1 (activo, blanco) y 0 (no activo, negro), lo que se busca es el último punto activo dentro de la primera columna (o el primero si se empieza desde el final de la columna).



Figura 10. Localización punto inicial del vector inferior

Así a partir del primer punto inferior se calculará el primer punto superior. Buscando desde este punto, otro en la imagen original que tenga el menor nivel de gris de la zona, para ello se da un margen amplio de búsqueda, como se ha observado en las gráficas de los niveles de gris para la columna $u = 1$, la extensión de la banda de



rodadura es de 100 píxeles aproximadamente en esta zona, por ello se debe emplear un margen de búsqueda mayor, lo cual incluye la transición entre la banda de rodadura y la cara del rodamiento.

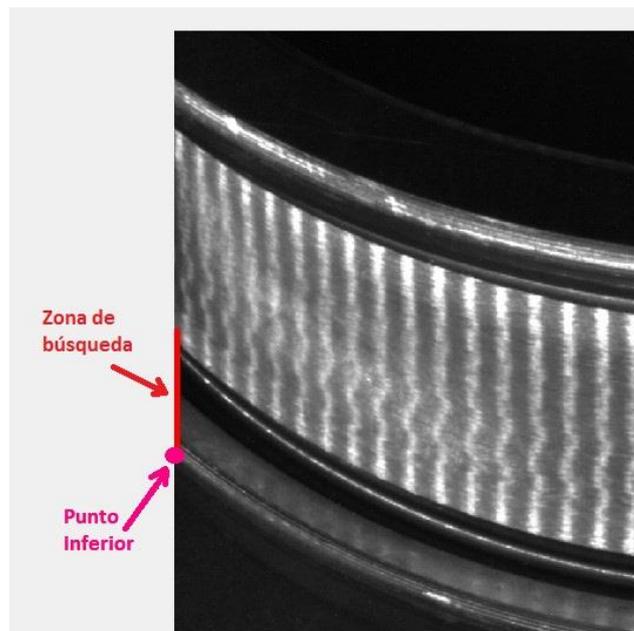


Figura 11. Localización píxel con menor ndg

Este punto con el menor valor de nivel de gris más un margen para asegurarnos píxeles activos, lo se empleará como umbral para localizar el punto superior de la banda de rodadura. En este caso los píxeles por debajo de este valor umbral los convertiremos en píxeles activos (blanco) y todos los que se encuentren por encima pasaran a no activos (negro).

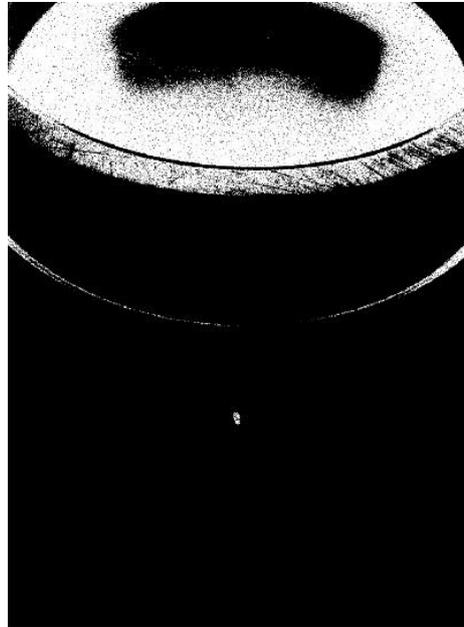


Figura 128. Umbral 2 para punto inicial superior

Al igual que se ha hecho para conseguir el primer umbral, se realizarán las operaciones de dilatación y erosión para así tener mayor información con el menor ruido. Resultando:

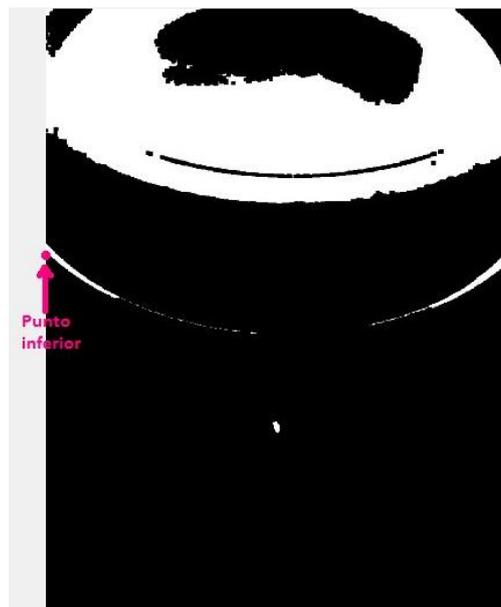


Figura 13. Resultado de las operaciones de dilatación y erosión



Ahora de la misma forma que en la búsqueda del punto inicial inferior, se busca el último punto activo (blanco) dentro de la primera columna.

Y con estos dos puntos iniciales procederemos a calcular el resto.

5.3 Vectores límites de la banda de rodadura y representación

Una vez se han calculado los dos puntos iniciales superior e inferior para la primera columna (orden según su valor respecto a la coordenada v), vamos a calcular todos los puntos que limiten nuestro ROI, dos puntos para cada columna. Estos puntos los almacenaremos como vectores uno superior y otro inferior, es decir un par de vectores de dimensiones 1×2208 .

Para que el cálculo de estos vectores no tenga dependencia en datos externos, calculamos cada punto como el que tenga una menor variación del nivel de gris respecto a su predecesor. Obteniendo:

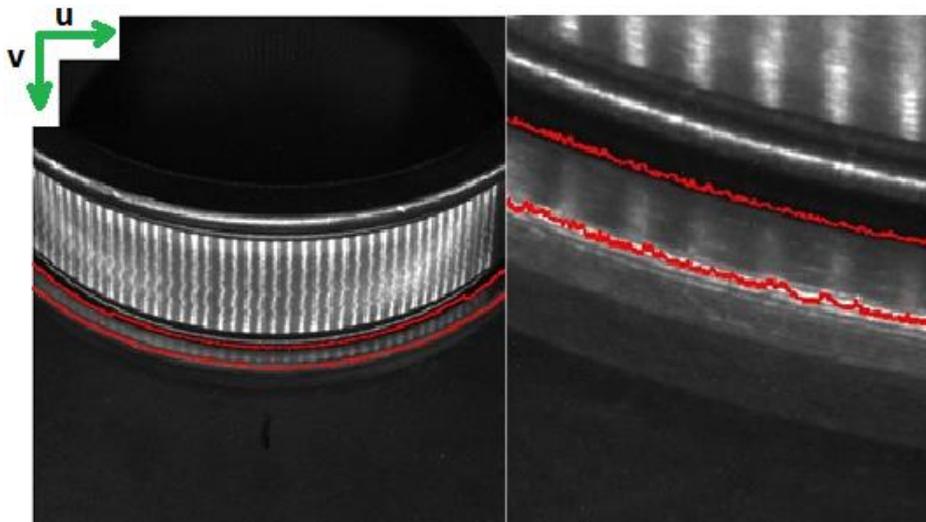


Figura 14. Límites banda de rodadura



5.4 Aislamiento de la banda de rodadura

Una vez que se tienen los límites bien definidos para la banda de rodadura, el siguiente paso que se realiza es aislarla del resto de la imagen para ello se “desactivan”, nivel de gris a 0, todos los píxeles que se encuentren fuera de estos límites.

Obteniendo:



Figura 21. Ejemplo aislamiento banda de rodadura

Para no variar las referencias u , v se mantendrán las dimensiones de la imagen 2208x3000 píxeles, y se excluirá el valor de nivel de gris 0 introducido.

5.5 Histograma de la banda de rodadura.

Una vez se dispone de la banda de rodadura aislada, se grafica el histograma de todas las imágenes (excluyendo el 0 del mismo). En primer lugar para las piezas del grupo OK, para así conocer cómo se distribuyen, según su nivel de gris, los píxeles en una pieza correcta. Y posteriormente poder comparar estos valores con las piezas con error superficial.

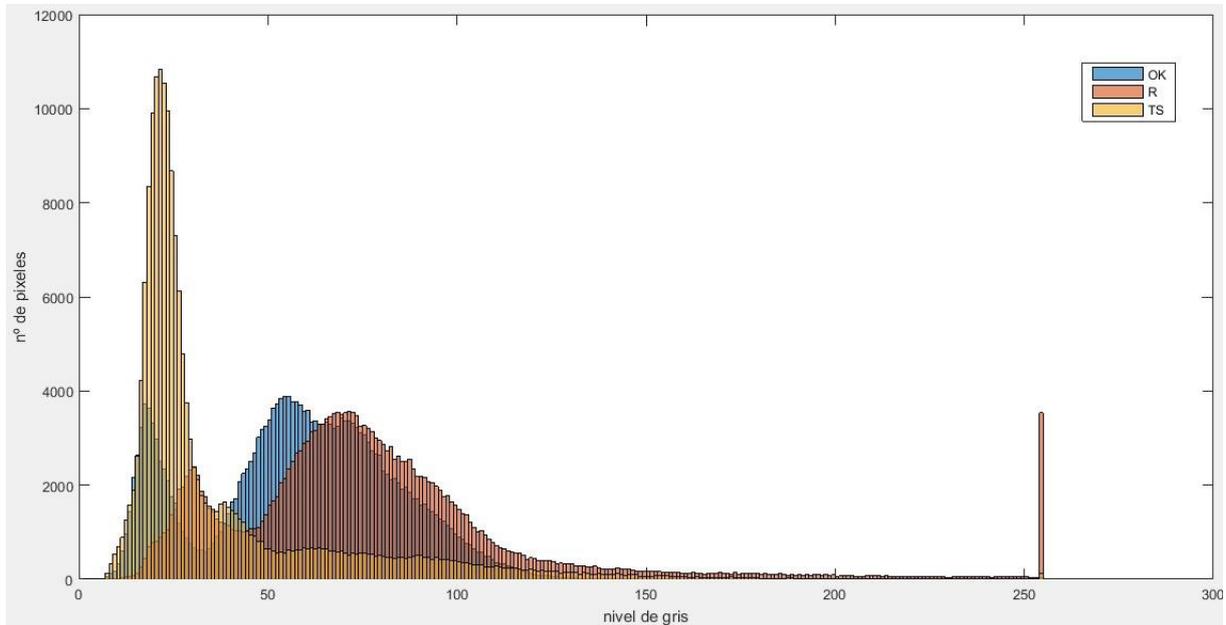


Figura 22. Ejemplo histograma OK vs. R vs. TS

Como se puede observar en la figura 22 en la que se compara gráficamente el histograma de tres piezas representativas de cada grupo. Una pieza del grupo sin error superficial (OK1) en azul, una pieza del grupo de retalón en testa (R5) en rojo y una pieza del grupo de testa sin limpiar (TS6), en naranja. (Histograma de cada una de las piezas en Anexo V).

En este ejemplo y de los incluidos en anexos se puede observar que las piezas con testa sin limpiar tienen la mayor parte de sus píxeles con un valor del nivel de gris inferior a 50, lo que se utilizará como un descriptor de este tipo de error. Así mismo podemos observar que las piezas con error de retalón en testa tienen mayor número de píxeles a partir del valor de nivel de gris de 50, que las piezas sin error superficial.

Otro descriptor que se podrá utilizar para diferenciar los tres grupos es la media de nivel de gris de todos los píxeles pues arroja diferencias significativas.

Estos mismos descriptores también se analizarán columna a columna pues estos errores se dan por zonas, por lo que globalmente una pieza puede parecer que no presenta error pero si lo tiene en una zona.



5.6 Descriptores empleados.

A partir de la información que aportan tanto las gráficas de los niveles de gris (véase Anexo IV) y de la información de los histogramas de cada pieza (véase Anexo V). Se ha decidido emplear los siguientes descriptores para así clasificar las piezas según el tipo de error que presenten.

5.6.1 Descriptores del error de testa sin limpiar.

Como se ha podido comprobar tanto de forma visual, como contrastando los datos obtenidos de las gráficas de los niveles de gris y de la información ofrecida por los histogramas, se observa que las piezas con error de testa sin limpiar, presentan un valor de nivel de gris inferior a las piezas sin error. Por ello se van a utilizar los siguientes descriptores:

- **1. Valor medio del nivel de gris para cada columna:** se calcula el valor medio de nivel de gris de los píxeles pertenecientes a cada columna de la banda de rodadura, y se contrasta con los datos de una de las piezas que utilizamos como patrón. Así podemos comprobar la presencia de este error por zonas.

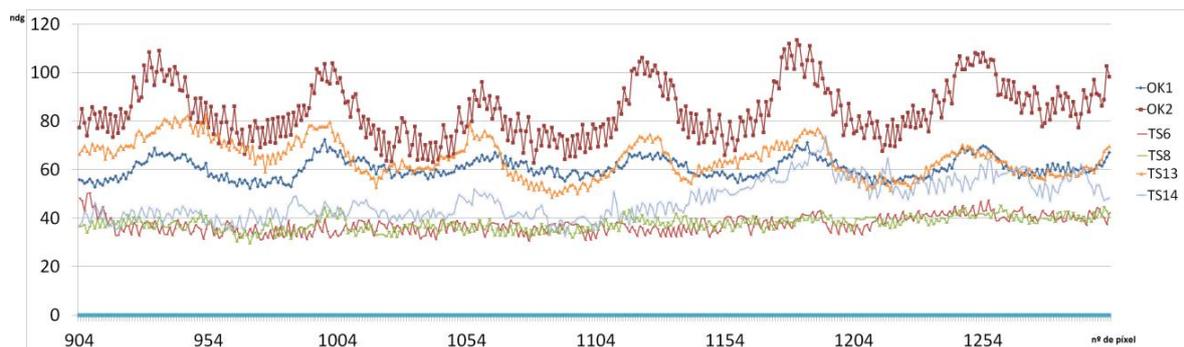


Figura 15. Comparativa gráfica de las medias de nivel de gris de cada columna. En este caso se comparan dos piezas sin error (OK1, OK2), con cuatro con error (TS6,8,13,14). Cabe indicar que el comportamiento de TS13 es el de una pieza sin error, puesto que este se encuentra fuera de la superficie analizada.



Para comparar estas curvas configuradas con las medias de nivel de gris, crearemos una curva compuesta por los valores mínimos de las curvas de las piezas sin error.

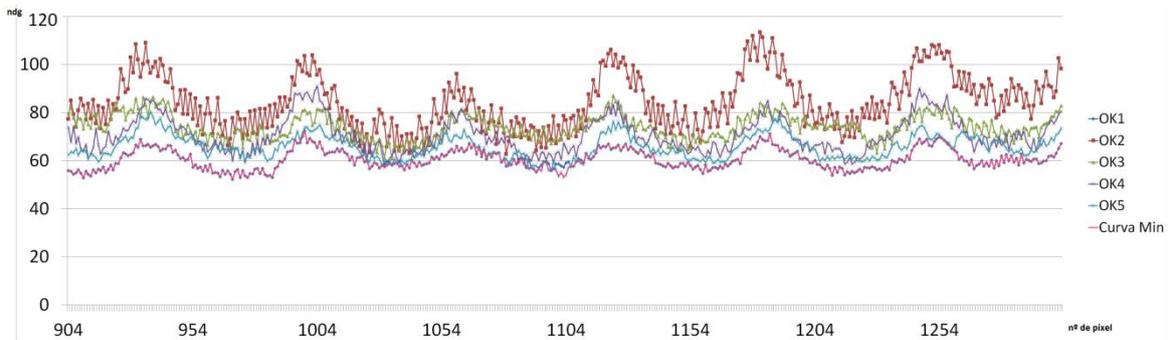


Figura 16. Gráfica de la curva formada por los el valor mínimo de la media de nivel de gris de cada columna. En la imagen representado en magenta.

Se va a realizar la comparación con la curva formada con los mínimos de las curvas de las piezas sin error, puesto que la diferencia con las curvas de piezas con error de testa sin limpiar es menor y así se evitará sobrestimar el error.

- **2. Nº de píxeles con un nivel de gris menor a 50:** como se ha observado en las gráficas del histograma, las piezas con error de testa sin limpiar presentan la mayor cantidad de píxeles de la banda de rodadura con un nivel de gris inferior a 50. Es por ello que se comparará esta distribución de píxeles con un nivel de gris menor a 50, columna a columna, entre las piezas con error de testa sin limpiar y el patrón seleccionado.

Para ello se crean curvas cuyos puntos representan el número de píxeles con un nivel de gris inferior a 50, el acumulado de píxeles con nivel de gris inferior a 50. Estas curvas se nombraran como “curvas ndg50”.

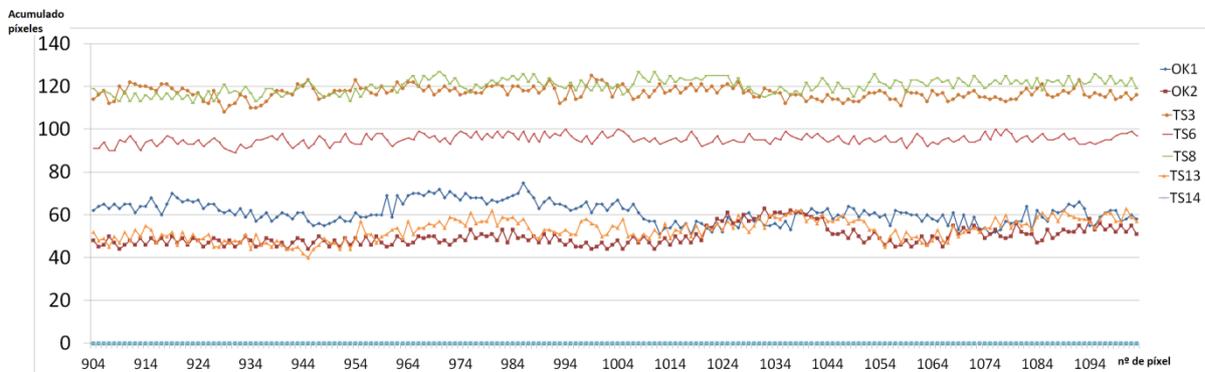


Figura 17. Comparativa de las "curvas ndg50" de las piezas con error de testa sin limpiar (TS3, 6,8,13,14) y de las piezas sin error(OK1, OK2)

En la figura 25 , al igual que se observaba en la comparativa de las curvas medias de nivel de gris, figura 23, la pieza TS13, presenta un comportamiento idéntico al de una pieza sin error, puesto que este se encuentra fuera de la superficie analizada.

Para realizar la comparativa según este descriptor, se crea una curva formada por los valores máximos de las curvas ndg50 de las piezas sin error. Se nombrará a esta curva como "curva de máximos ndg50".

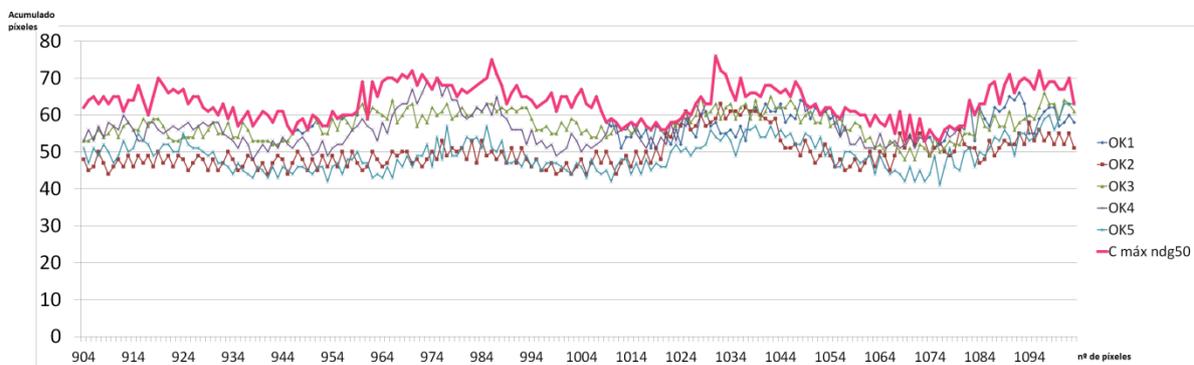


Figura 18. Representación de la "curva de máximos ndg50" formada por los puntos máximos de cada una de las curvas de las piezas sin error. En la imagen destacado en magenta.

Del mismo modo que en el caso anterior, se forma una curva con las piezas sin error la cual sea lo más próxima posible a las piezas con error para así evitar sobreestimaciones.

5.6.2 Descriptores del error de retalón en testa.

En este caso, las piezas con error de retalón, presentan una banda de rodadura con un nivel de gris más alto que las piezas pertenecientes al grupo OK. Además presentan una línea de un brillo mayor al resto de la banda de rodadura, el retalón.

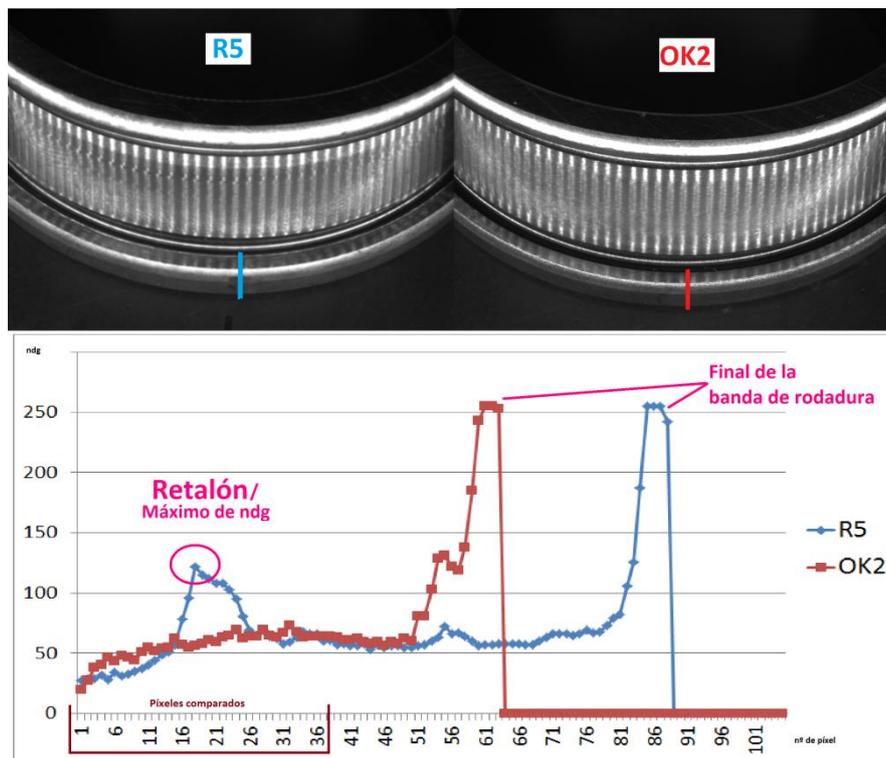


Figura 19. Comparativa pieza con error de retalón (R5), con pieza sin error (OK2). En la imagen se comparan gráficamente los píxeles de la columna central de cada una de las piezas

Así el descriptor que se utilizará es:

- **3. Máximos y posición:** para cada columna, se analizan los 35 primeros píxeles pertenecientes a la banda de rodadura, zona donde se da el error de retalón, como se aprecia en la figura 27. A fin de evitar el final de la banda de rodadura, la cual podría reconocerse como un falso retalón. En cada columna se buscan máximos de nivel de gris, situados en la parte superior de la banda de rodadura. Mediante estos máximos de cada columna se crean lo que se ha



denominado curvas de máximos, una propia de cada pieza, las cuales se evaluarán tanto por su nivel de gris como por la posición de cada punto:

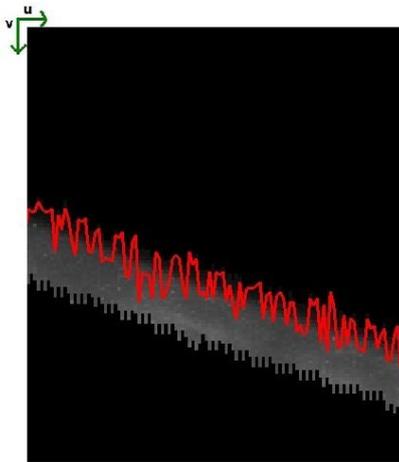


Figura 20. Ejemplo picos en una pieza OK. (OK2)

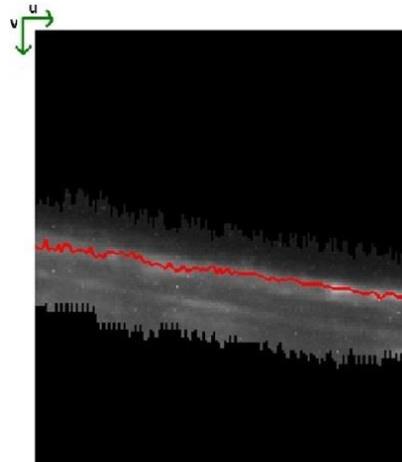


Figura 29. Ejemplo picos en una pieza con retalón. (R5)

Como se puede apreciar en las figuras 28 y 29, una pieza sin retalón presenta máximos dispersos en la primera parte de la banda de rodadura. Mientras que una pieza con retalón concentra estos siguiendo una trayectoria curvilínea definida (diferencias de posición entre un píxel y el siguiente inferior a 4-5 píxeles según la coordenada v).

Así para definir los valores de nivel de gris, para los que se considera un píxel como posible defecto de retalón, se van a comparar las curvas máximas de las piezas de retalón con las de las piezas sin error. Inicialmente vamos a analizar la zona central, pues es la zona en la que disponemos del perfil medido de este error (Anexo I).

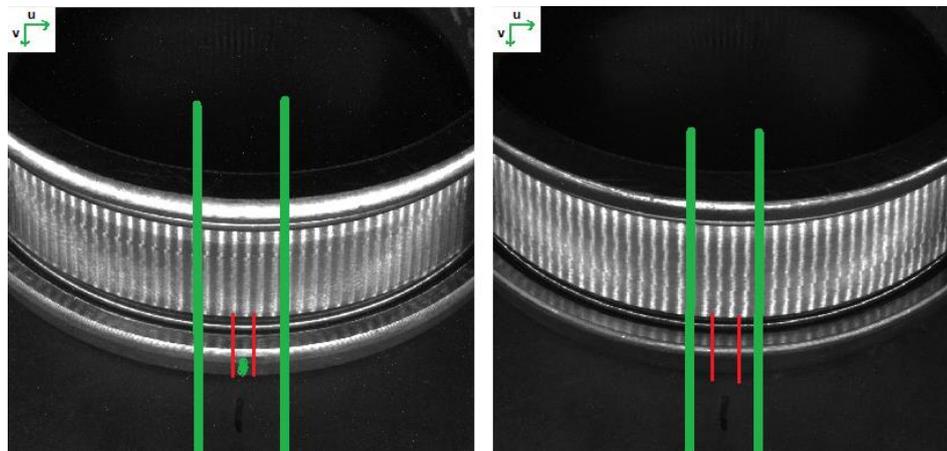


Figura 21. Zona comparada para describir el error de retalón. La imagen de la izquierda se corresponde a una pieza con error de retalón (R5). La imagen de la derecha es una pieza del grupo OK (OK4).

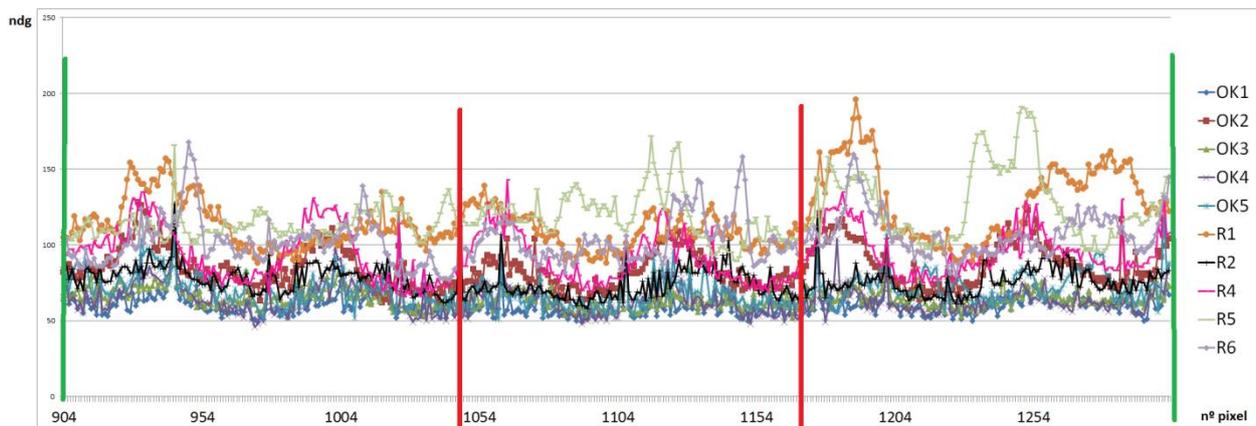


Figura 22. Grafica máximos, de la zona destacada en la Figura 30.

Como se puede observar figuras 30 y 31, hay una tendencia repetitiva de incrementos y decrementos del nivel de gris, los cuales se corresponden con la posición de la iluminación alrededor de la pieza.

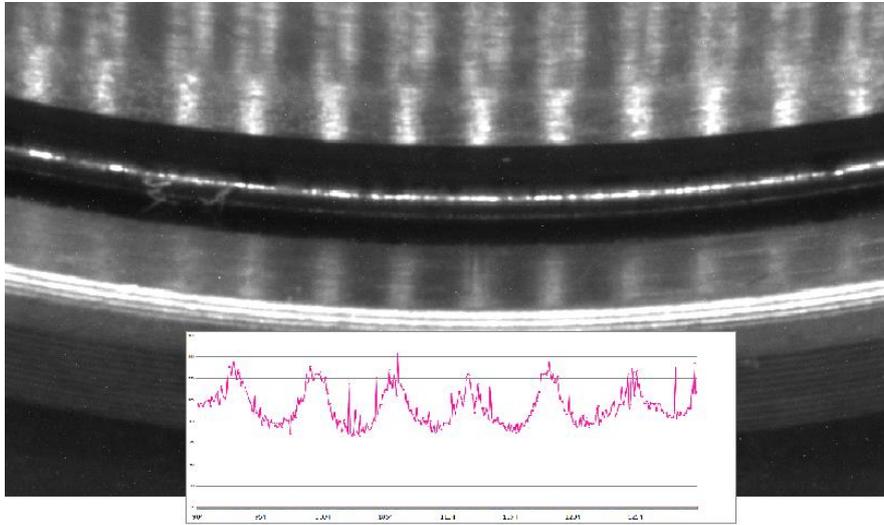


Figura 23. Representación de los máximos relativos en la banda de rodadura y equivalencia con la posición de la iluminación. (Pieza sin error R4).

Como se ha observado de forma experimental, estas diferencias de iluminación hacen resaltar el error de retalón en las zonas “oscuras”, con menor nivel de gris. Será por este motivo que se realizarán las comparativas en estas zonas, entre las piezas sin error y las piezas con error de retalón. Además inicialmente se realizará esta comparación en la zona central (delimitada en rojo en las figuras 30 y 31). Puesto que es ahí donde tenemos las mediciones del error.

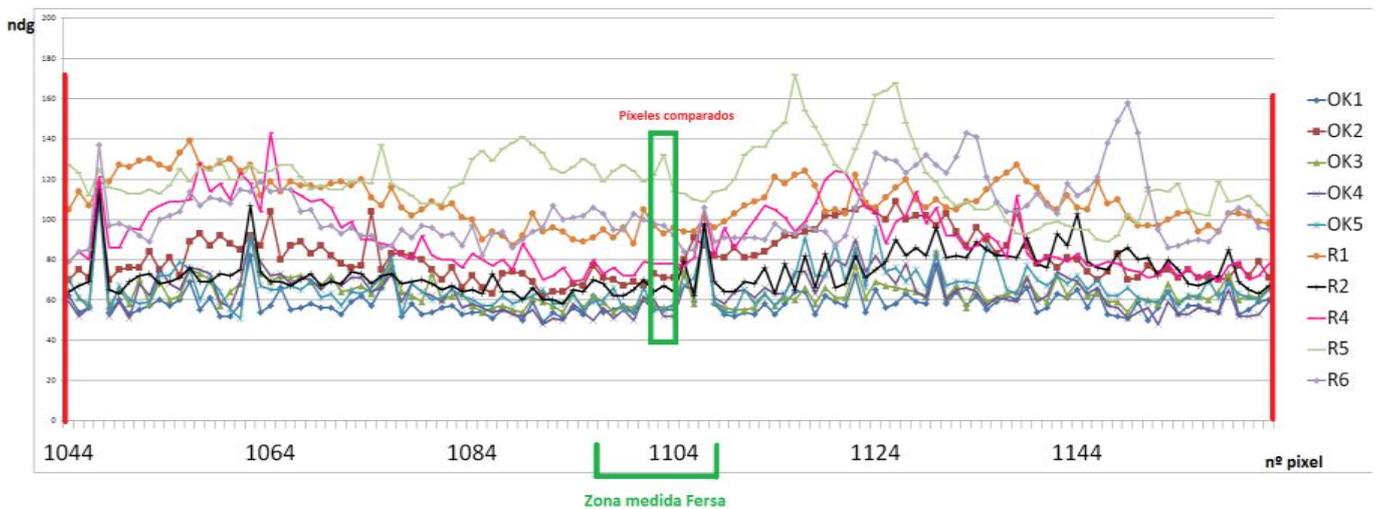


Figura 24. Comparativa curvas máximas entre piezas con error de retalón y piezas sin error.



En la figura anterior se grafican las curvas máximas de dos zonas iluminadas y la zona “oscura” central. Incluyendo, resaltado en verde de forma aproximada, la zona donde se han realizado las mediciones para las piezas con error de retalón.

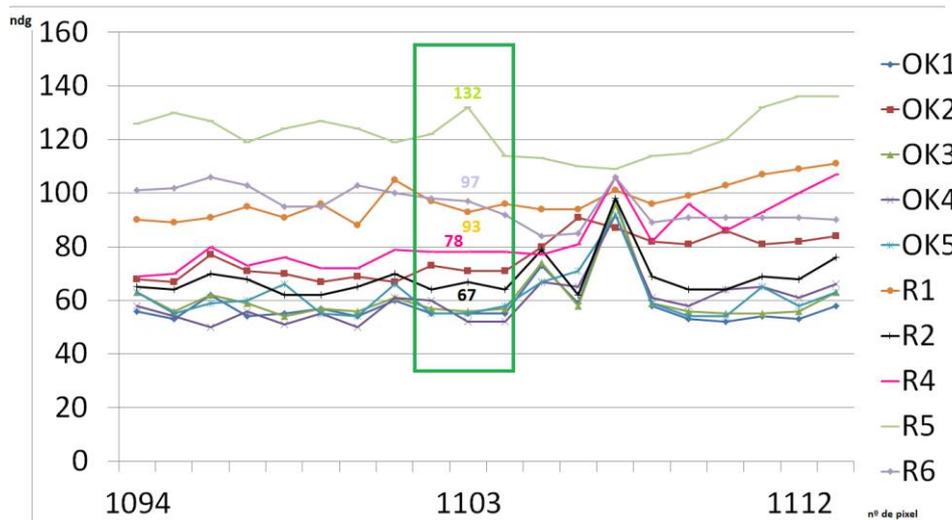


Figura 25. Comparativa en detalle de los máximos de nivel de gris en la banda de rodadura. Destacando los valores de las piezas con error de retalón.

En la figura 34, se puede apreciar que existe correlación entre el nivel de gris y el tamaño del retalón medido por Fersa, para todas las piezas salvo para la pieza designada como R2. La cual presenta unos valores en cuanto a máximos en la zona marcada de medida, propios de una pieza sin error. Tras ser comprobada de manera visual no se puede asegurar que en la zona medida exista un retalón por lo que se procede a retirarla de la comparativa y se solicitará una nueva medición del error en la pieza.

Los valores obtenidos en la zona de medida para cada pieza son:



Pieza	nivel de gris	Medida Fersa	Gráfica
R1	93	2 μ m	
R4	78	Ok	
R5	132	50 μ m	
R6	97	12 μ m	

Tabla 3. Correlación entre el nivel de gris de los máximos frente a medida del error de retalón, de las piezas del grupo de retalón.

Así a través de estos datos comprobamos que en la zona central en la que se han medido los errores, existe correlación entre el máximo de nivel de gris encontrado y el error medido.

En el siguiente apartado se analizará con profundidad mediante diferentes consideraciones los datos disponibles de la banda de rodadura. Para ello se utilizará como comparativa una curva formada por los máximos de las curvas pertenecientes a las piezas sin error. La cual se nombrará como “curva de máximos OK”.

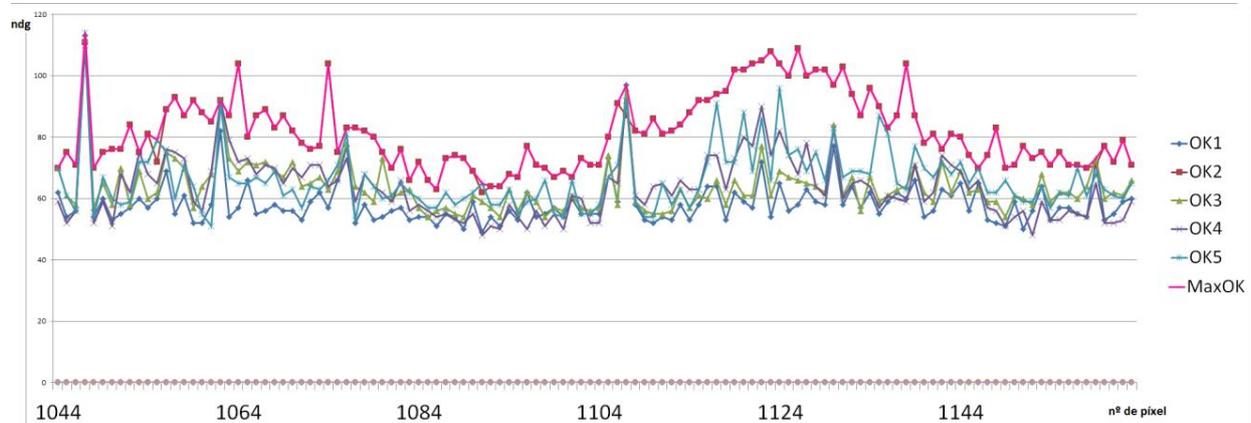


Figura 26. Gráfica de la curva de máximos de las piezas OK. “Curva de máximos OK”. Representada en la imagen en magenta

Como se observa en la figura 35, la curva que vamos a utilizar para comparar las piezas de retalón es la representada en magenta, formada por los puntos máximos de todas las curvas de las piezas sin error.

5.7 Análisis de errores.

En este punto se analizarán los datos extraídos de las imágenes con el fin de comprobar la presencia o no de error, y en caso de exista, designar el tipo. Para ello se comparan los datos de cada una de las piezas con los de la “pieza patrón”.

El análisis se va a limitar a 1608 columnas, con el fin de evitar las zonas extremas de las imágenes, donde hay una peor iluminación y peor perspectiva se distorsionan las dimensiones. Estas 1608 columnas se corresponden con un 18,2% de la superficie total del rodamiento.

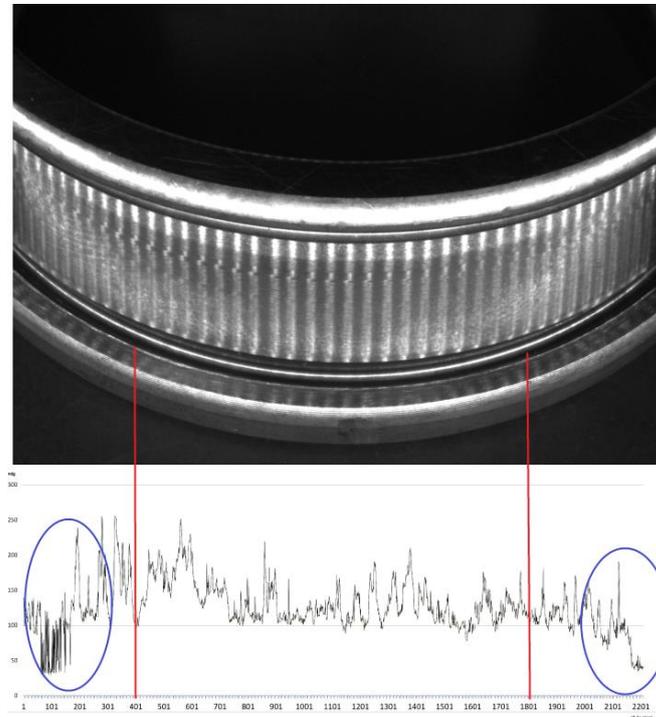


Figura 27. Zona de análisis. En rojo delimitada la zona en la que se van a realizar los siguientes análisis. En azul el "ruido" que se pretende evitar.

5.7.1 Análisis de error de testa sin limpiar.

Como se ha definido con anterioridad, se van a comparar los datos de cada una de las piezas con error de testa sin limpiar, con los del patrón elegido. Los descriptores empleados serán:

- 1. Valor medio del nivel de gris para cada columna.
- 2. Nº de píxeles con un nivel de gris menor a 50, para cada columna.

Se analizan los descriptores columna a columna debido a que el error puede darse por zonas, con lo que un análisis global podría falsear los resultados.

Así mediante un análisis columna a columna para los píxeles situados en la banda de rodadura, previamente aislada, se obtendrán los siguientes resultados:



1. Valor medio del nivel de gris para cada columna:

Como se indica en el apartado 5.6.1, en el análisis de este primer descriptor se van a comparar las curvas formadas por la media de nivel de gris de cada columna de las piezas con error de testa, con la curva de los mínimos de nivel de gris que se ha configurado a partir de las piezas sin error.

. De aplicar este descriptor se obtiene lo siguiente:

Pieza	%Error de la zona analizada analizada	% Error sobre el total de la pieza	% Error medido sobre el total de la pieza
TS3	17,10	3,11	<10
Ts4	52,92	9,64	<10
TS6	89,30	16,26	100,00
TS8	86,75	15,80	>25
TS10	61,19	11,14	>25
TS11	88,18	16,06	<25
TS13	0,00	0,00	25,00
TS14	62,56	11,39	>25

Tabla 4. En esta tabla se presenta el resultado de comparar las curvas de la media de nivel de gris de las piezas con error de testa sobre 1608 columnas de la imagen, lo que equivale a un 18,2% del total de la pieza aproximadamente

En la tabla anterior se observa, como habíamos comentado en el apartado 5.6.1, que la pieza TS13 presenta un comportamiento como pieza sin error de testa sin limpiar, puesto que el error medido no se encuentra en la zona analizada.

Respecto al resto de piezas se observa correlación entre los datos obtenidos y las mediciones previas. Por ejemplo TS8 con un 100% en nuestra zona comprada arroja un valor cercano al 90%, lo que indica que el error se encuentra prácticamente en su totalidad en la zona que se ha analizado (1608 columna, 18,2% de la superficie total). Esto mismo sucede con TS4, medida con un error <10% el cual se presenta por completo dentro de la zona analizada:

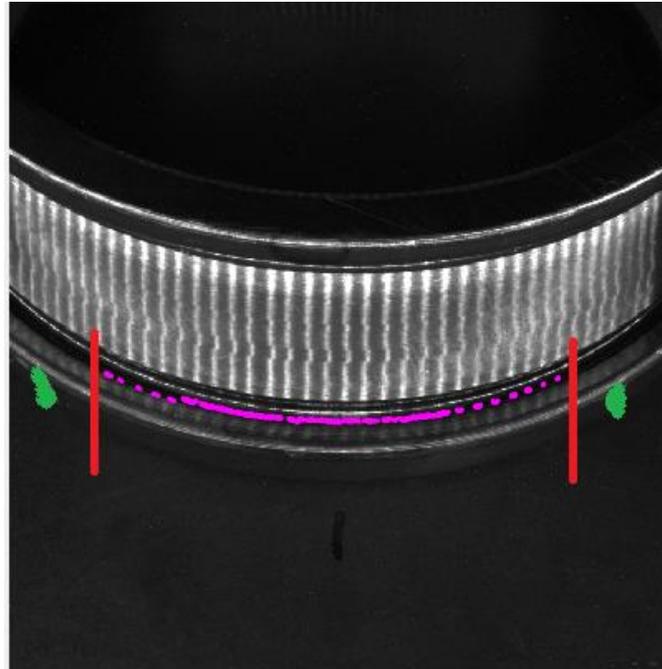


Figura 28. Representación sobre imagen de las columnas con error de testa sin limpiar. Delimitada en rojo la zona analizada, 1608 columnas. En verde la zona medida en la que se da el error. Imagen correspondiente a la pieza TS4

2. Nº de píxeles con un nivel de gris menor a 50, para cada columna:

Para este segundo descriptor, se va a comparar el acumulado de píxeles con un nivel de gris menor a 50, columna por columna. Como se ha indicado con anterioridad se selecciona este nivel de 50 píxeles debido a lo observado en las gráficas del histograma (véase Anexo V). Para ello se emplearán las curvas ndg50 de las piezas con error de testa frente a la “curva de máximos ndg50”. De esta comparativa se obtiene:



Pieza	%Error de la zona analizada	% Error sobre el total de la pieza	% Error medido sobre el total de la pieza
TS3	26,37	4,80	<10
Ts4	67,79	12,34	<10
TS6	84,58	15,40	100,00
TS8	100,00	18,21	>25
TS10	67,66	12,32	>25
TS11	99,25	18,07	<25
TS13	0,00	0,00	25,00
TS14	77,55	14,12	>25

Tabla 2. En esta tabla se presenta el resultado de comparar las curvas del acumulado de píxeles con ndg menos a 50 de las piezas con error de testa con la "curva de máximos ndg50". Sobre 1608 columnas de la imagen, lo que equivale a un 18,2% del total de la pieza aproximadamente

En la tabla se observa, una vez más, que la pieza TS13 no presenta error de testa sin limpiar, en la zona analizada.

TS3 presenta un porcentaje acorde con el porcentaje de error medido previamente. Por su parte TS4 se encuentra ligeramente sobreestimado, pues el error debería ser inferior a 10%

Es de apreciar que este descriptor es menos sensible respecto a las características de la pieza TS6, la cual presenta un error del 15,4% sobre el total de la pieza, cuando está catalogada con un error del 100%, por lo que debería ser cercano al 18,2%. Por su parte TS10 también ha sido subestimado, en esta ocasión debido a que la zona analizada es menor que la zona que presenta error

TS8 y TS11 arrojan los dos porcentajes más altos de esta comparativa, ello se corresponde a que presentan su error en la zona analizada.

Aún con estas pequeñas diferencias, el descriptor 2 presenta unos resultados claros, pues distingue una pieza sin error, en la zona analizada, como es TS13 respecto a una con un pequeño porcentaje de error como TS3.

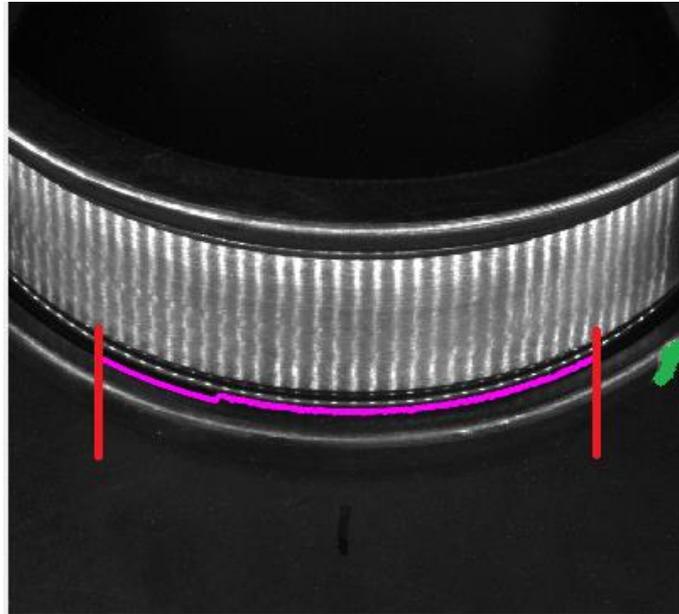


Figura 29. Representación de la zona con error de testa sin limpiar. Delimitada en rojo se encuentra la zona analizada, 1608 comunas. En verde la marca hasta donde se ha comprobado el error. Imagen correspondiente a la pieza TS8

5.7.2 Análisis de error de retalón en testa.

Como se ha indicado en el apartado 5.6.2 para este análisis se va a utilizar a modo de patrón la “curva de máximos OK” cuyos datos se comparan con los de las curvas de cada una de las piezas con error de retalón.

3º. Máximos y posición (descriptor 3).

La metodología es la explicada con anterioridad en el apartado 5.6.2. Primero se buscan los máximos en la parte superior de la banda de rodadura, para definir las curvas de cada pieza. Después de comprobar los perfiles y la posición del retalón se decide buscar en los primeros 35 píxeles de la banda de rodadura para cada columna.

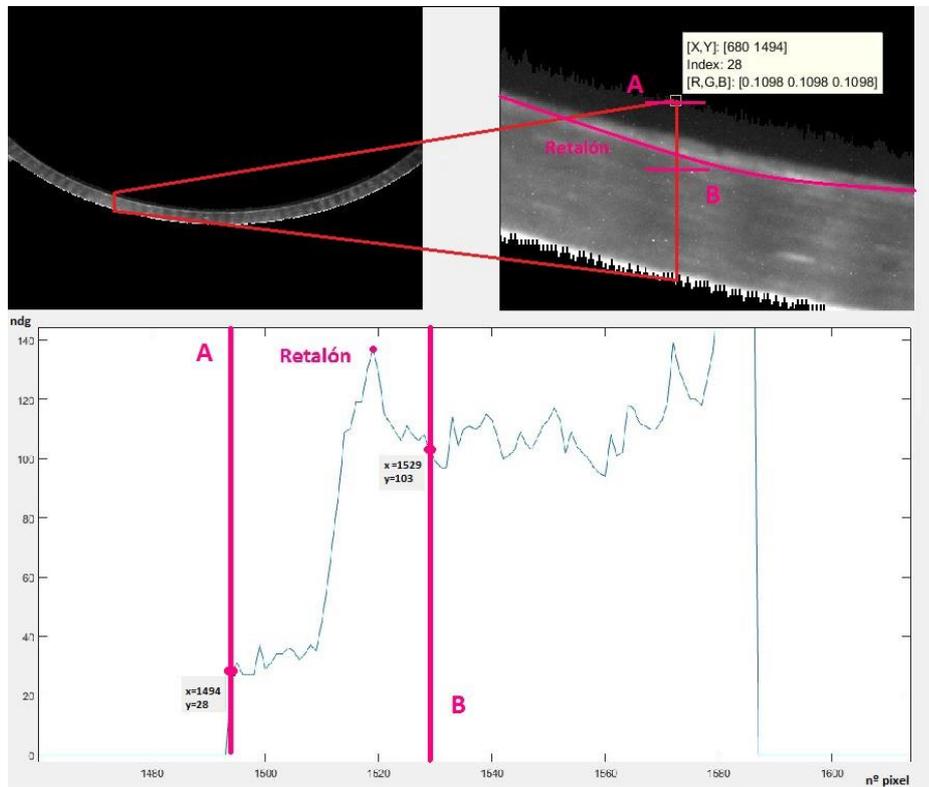


Figura 30. Zona de análisis de máximos de nivel de gris. Las franjas A-B se corresponden con los primeros 35 píxeles activos de la banda de rodadura, zona donde se sitúa el retalón.

Como se observa en la figura anterior, se ha decidido comprobar la presencia de máximos en estos primeros 35 píxeles debido a que una vez aislada la banda de rodadura, en esta existen dos zonas con un nivel de gris alto. Una al principio, que se corresponde con un posible retalón, y otra al final de la banda que se corresponde con el borde final de la banda. Así comprobando la presencia de máximos en los primeros 35 píxeles se podrá conocer si una pieza presenta o no error de retalón.

Una vez se dispone de la curva de máximos, se compara con el “patrón” configurado, según lo indicado en el apartado 5.6.2, la “curva de máximos OK”, en cada columna

Inicialmente para conocer la diferencia (“offset”), que separa un píxel de una pieza del sin error, con una pieza con error de retalón. Se va a comparar la curva de máximos de la pieza R4, comprobada como pieza OK, con la “curva de máximos OK”.

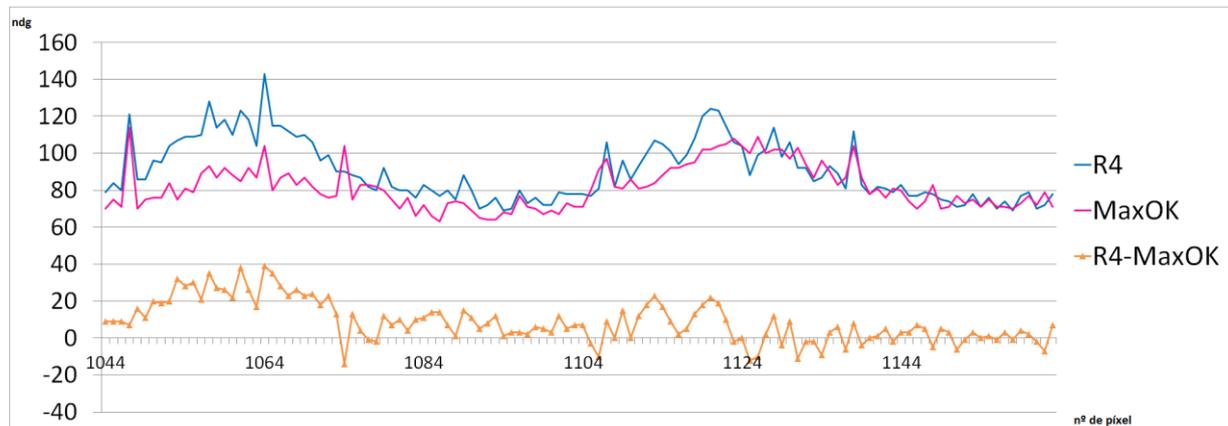


Figura 31. Comparativa pieza R4 con el "patrón" configurado mediante los máximos de las piezas sin error.

Como se observa en la figura 40, el comportamiento de la pieza R4 es el de una pieza OK. Así mediante la diferencia de nivel de gris, graficada en naranja, se va a configurar un "offset" mediante el cual poder valorar el resto de piezas con error de retalón. El "offset" utilizado resulta de calcular la media de los valores positivos, a los que se les añade un margen.

Para las siguientes comparativas se va a utilizar un "offset" de 24 puntos de nivel de gris, formado aproximadamente por la media de las diferencias positivas y un margen de 10 puntos de nivel de gris.

Así realizando el resto de comparativas, para 1608 columnas como se indica al inicio de este apartado, se han obtenido los siguientes resultados:

Pieza	%Error de la zona analizada	% Error sobre el total de la pieza	Error medido μm
R1	60,01	10,93	2
R2	1,74	0,32	10
R4	10,14	1,85	ok
R5	73,76	13,43	50
R6	35,51	6,47	10

Tabla 3. Resultados de comparar directamente las curvas máximas de nivel de gris de las piezas con retalón con la "curva de máximos OK". En la tabla se presenta el % de columnas con error de la zona analizada en imagen, 1608 columnas, un 18,2% de la pieza aproximadamente. Y después se da su equivalencia respecto a la superficie total de la pieza.

Tras este análisis directo se observa una clara diferencia entre las piezas con retalón y R4, medida como pieza sin error. R2, la cual como se ha comentado en 5.6.2 tiene un comportamiento propio de una pieza OK, y queda confirmado con este análisis.



Después de este primer análisis directo, se va a proceder a repetir la comparación entre la “curva de máximos OK”, y las curvas máximas de las piezas con retalón en las zonas “oscuras” de la pieza, dado que en las zonas con alto nivel de gris se pierde capacidad para identificar el reflejo del retalón. Para ello se filtrarán, mediante un filtro gaussiano, las curvas máximas de las piezas con retalón y se comprobarán los puntos que se encuentren por debajo del filtro.

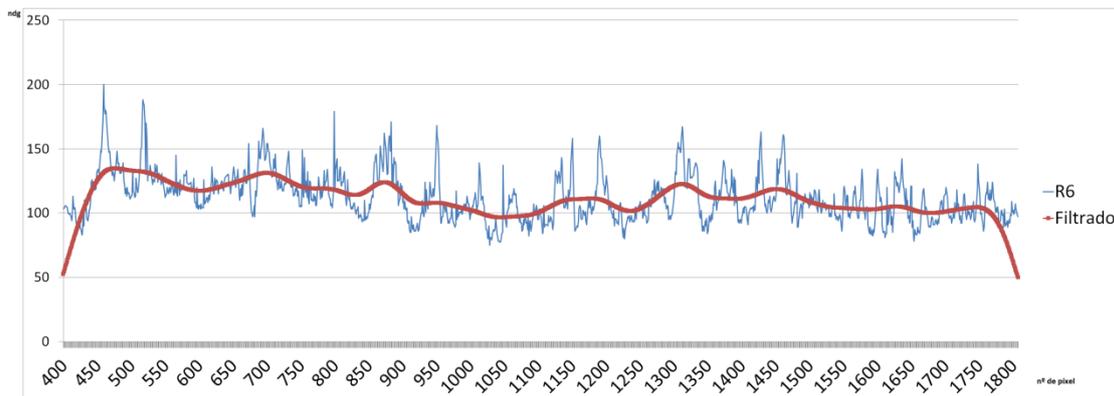


Figura 32. Filtrado de la curva formada por los máximos de nivel de gris de la pieza R6.

En la figura 41 se observa el filtrado de la curva de máximos pertenecientes a la pieza R6, mediante este filtro se establecen las zonas donde evaluar el retalón.

Así a continuación se comparan las curvas máximas de las piezas con retalón con la “curva de máximos OK”, pero esta vez solo en las columnas cuyos máximos se encuentren por debajo del nivel de gris establecido por el filtro empleado, es decir en las zonas “oscuras”.

Los resultados que se han obtenido son:

Pieza	%Error de la zona analizada	nº columnas zona "oscura"	nr sobre el total de la Error medido μm
R1	45,24	871	4,46
R2	0,00	884	0,00
R4	3,200	872	0,32
R5	58,57	893	5,92
R6	17,900	866	1,76

Tabla 4. Resultados de comparar únicamente los píxeles pertenecientes a las zonas oscuras. En esta tabla se presenta el porcentaje de error correspondiente al número de columnas analizado (columnas zona “oscura”), y su correspondencia respecto al total de la pieza.

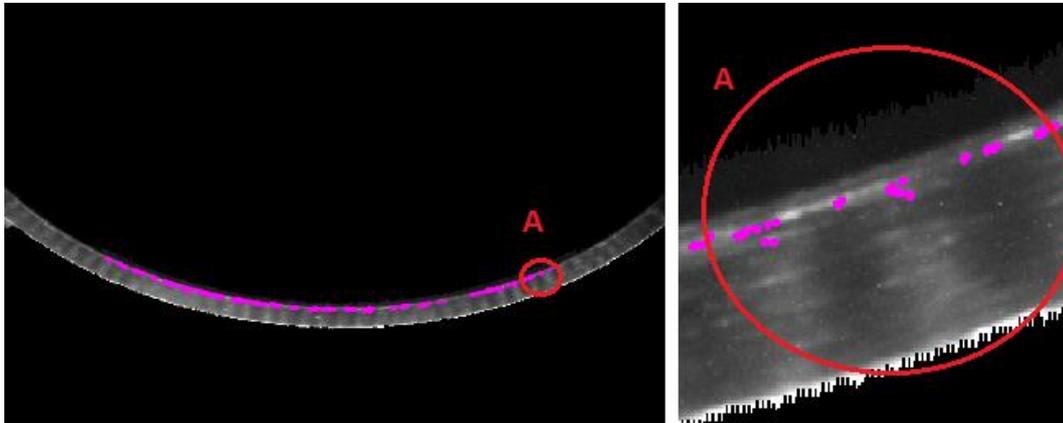


Figura 33. Representación sobre imagen del error obtenido. Imagen correspondiente a la pieza R5.

En la figura 42 se representa el error de retalón detectado, en las zonas “oscuras”, como comentábamos al inicio del apartado 5.6.2, este sigue una trayectoria curvilínea definida, con pequeñas variaciones de posición entre píxeles consecutivos.



6. Módulos de programación.

En este punto se presenta el algoritmo de análisis de imagen de forma esquemática mediante módulos (El código completo de Matlab® se encuentra en el Anexo VI):

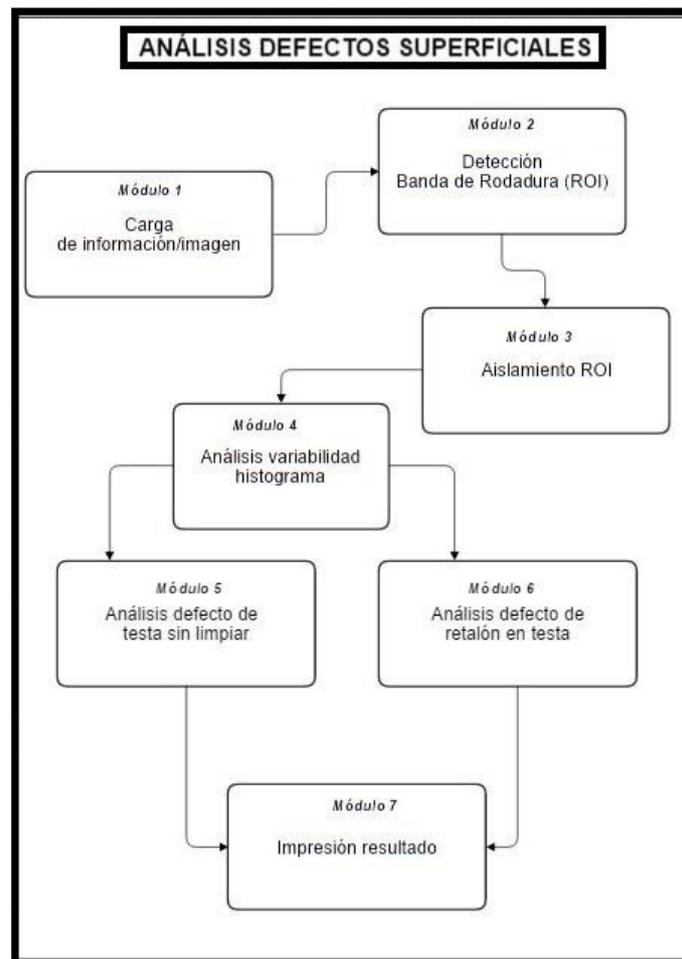


Figura 34. Esquema general de los módulos de programación

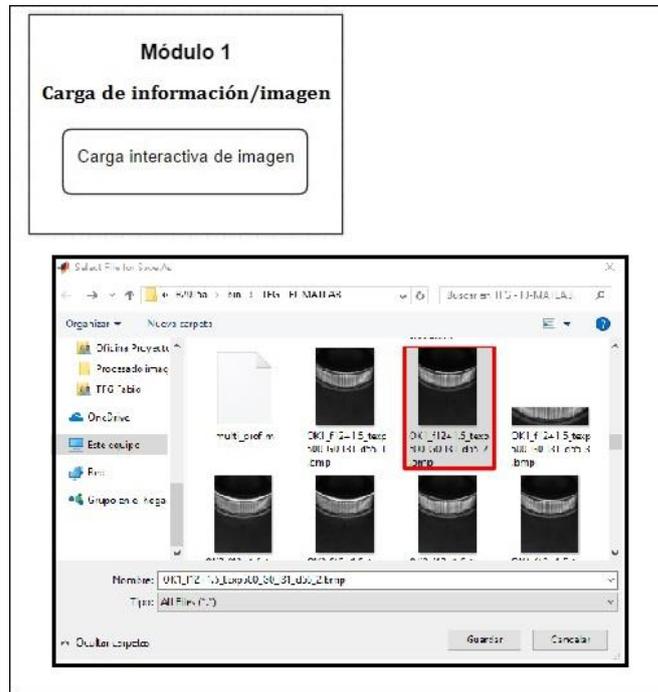


Figura 35. Módulo 1. Carga de imagen

En este primer módulo se carga la imagen a analizar mediante un comando predefinido en Matlab® (“`uigetfile({'*.bmp'})`”), el cual se configura de manera que únicamente ofrezca archivos con la misma extensión que las capturas de imagen realizadas.

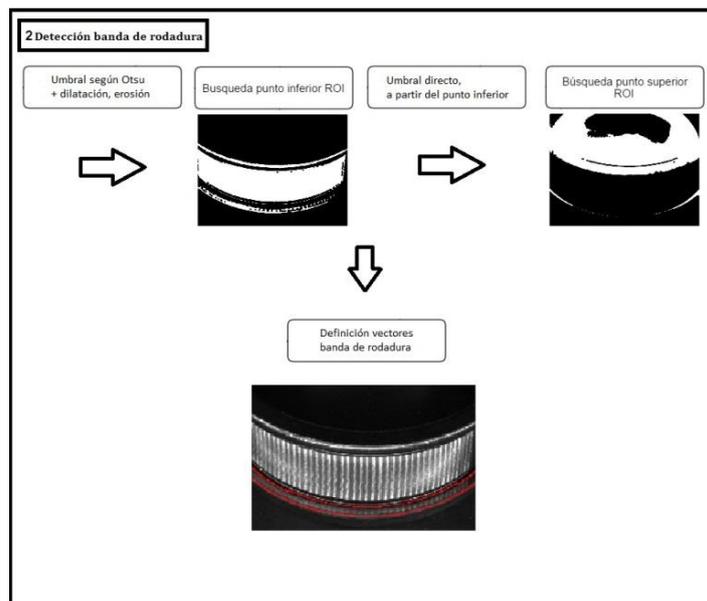


Figura 36. Módulo 2. Detección de la banda de rodadura

En este segundo módulo, mediante dos procesos de filtrado (umbral, dilatación, erosión de píxeles), se buscan un par de puntos en la primera columna. Y a partir de ellos mediante un bucle, se repite para todas las columnas de la imagen. Con ellos se consigue aislar la banda de rodadura (explicado en profundidad en 5.1-5.2).

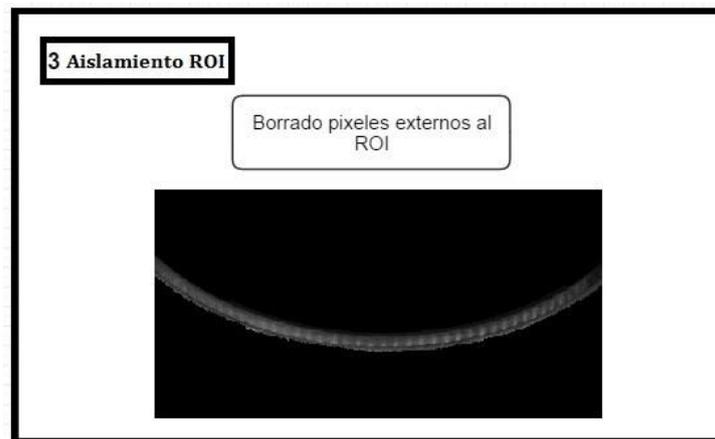


Figura 37. Módulo 3. Aislamiento del ROI

En este tercer módulo se tiene por objetivo eliminar toda la información ajena a la Región de Interés (ROI), es por ello que se pasan a un nivel de gris "0", todos los píxeles que se encuentran fuera de la misma.

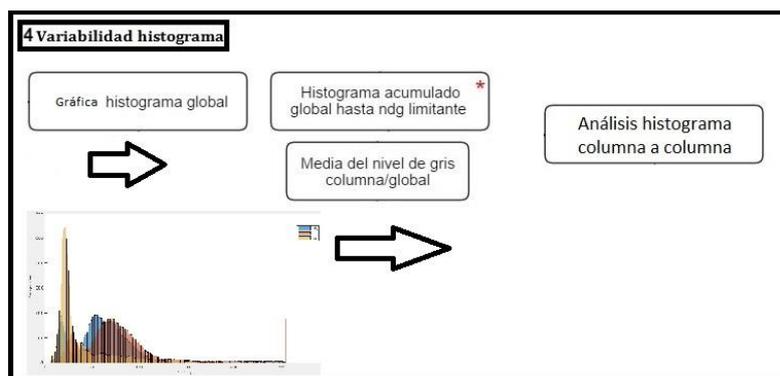


Figura 38. Módulo 4. Variabilidad histograma

En este apartado, se grafica el histograma de la banda de rodadura el cual proporciona de forma visual información útil de la distribución de los niveles de gris en la imagen.

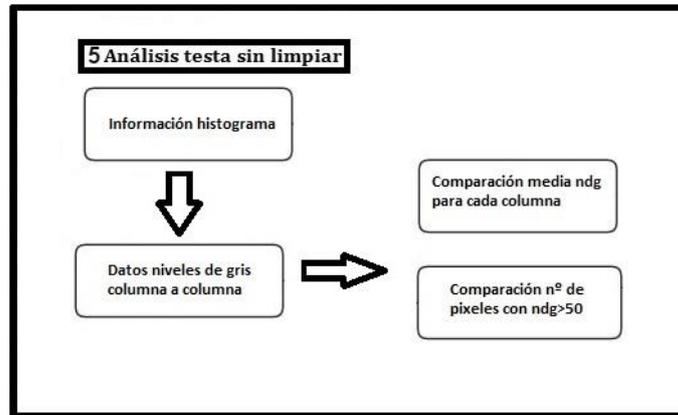


Figura 39. Módulo 5. Análisis de testa sin limpiar

Tras extraer los datos del histograma los comparamos columna a columna con los de una pieza patrón (del grupo OK), frente a dos descriptores:

- La media de nivel de gris.
- El nº de píxeles con un nivel de gris < 50 .

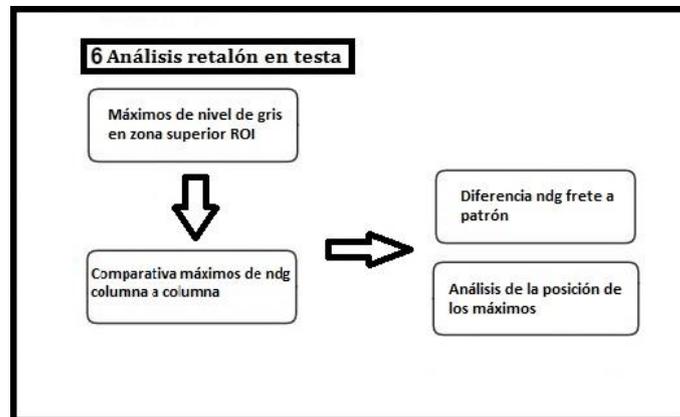


Figura 40. Módulo 6. Análisis de retalón en testa

En este sexto módulo se analizan los máximos de nivel de gris de cada columna, limitando este análisis a los 35 primeros píxeles dentro de la banda de rodadura. Estos los compararemos con los del patrón configurado seleccionado, la “curva de máximos OK”.

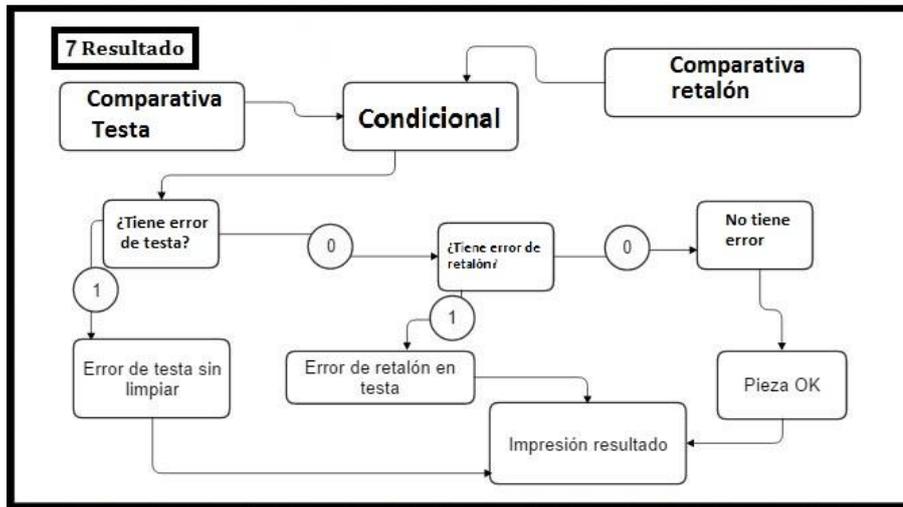


Figura 41. Módulo 7. Resultado

Una vez realizado el análisis completo de la captura, se presenta el resultado en base a 3 condicionales. Que podrán ser positivas 1, o negativas 0. Y con ello catalogar la pieza.



7. Conclusión y líneas futuras.

Una vez analizada la muestra completa llegamos a las siguientes conclusiones:

Mediante las estrategias de análisis y los algoritmos propuestos se consigue aislar la banda de rodadura, área de interés de la imagen, diferenciándola del resto de elementos de la imagen. Esto se consigue de forma satisfactoria para toda la muestra de una forma automatizada. Que no depende del técnico que realiza el análisis.

Se consigue extraer información característica de las piezas sin error superficial, para posteriormente poder configurar diferentes patrones dependiendo del tipo de error que se analice.

Se consigue identificar y diferenciar los dos tipos de errores propuestos, tanto en imagen como como de forma automática. Y se cumple uno de los objetivos de Fersa Bearings, un tiempo de análisis inferior a un ciclo de fabricación de 6 segundos. En nuestro caso inferior a 4 segundos, con un equipo de trabajo no profesional.

En el caso del error de testa sin limpiar los descriptores son firmes siempre y cuando el error este bien posicionado. Además se aprecia robustez en el método al detectar que en la zona analizada no existe error, como es el caso de la pieza TS13.

En el caso de retalón en testa, al comparar la zona en que han sido obtenidas las magnitudes del retalón, apreciamos que existe correlación entre la magnitud del retalón y el nivel de gris que presenta el píxel correspondiente. Además se consigue distinguir con claridad una zona con retalón de una zona sin error, como hemos vistos con la pieza R4.



7.1 Líneas futuras.

En líneas futuras las mejoras vendrán con el desarrollo lógico del sistema de posicionamiento y análisis. Implementado un interfaz sencillo para su utilización incorporando cámaras que consigan cubrir el total de la superficie, o una superficie que sea significativa.

Será conveniente realizar más pruebas para obtener la correlación existente entre el tamaño del retalón y el nivel de gris que presenta en imagen.

A modo de evitar falsos positivos, sería conveniente volver medir los errores en diferentes zonas de las piezas y con los resultados obtenidos calibrar la precisión de los algoritmos. Se solicita volver a medir el error de retalón de la pieza R2, en la cual se ha medido un error de 10 μm , y presenta un comportamiento idéntico al de una pieza sin error.

Será de interés el analizar una muestra mayor y diferentes tamaños de rodamiento a fin de comprobar la robustez y validez del algoritmo propuesto en distintas condiciones.



BIBLIOGRAFIA

***Estrategias de análisis de imagen para la detección
de defectos en la superficie de rodamientos
utilizando visión industrial***



1. Rafael C. González, Rafael C.; Woods, Richard E. (2008)– “*Digital Image Processing (third edition)*”
2. Sánchez R., Francisco Javier; Miranda T., J.R., y González T.,J.I.(2010). Medición y análisis de las variaciones de modelos físico empleando imágenes.
3. Comas, Diego S., Meschino, Gustavo J.(2014). Segmentación de imágenes mediante reconocimiento de patrones
4. Lumbreras, Felipe. “Visión per computador, procesat d’imatge”. Universitat Autònoma de Barcelona. <http://www.cvc.uab.es/shared/teach/a102784/>
5. FERSA BEARINGS. General Catalog:
<http://www.fersa.com/uploads/files/General%20Catalog%202013.pdf>
6. Matlab:
 - Documentación. <https://es.mathworks.com/help/index.html>
 - Ejemplos. <https://es.mathworks.com/examples/>
 - Tutoriales.<https://es.mathworks.com/support/learn-with-matlab-tutorials.html>
7. Alegre E., Sánchez L., Fernández-Díaz R.A. Procesamiento Digital de Imágenes. Fundamentos y Prácticas con Matlab.
<https://www.researchgate.net/publication/229828279>
8. Research Gate website:
https://www.researchgate.net/figure/259538170_fig5_Figure-2-Lesion-TOADS-segmentation-results-First-row-shows-the-brain-extracted



ANEXOS

***Estrategias de análisis de imagen para la detección
de defectos en la superficie de rodamientos
utilizando visión industrial***



ANEXO I. Documentación Errores.

	PIEZAS PARA VISIÓN ARTIFICIAL RETALÓN EN TESTA Y TESTA SIN LIMPIAR	LÍNEA: Z2 (material de JX)
		FECHA: 25/05/16
		PÁGINA: 1 de 4
		RESPONSABLE: calidad

MUESTRA DE PIEZAS CON TESTA SIN LIMPIAR

Nº pieza	% de afección	foto
1	<10%	
2	≈ 10%	
3	<10%	
4	<10%	
5	≈ 25%	
6	100%	
7	<10%	
8	>25%	

Figura 42. Documentación Fersa 1 testa 1



	PIEZAS PARA VISIÓN ARTIFICIAL RETALÓN EN TESTA Y TESTA SIN LIMPIAR	LÍNEA: Z2 (material de JX)
		FECHA: 25/05/16
		PÁGINA: 2 de 4
		RESPONSABLE: calidad

MUESTRA DE PIEZAS CON TESTA SIN LIMPIAR

Nº pieza	% de afección	foto
10	<25%	
11	<25%	
12	≈ 25%	
13	≈ 25%	
14	<25%	

Figura 43. Documentación Fersa testa 2



	PIEZAS PARA VISIÓN ARTIFICIAL RETALÓN EN TESTA Y TESTA SIN LIMPIAR	LÍNEA: Z2 (material de JX)
		FECHA: 25/05/16
		PÁGINA: 3 de 4
		RESPONSABLE: calidad

MUESTRA DE PIEZAS CON RETALÓN EN TESTA

Nº pieza	Retalón en μm	Gráfica
1	2 μm	
2	10 μm	
3	2 μm	
4	ok	

Figura 44. Documentación Fersa retalón 1



	PIEZAS PARA VISIÓN ARTIFICIAL RETALÓN EN TESTA Y TESTA SIN LIMPIAR	LÍNEA: Z2 (material de JX)
		FECHA: 25/05/16
		PÁGINA: 4 de 4
		RESPONSABLE: calidad

MUESTRA DE PIEZAS CON RETALÓN EN TESTA

Nº pieza	Retalón en μm	Gráfica
5	50 μm	
6	10 μm	
7	8 μm	
8	5 μm	
9	12 μm	

Figura 45. Documentación Fersa retalón 2



ANEXO II. Material empleado.

Como se ha comentado en el apartado 3.1, se ha realizado un montaje provisional para la realización del presente trabajo. En este punto se va a presentar el citado material mediante imágenes:

Cámara Pixelink PL-A781:



Figura 46. Cámara Pixelink empleada.

Brazo robótico KUKA: Empleado únicamente como soporte móvil.



Figura 47. Brazo soporte cámara



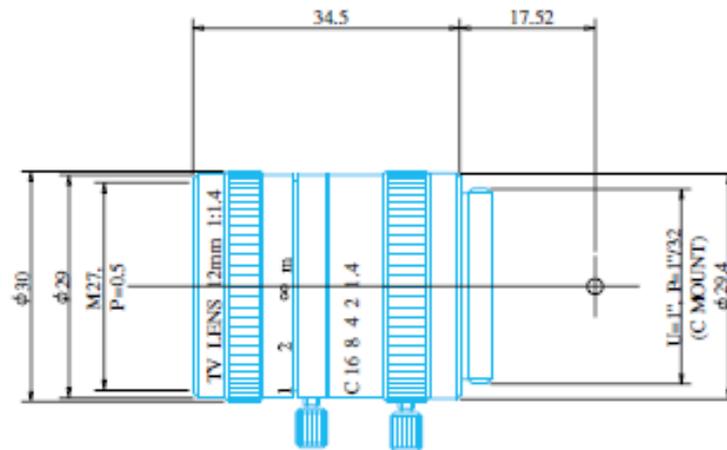
Objetivo: de la compañía japonesa GOYO Optical Inc.

GOYO OPTICAL INC.

Industrial Lens

Manual Lenses

Item No. GM21214MCN



ITEM NO.		GM21214MCN
Focal Length		12.0 (mm)
Iris Range		F1.4 - Close
Angle of View (H x V x D)	1/2"	28.58' x 21.56' x 35.49'
	2/3"	
MOD		0.3 (m)
Filter Thread		M=27.0 , P=0.5
Dimention (D x L)		φ30 x 34.5 (mm)
Weight		56 (g)

GOYO OPTICAL Inc.

Japanese Office

3-8-31 HAMAZAKI,
ASAKA,
SAITAMA 351-0033,
JAPAN,
TEL:048-474-2235
FAX:048-474-7373
E-MAIL:info@goyooptical.com

German Office

KURHAUSSTR,3
ROOM N°19
D-55543 BAD KREUZNACH
GERMANY
TEL:0671-4822255
FAX:0671-43603
E-MAIL:info@goyooptical.com

Figura 48. Objetivo GOYO Optical



Iluminación: mediante una tira de leds NEXIA y sus respectivos driver de conexión



Figura 49. Material de iluminación

Muestras: 21 piezas de idénticas características que presentan o no error superficial.



Figura 50. Ejemplos de la muestra facilitados por Fersa Bearings



Pieza de registro de posición: Para poder asegurar un posicionamiento reproducible a la hora de situar las piezas para tomar imágenes.

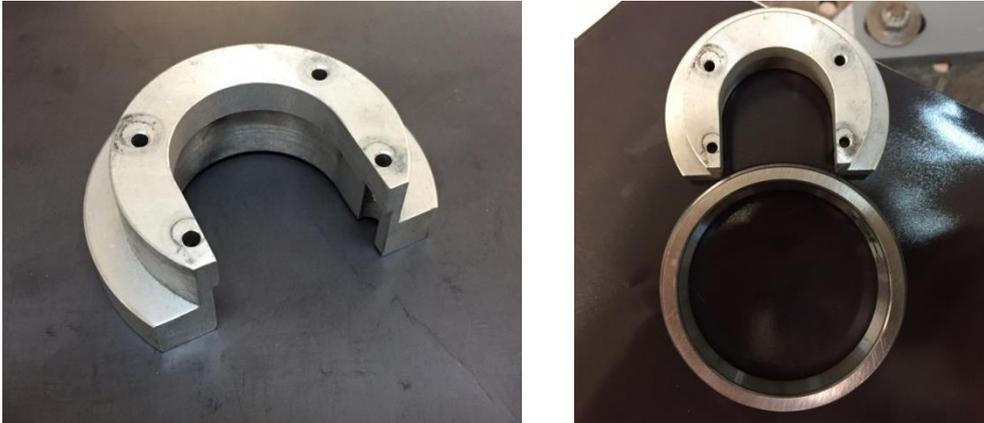


Figura 51. Pieza "u" utilizada como doble registro de la posición

Esa pieza es fijada mediante una mordaza a la bancada de trabajo. Además todas las imágenes se tomaron en una misma sesión, para asegurar las mismas condiciones y que nadie ajeno al trabajo manipule la posición del registro.

Montaje completo: Conjunto montado para la captura de las imágenes.



Figura 52. Montaje completo en el momento de la captura



ANEXO III. Capturas de Imagen.

Piezas sin error superficial (OK):

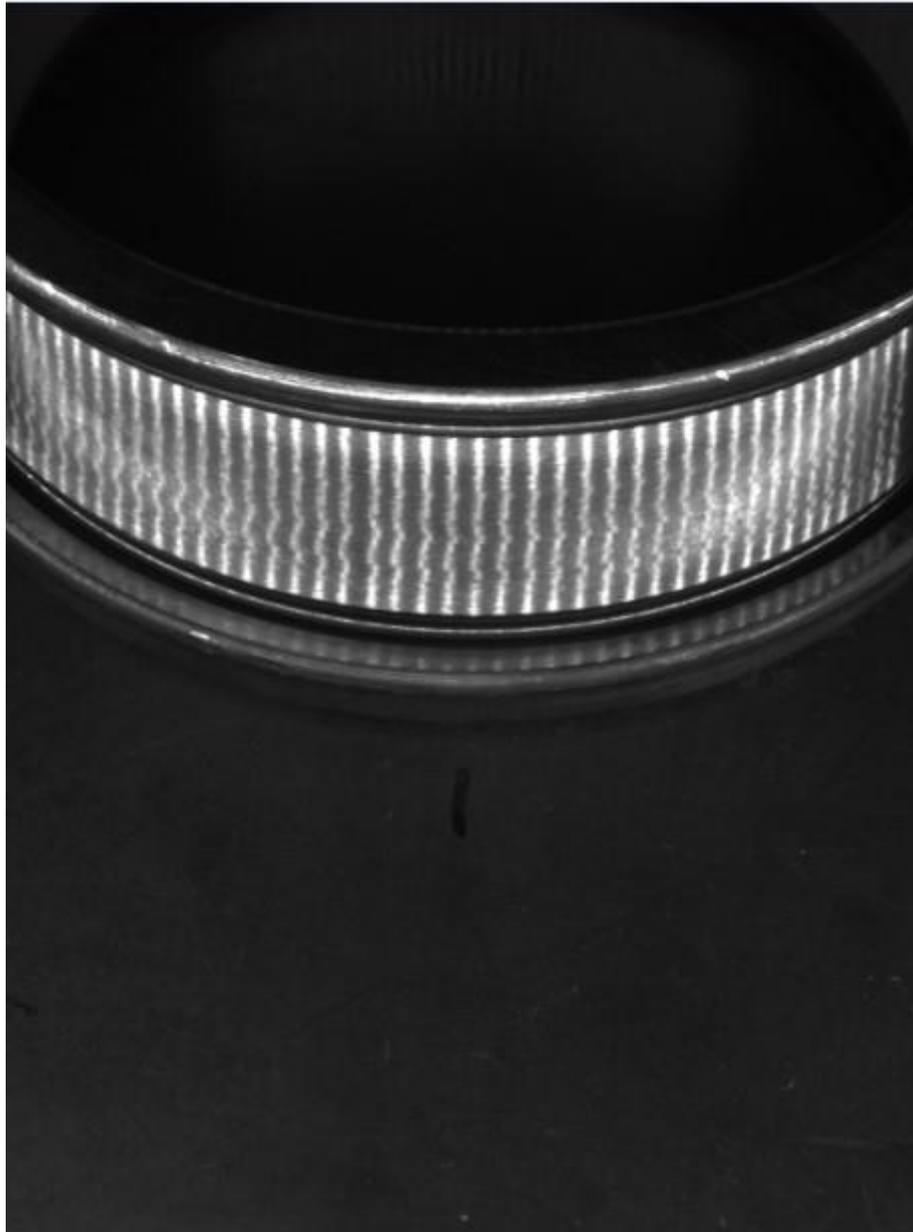


Figura 53. Captura pieza OK1

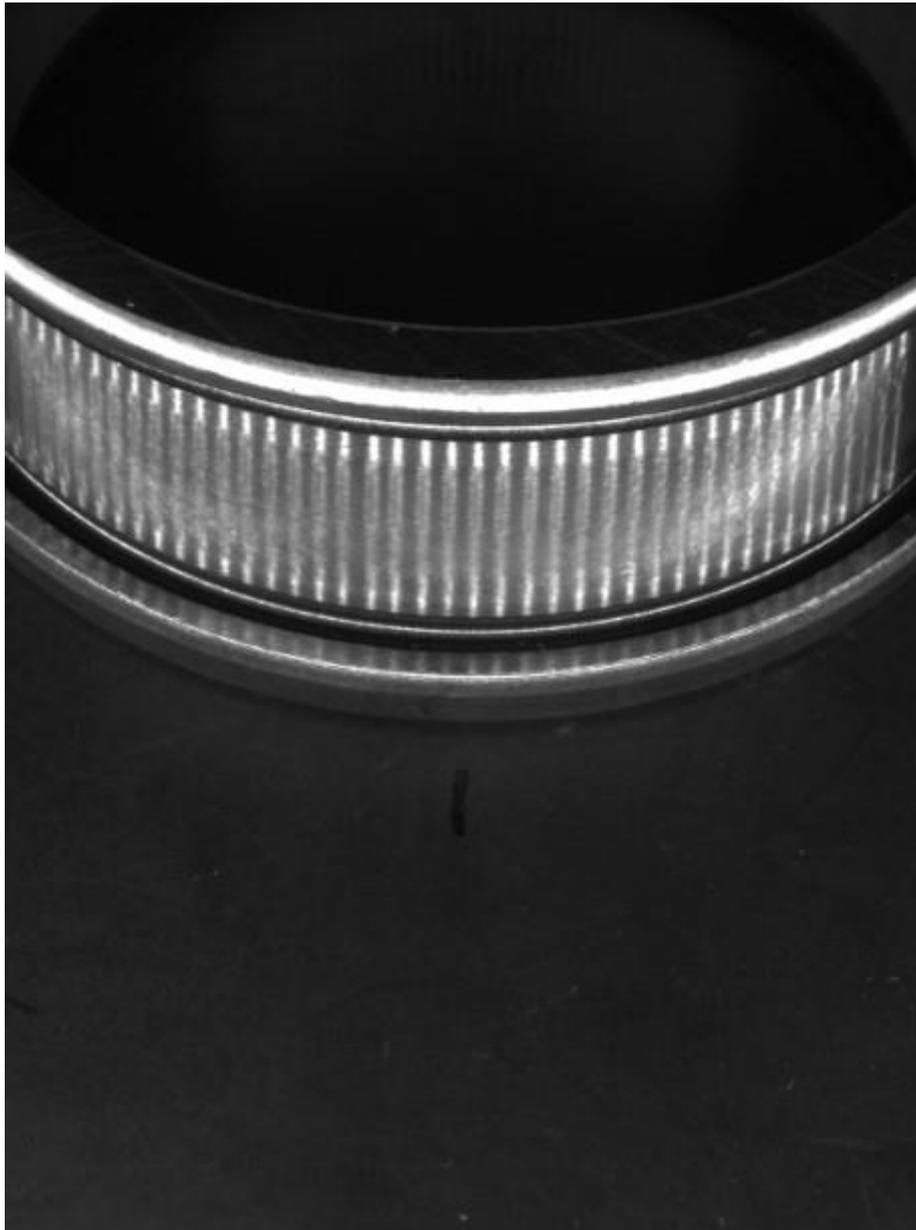


Figura 54. Captura pieza OK2

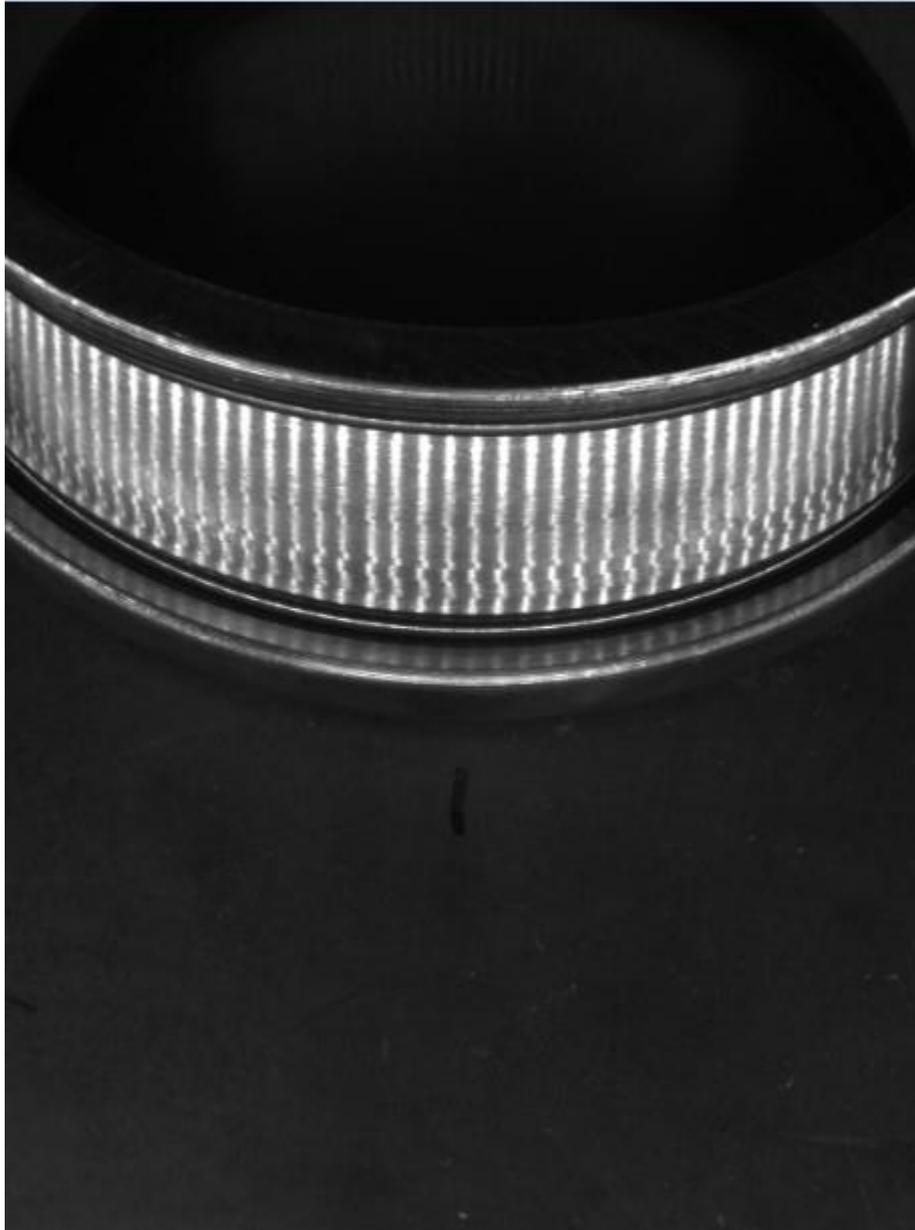


Figura 55. Captura pieza OK3

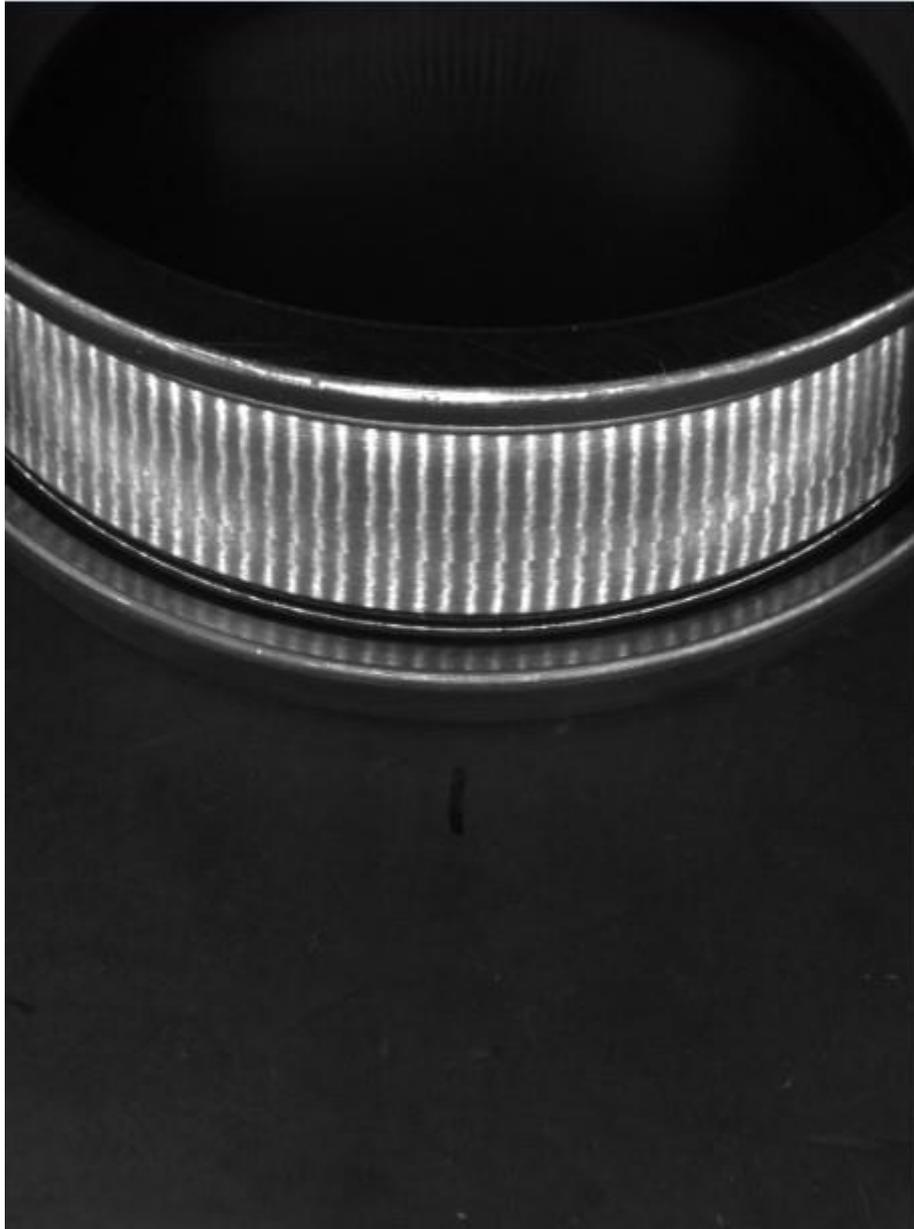


Figura 56. Captura pieza OK4

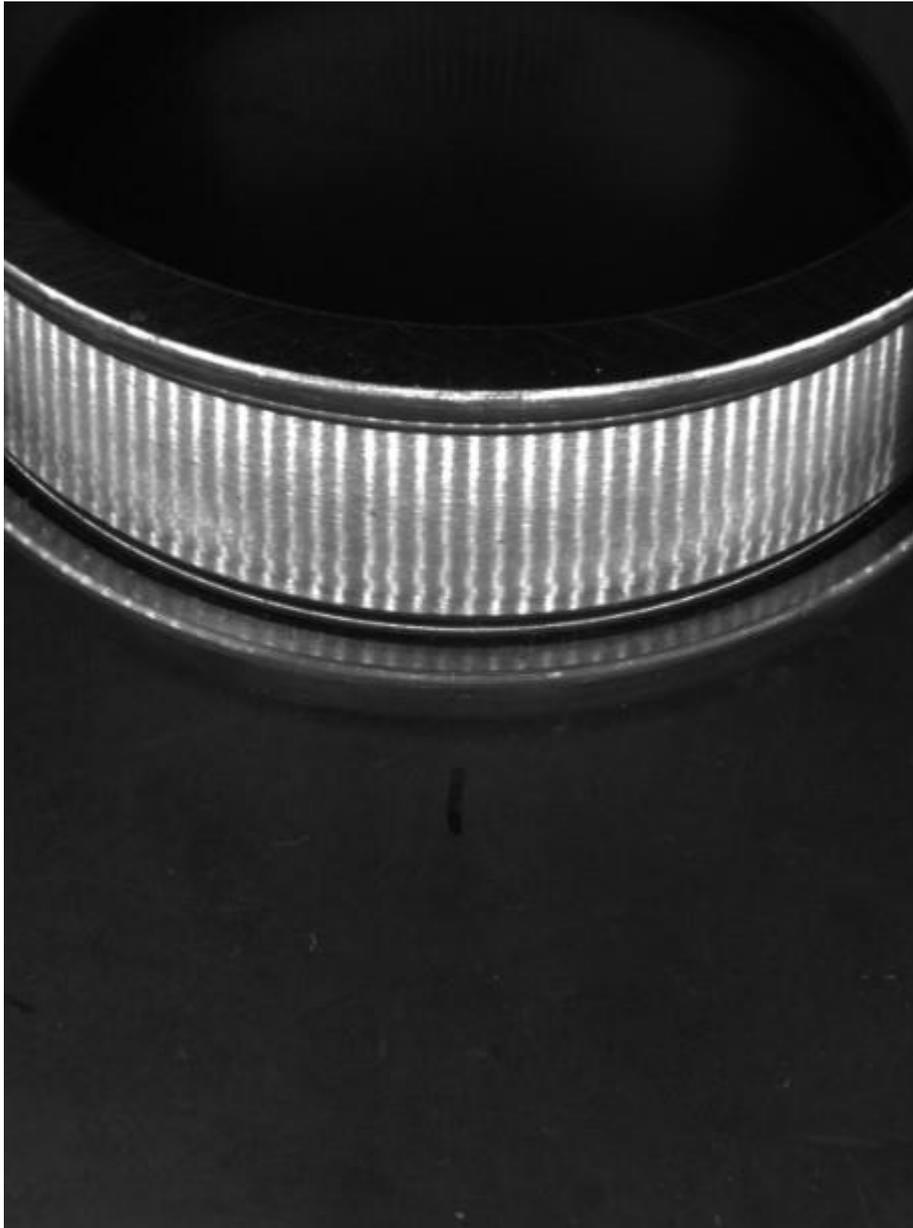


Figura 57. Captura pieza OK5



Piezas con retalón en testa (R):

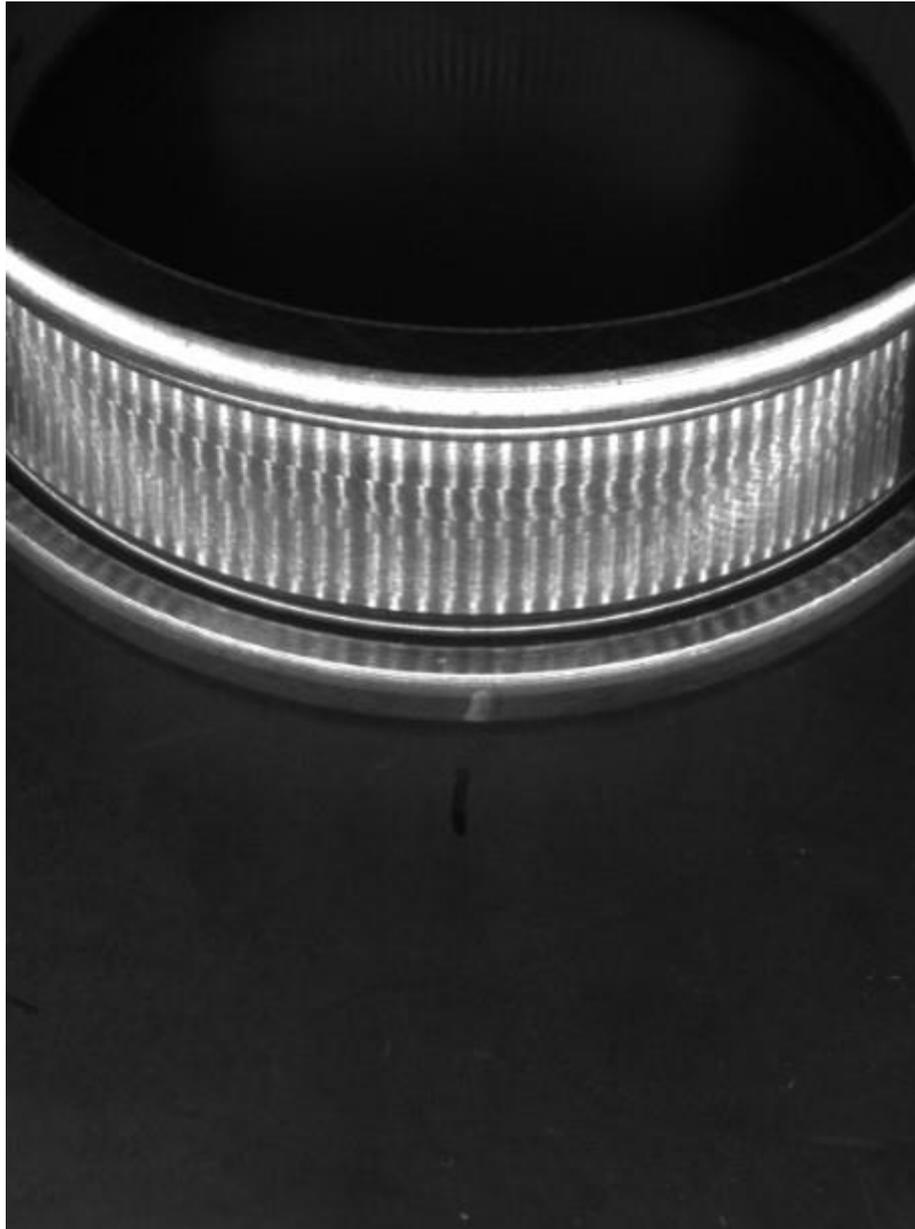


Figura 58. Captura pieza R1

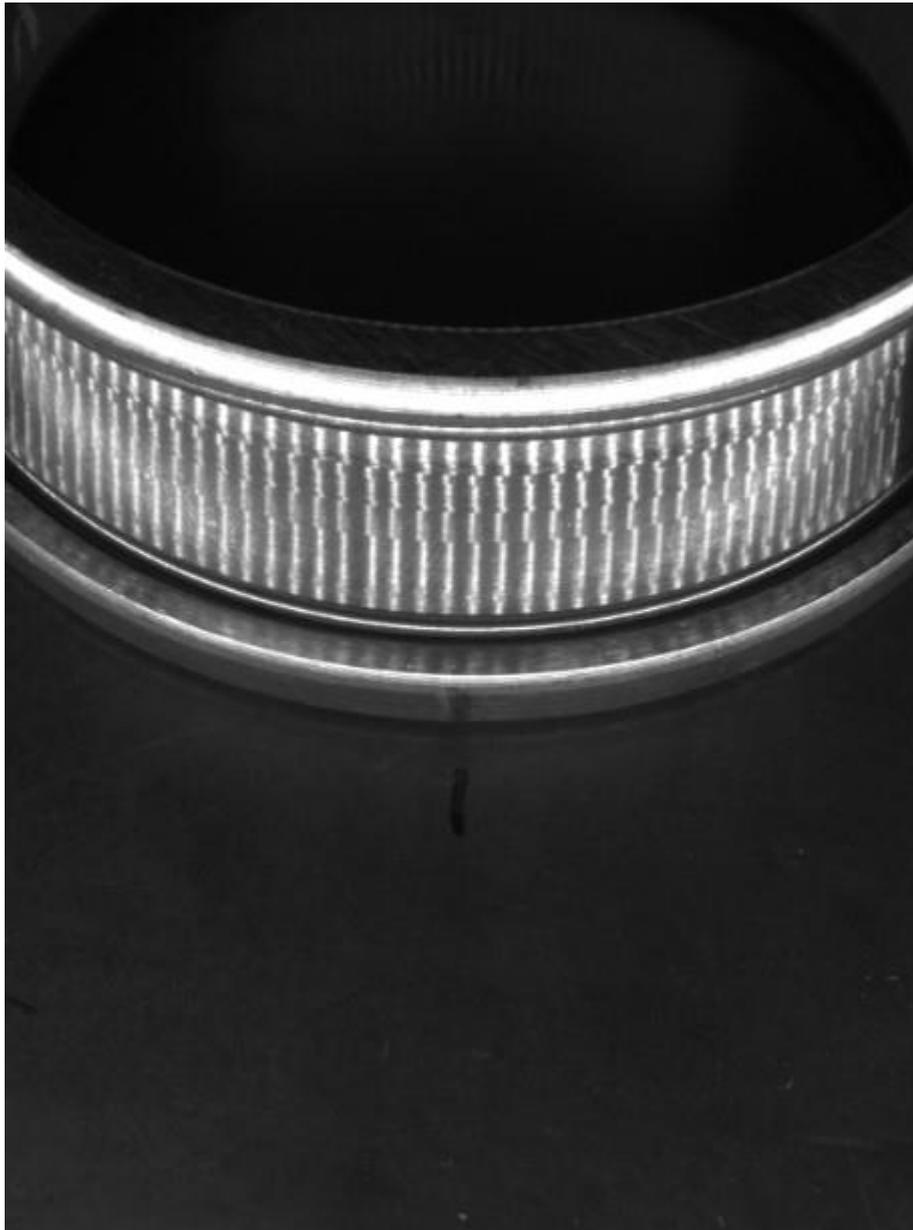


Figura 59. Captura pieza R2

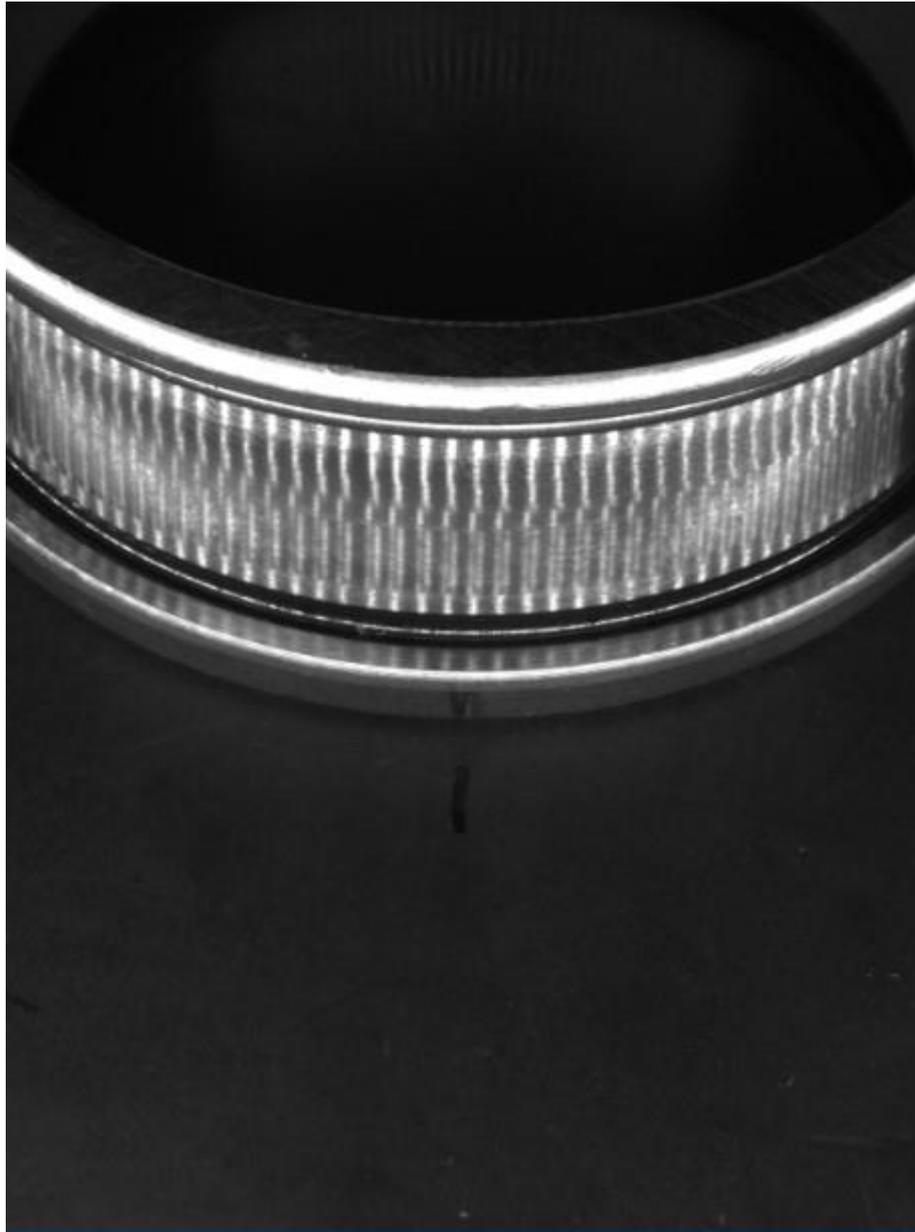


Figura 60. Captura pieza R4

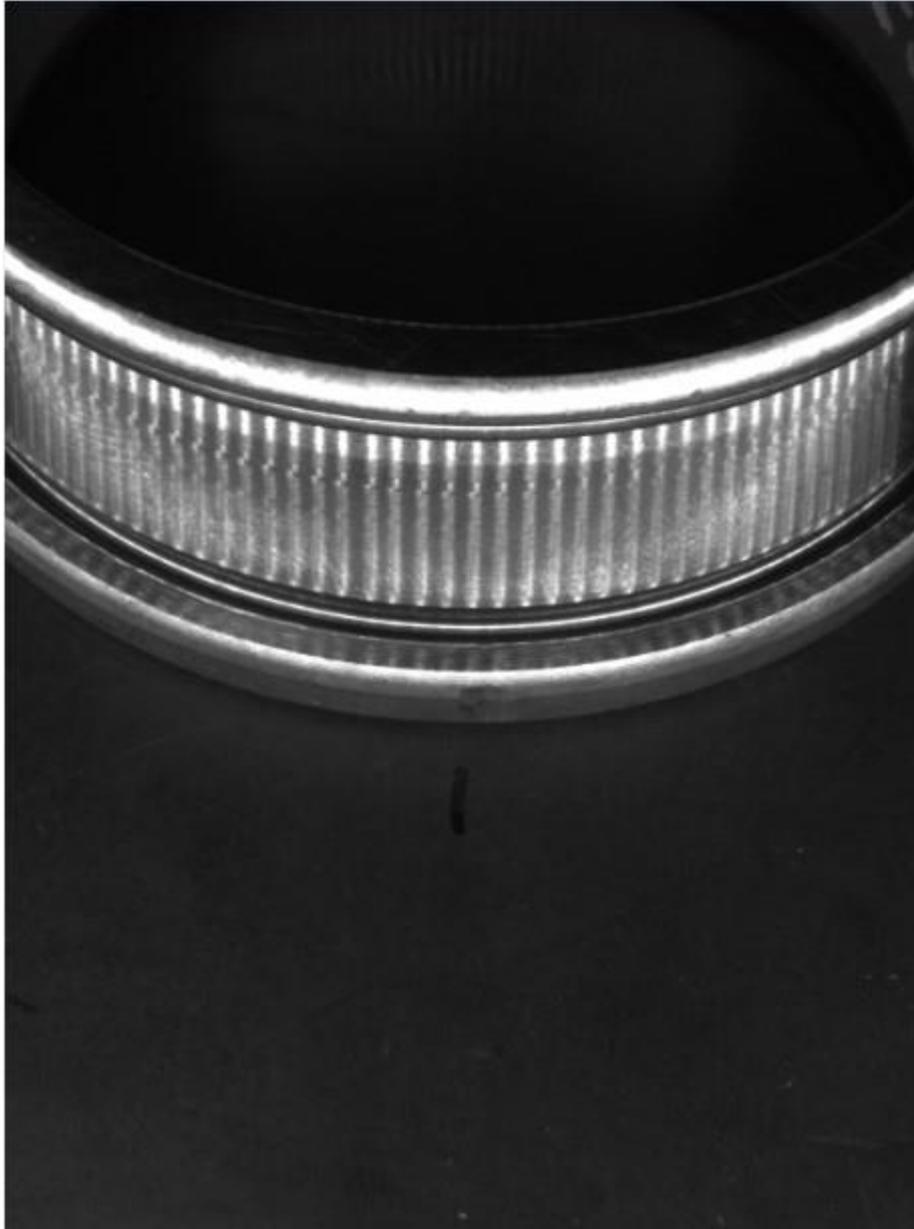


Figura 61. Captura pieza R5

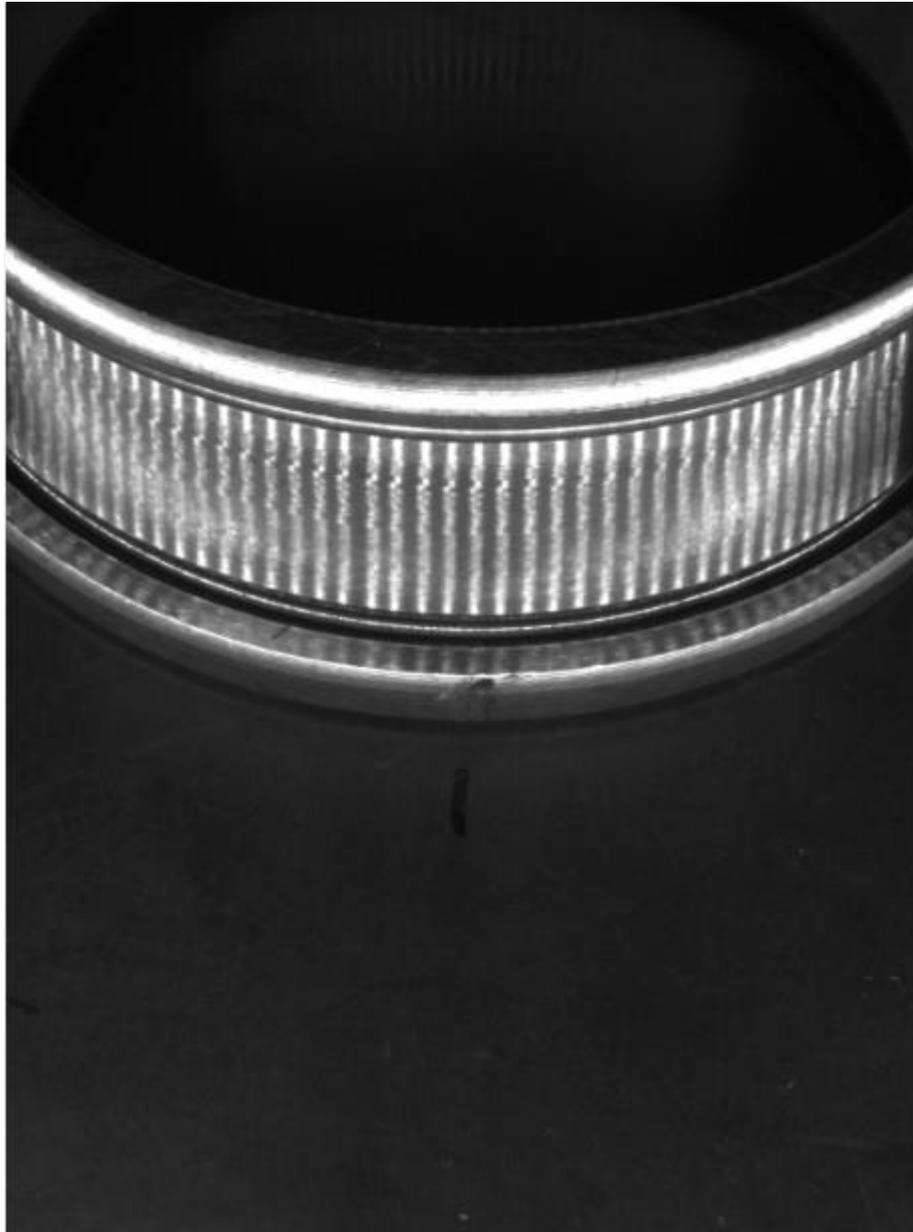


Figura 62. Captura pieza R6



Piezas con error de testa sin limpiar (TS):

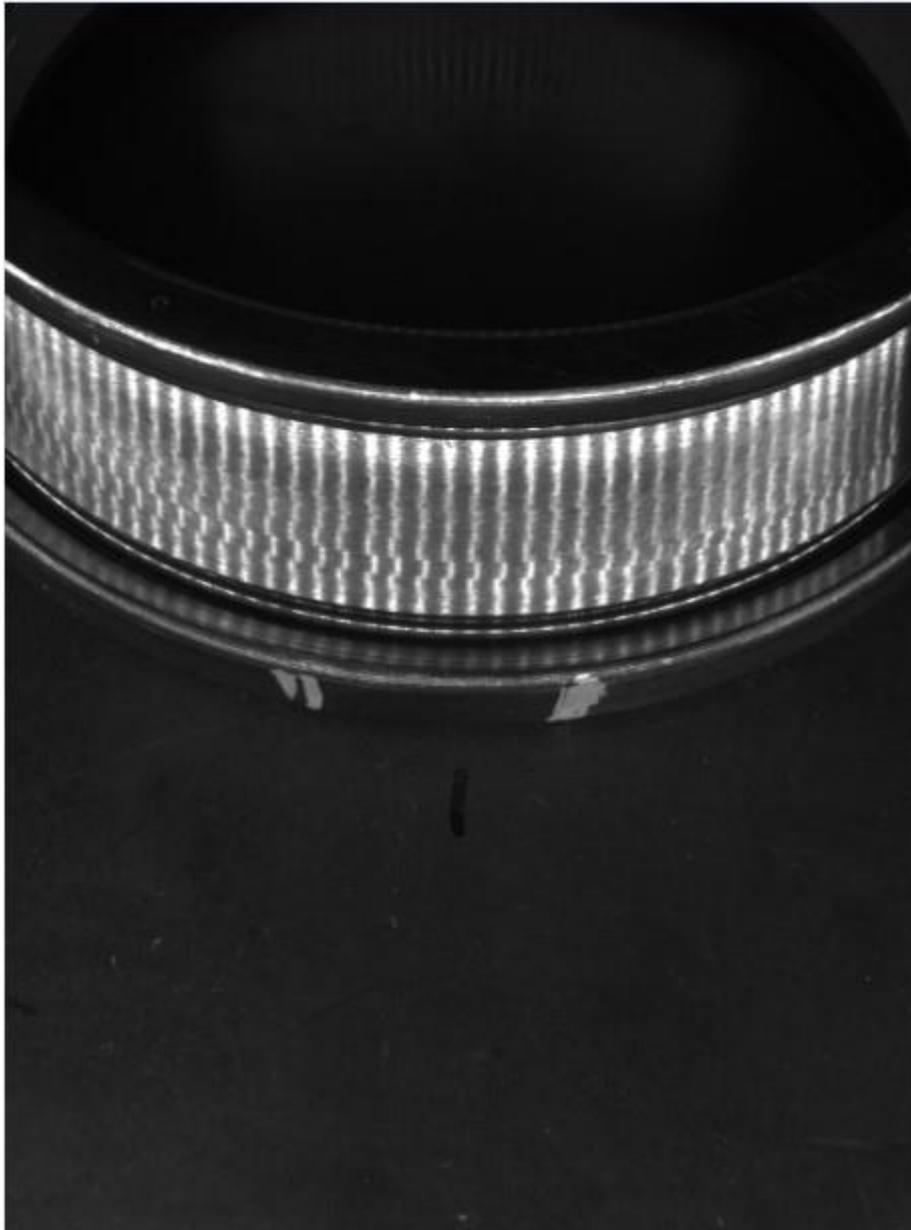


Figura 63. Captura pieza TS3

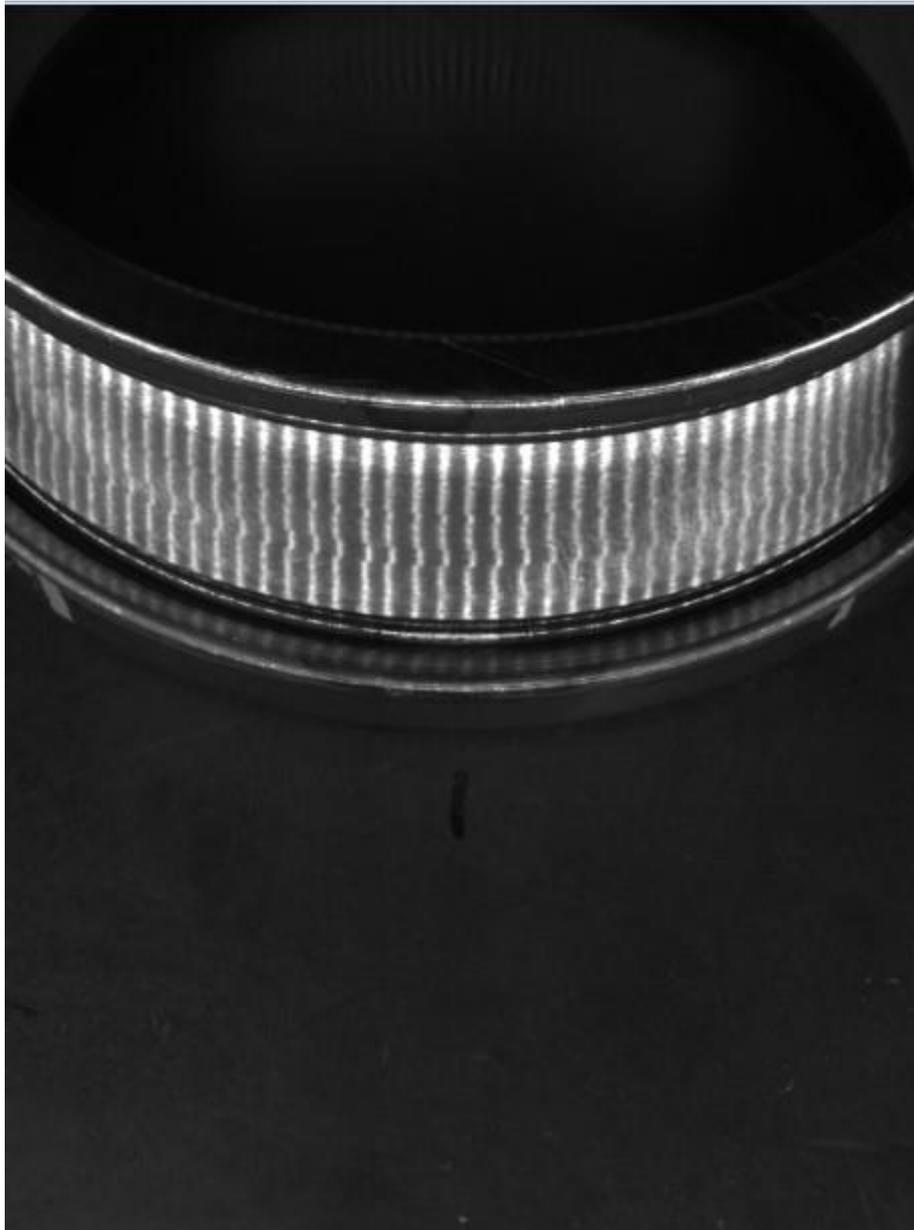


Figura 64. Captura pieza TS4

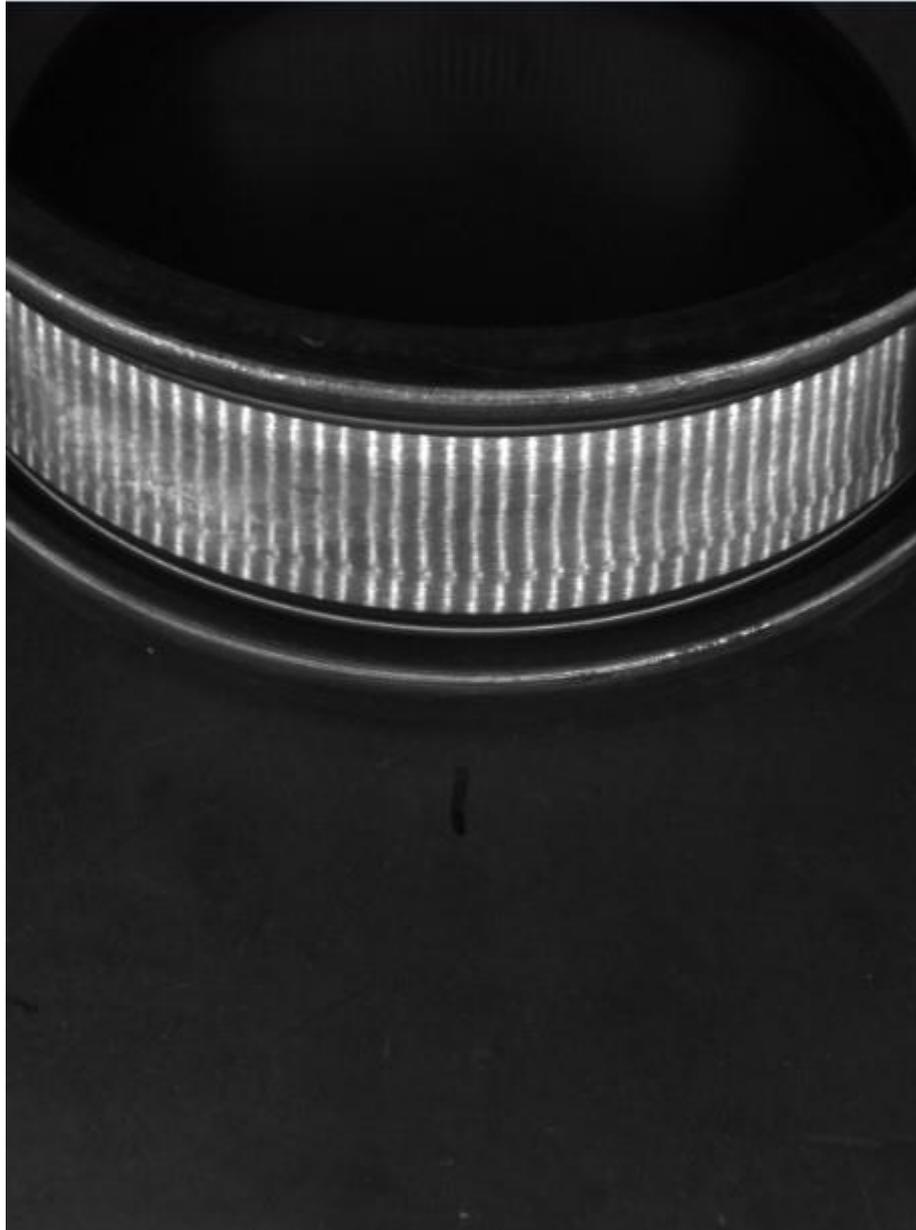


Figura 65. Captura pieza TS6

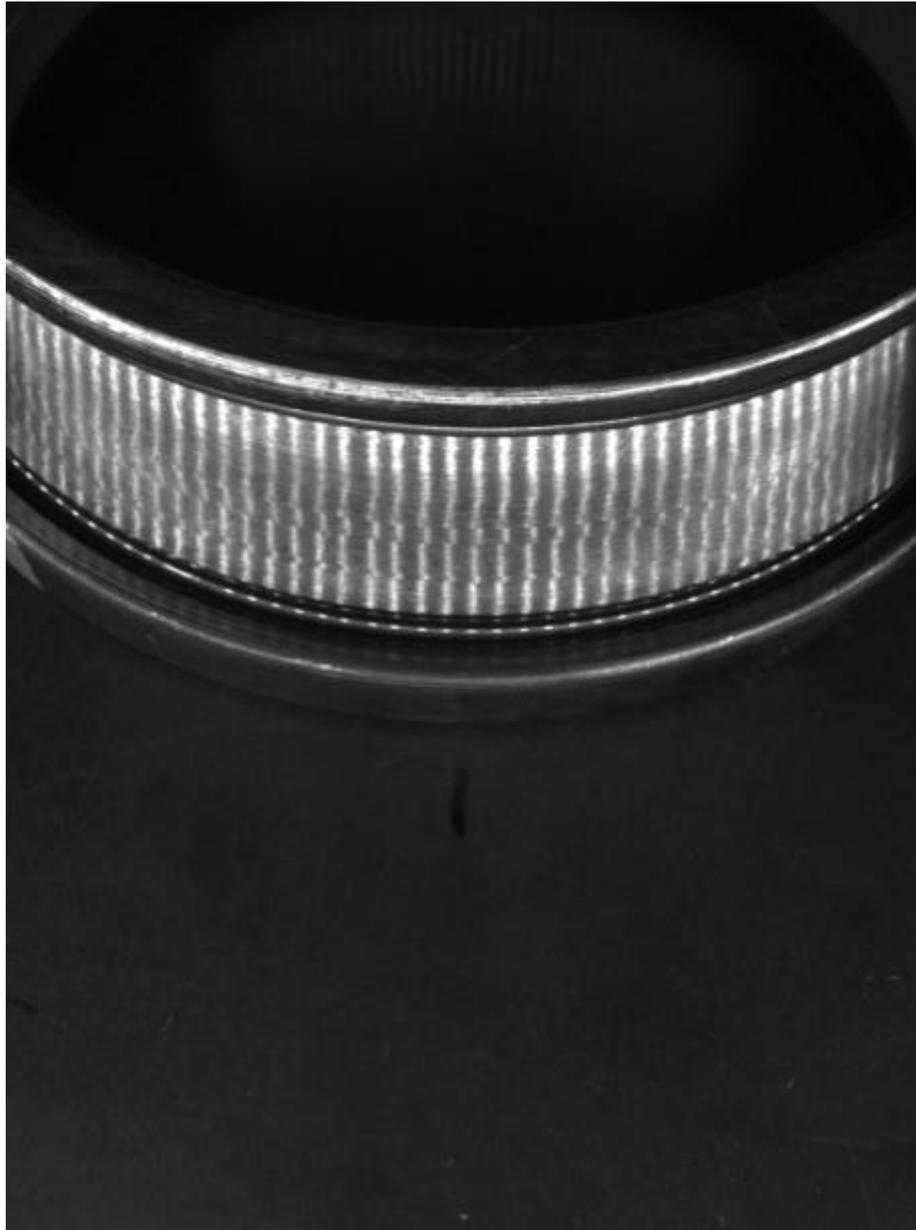


Figura 66. Captura pieza TS8

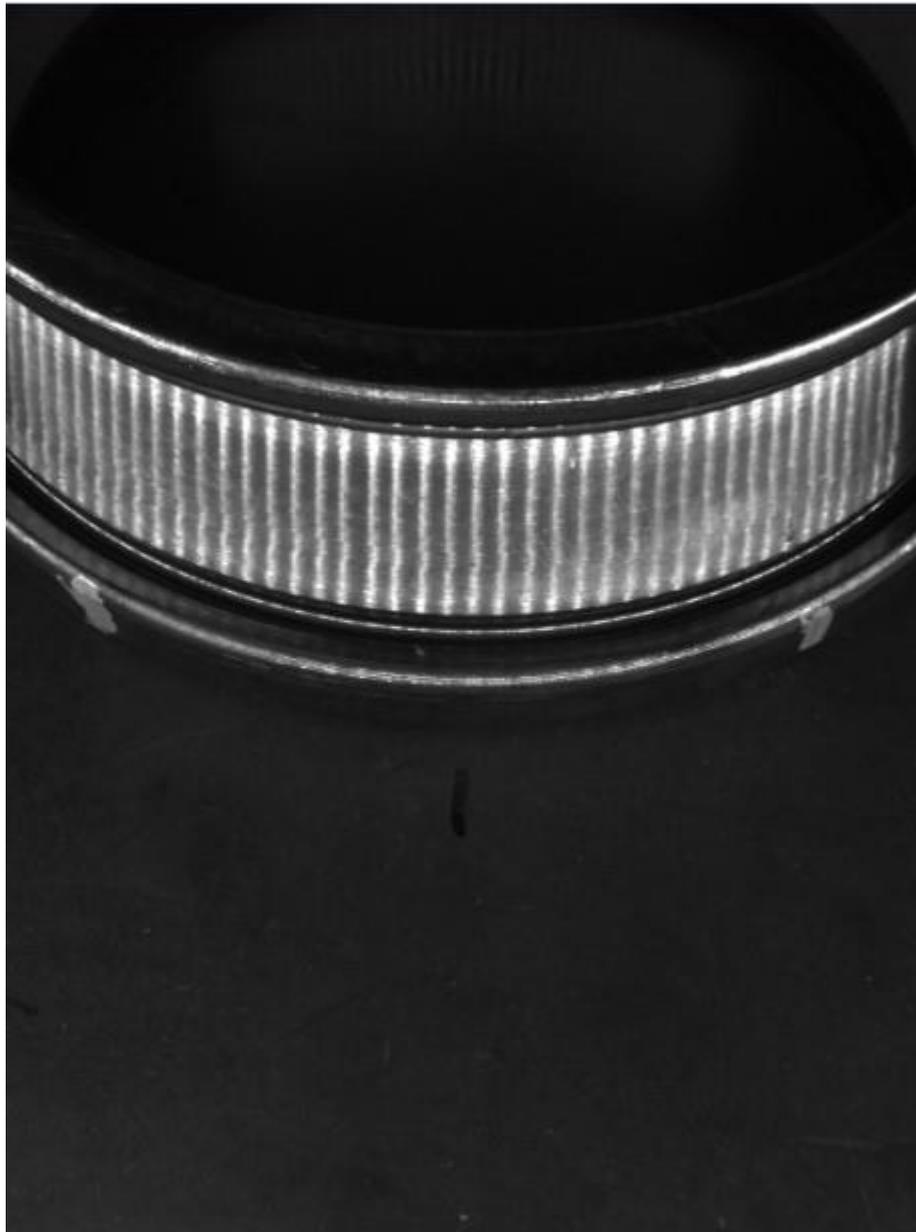


Figura 67. Captura pieza TS10

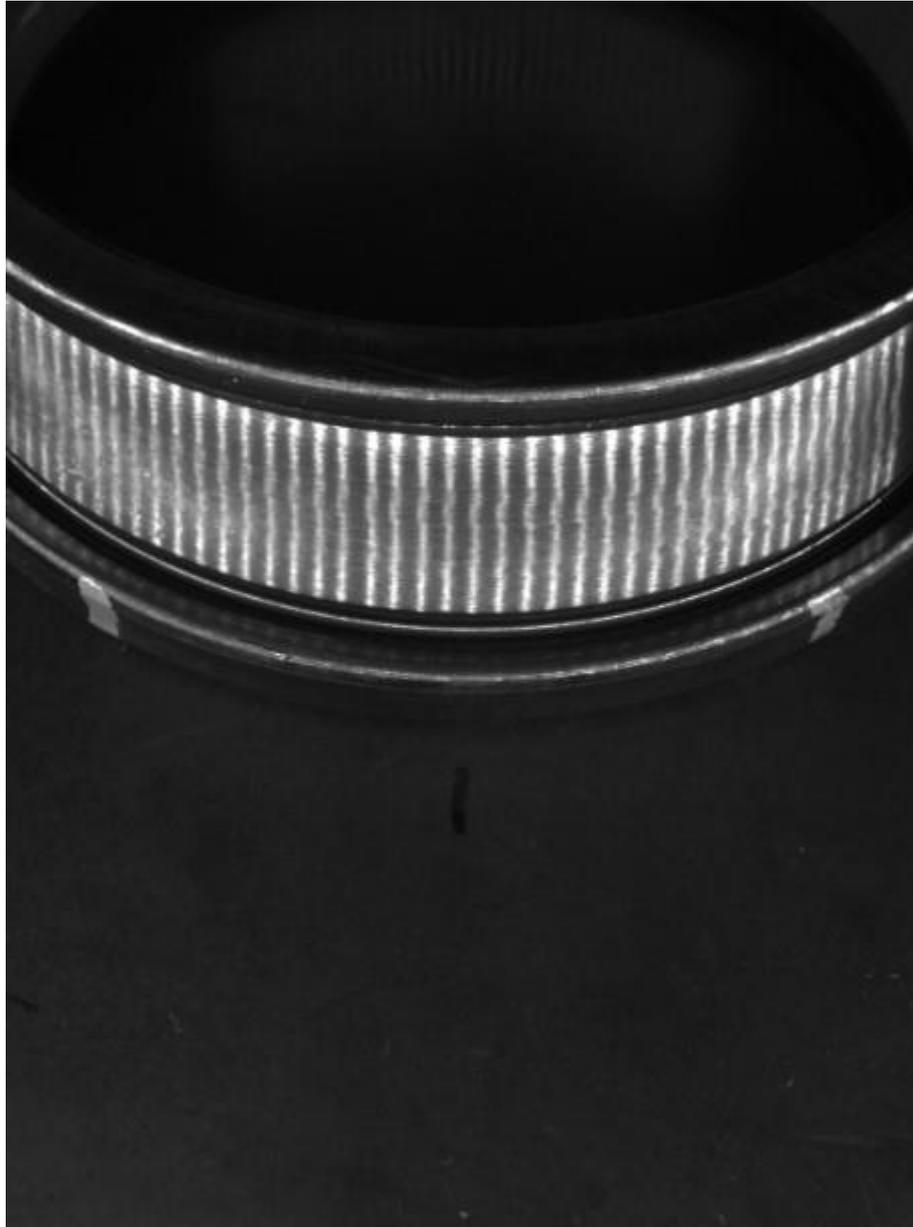


Figura 68. Captura pieza TS11

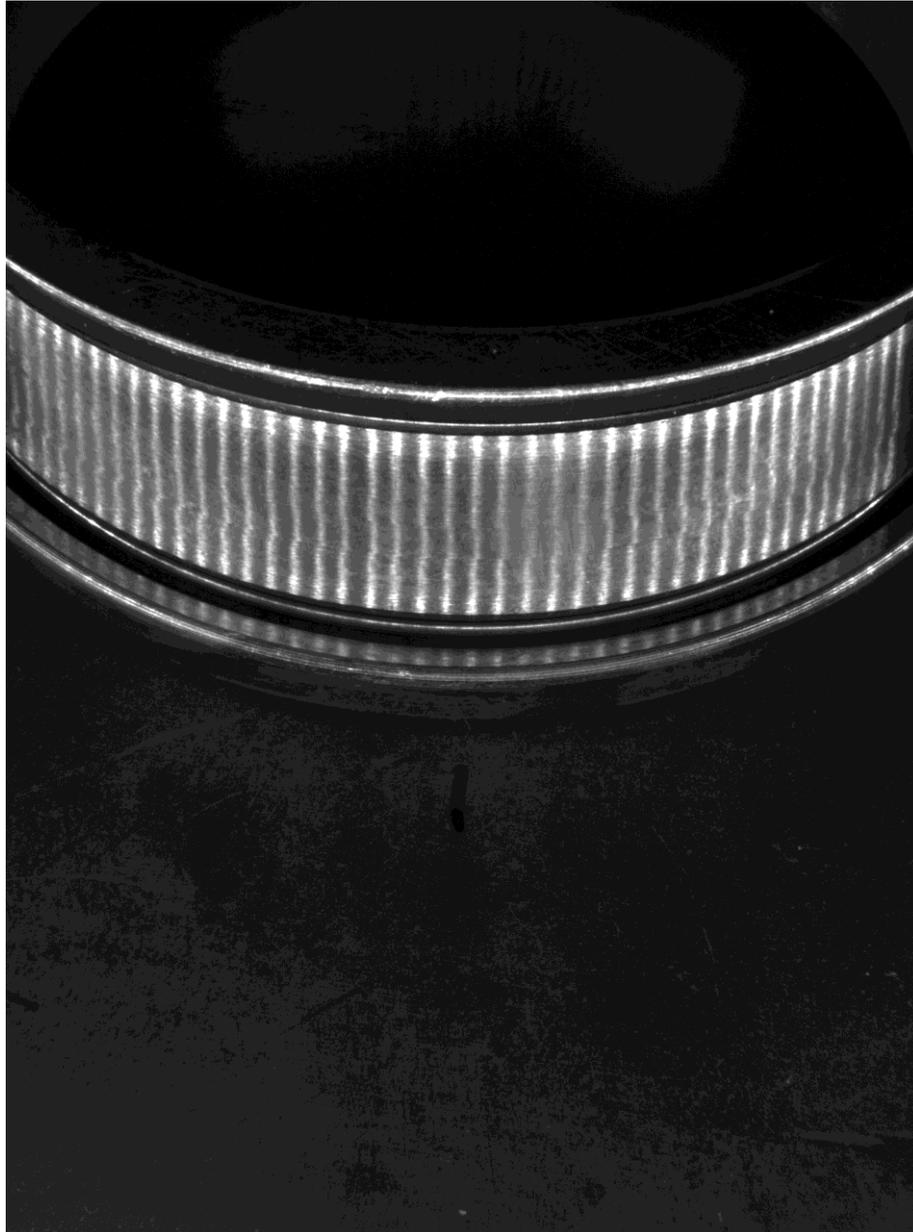


Figura 69. Captura pieza TS13

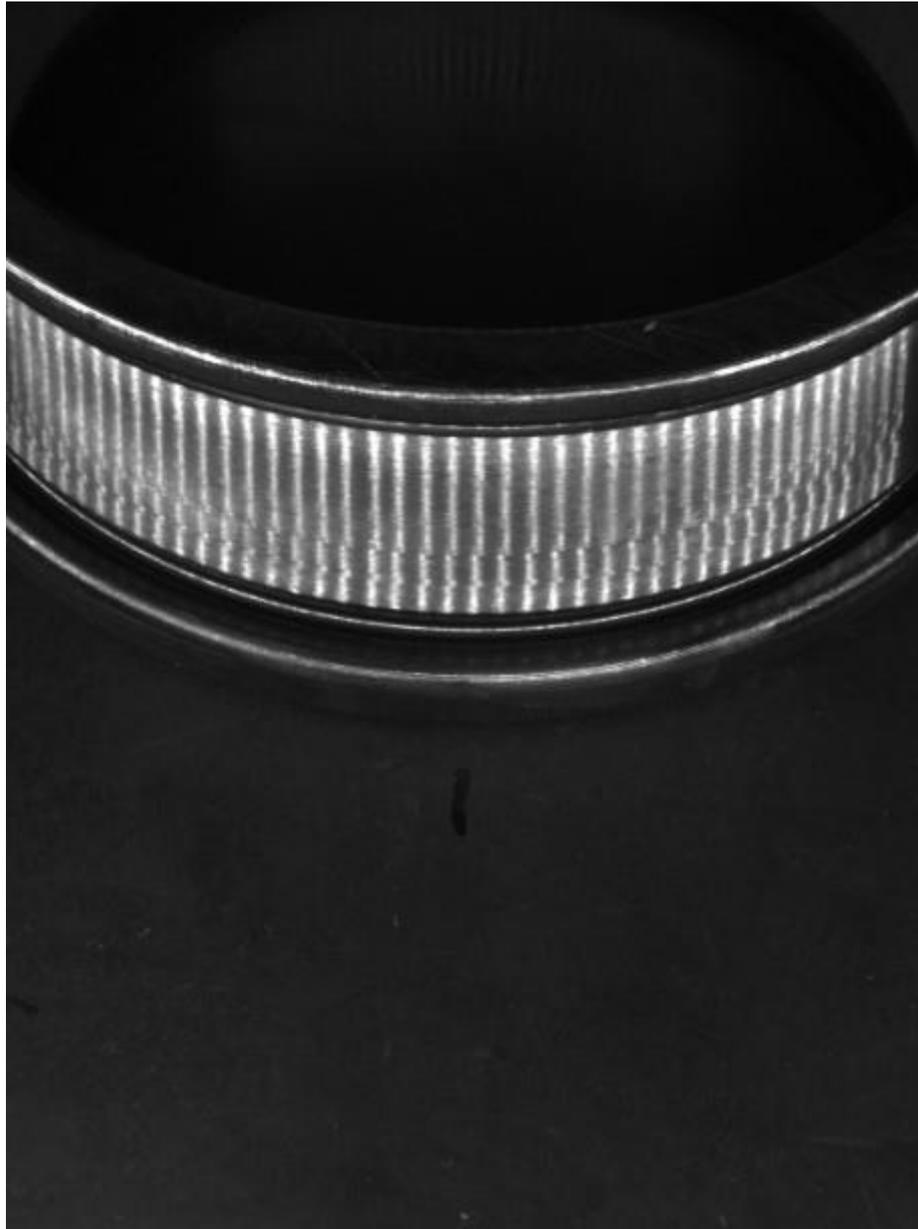


Figura 70. Captura pieza TS14



ANEXO IV. Gráficas nivel de gris para $u = 1$.

En este Anexo se muestra en primer lugar la superposición de las gráficas de los niveles de gris para la primera columna ($u = 1$), de cada subgrupo, piezas OK, piezas con error de retalón en resta (R) y piezas con error de testa sin limpiar (TS). En todas se limita de forma aproximada los que sería la banda de rodadura, el inicio después de una zona oscura (ndg muy bajos) y el final que coincide con una zona clara (ndg altos) que coincide con los picos finales. Además dichas gráficas nos ayudan a conocer que la extensión de la banda de rodadura para esta columna tiene una extensión aproximada de 100 píxeles, que será la máxima para toda la imagen.

También se incluyen dichas gráficas por separado, en las cuales se incluyen puntos aproximados de del inicio y final de la banda de rodadura, así como posibles retalones (picos entre el inicio y fin de la banda de rodadura). También se comentan posibles indicadores de testa sin limpiar, como puede ser una banda de rodadura con niveles de gris notablemente inferiores a los apreciados en las piezas del grupo OK.

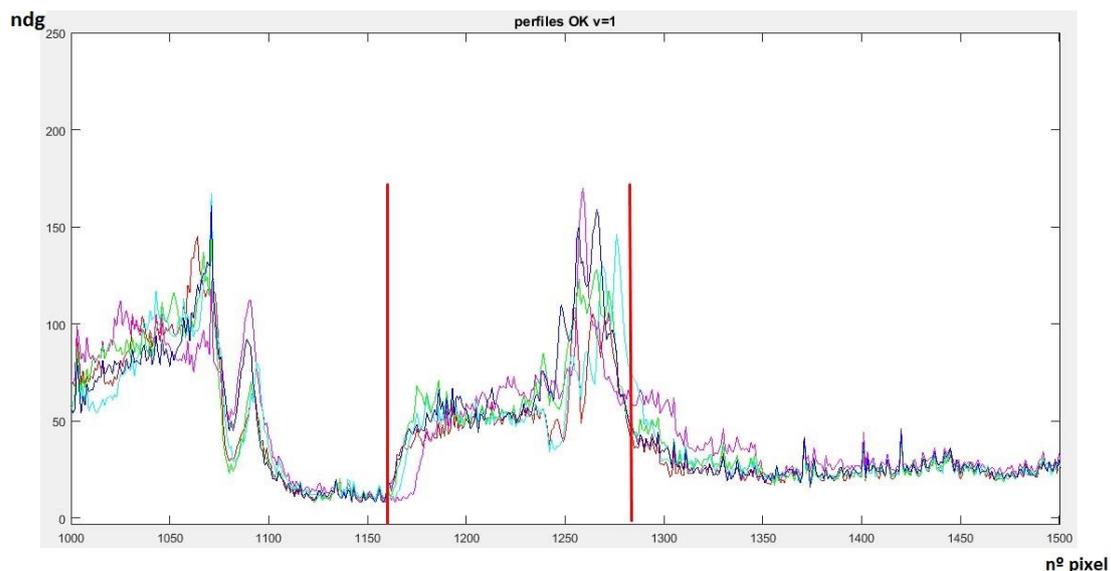


Figura 71. Gráfica del nivel de gris del grupo OK, $u = 1$

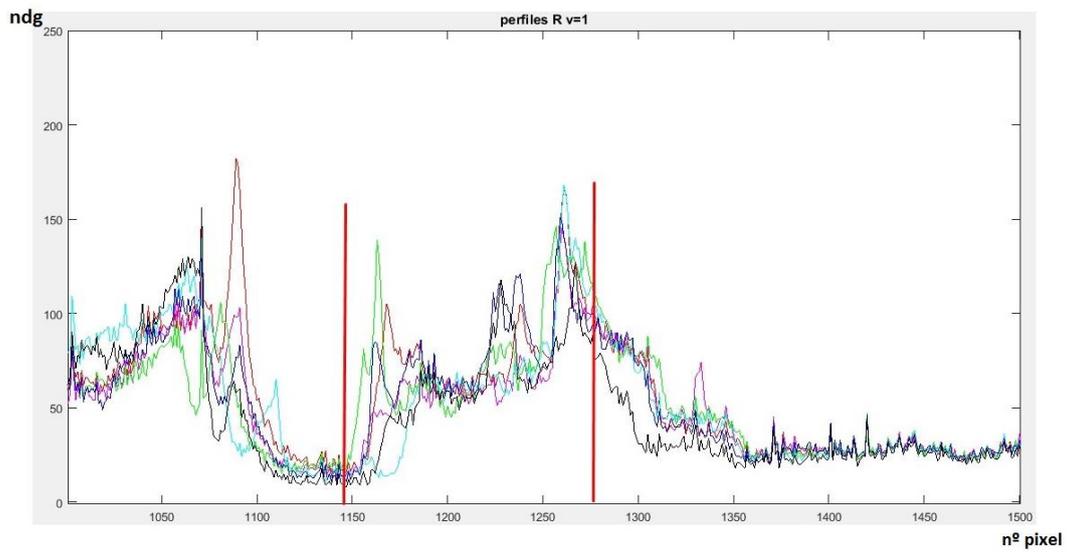


Figura 72. Gráfica del nivel de gris del grupo R, u = 1

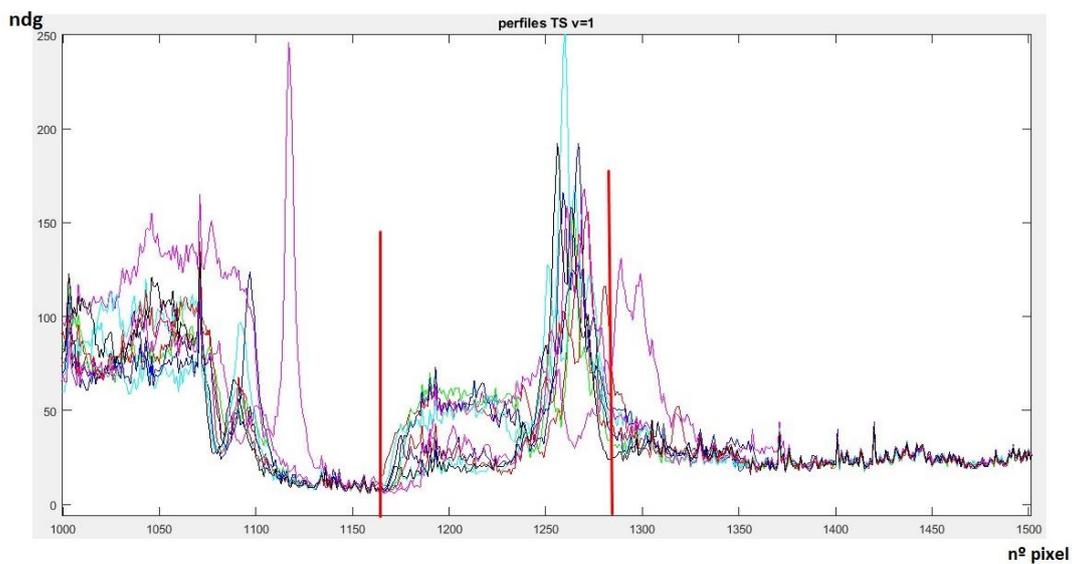


Figura 73. Gráfica del nivel de gris del grupo TS, u = 1



Piezas sin error superficial (OK):

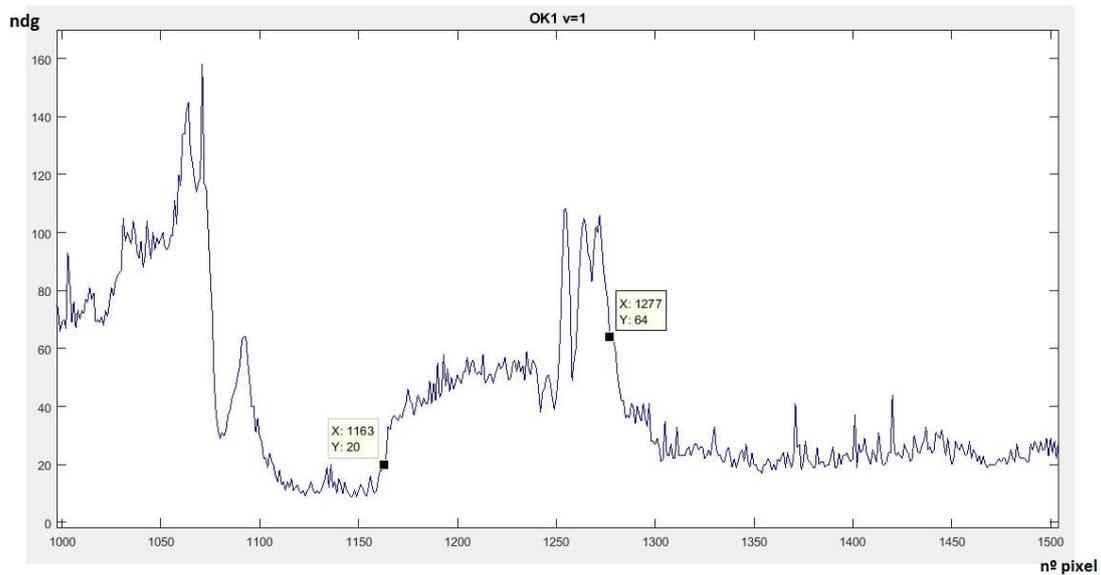


Figura 74. Gráfica del nivel de gris de OK1, u = 1

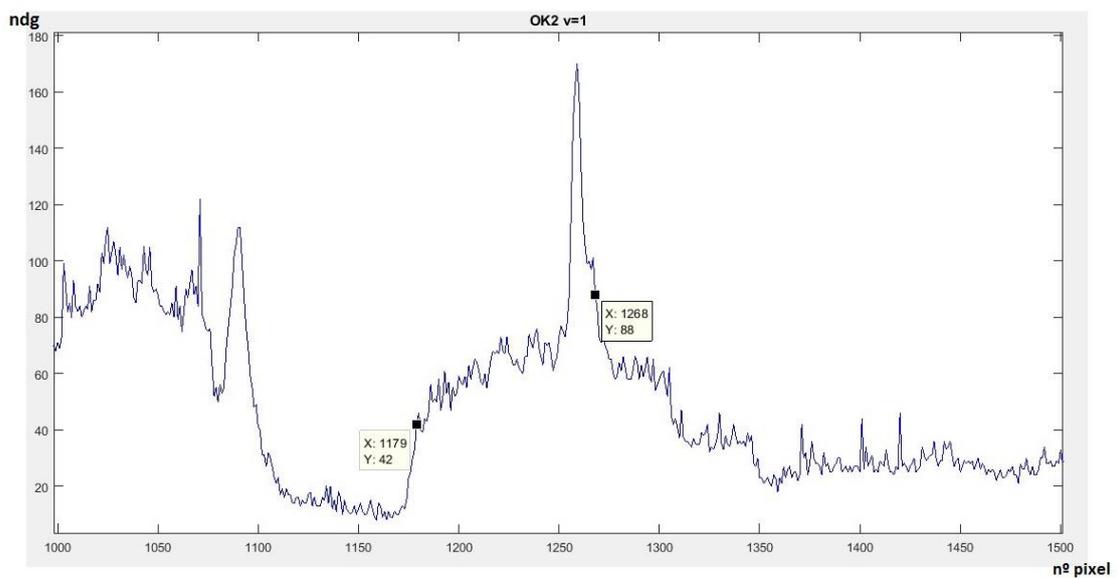


Figura 75. Gráfica del nivel de gris de OK2, u = 1

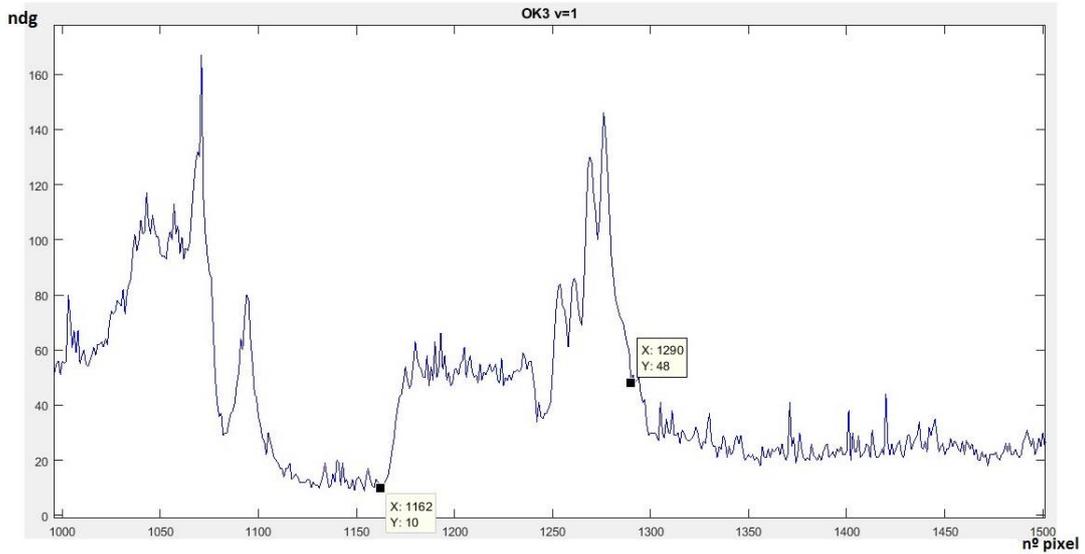


Figura 76. Gráfica del nivel de gris de OK3, u = 1

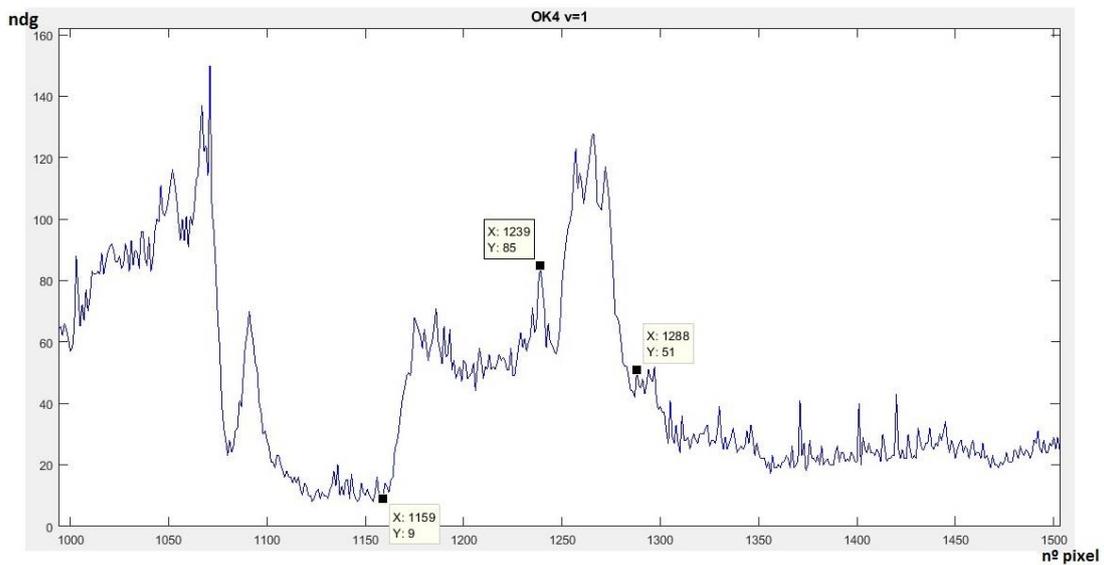


Figura 77. Gráfica del nivel de gris de OK4, u = 1

En esta gráfica se han marcado los puntos aproximados de inicio in final de la banda de rodadura además de un máximo que podría ser un indicador de error de retalón en testa.

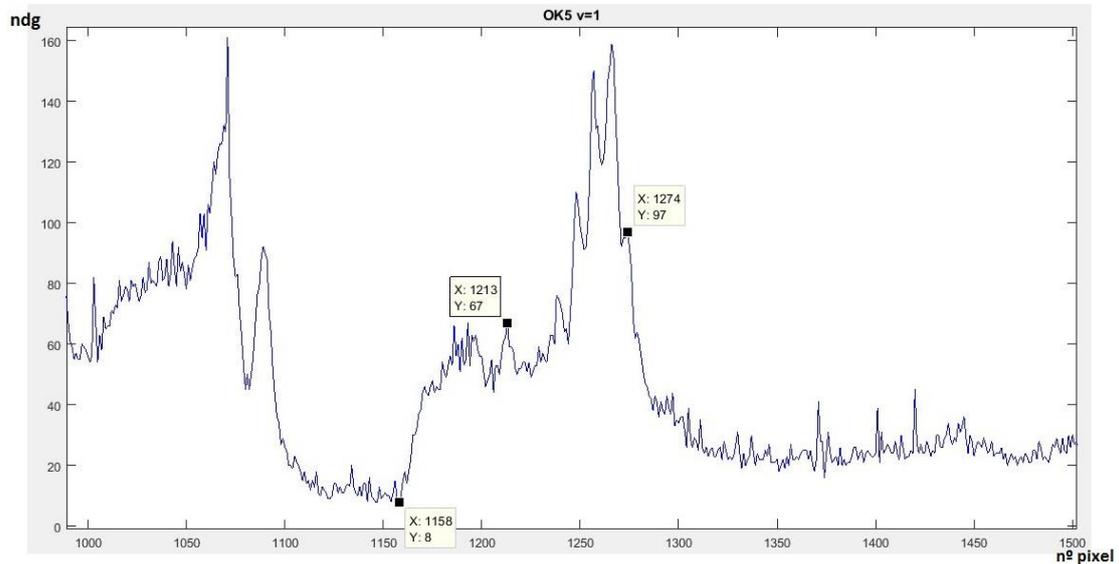


Figura 78. Gráfica del nivel de gris de OK5, u = 1

Al igual que en la gráfica anterior se han anotado los límites de la banda de rodadura y un máximo situado entre ambos que podría indicar que existe un retalón, pese a ser una pieza catalogada como OK.

Comprobando las cinco piezas se observa que en ningún caso (salvo mínimos puntuales) el nivel de gris situado entre los límites de la banda de rodadura es inferior a 50, lo cual puede ser de utilidad como descriptor de que una pieza no presenta error superficial.



Piezas con retalón en testa (R):

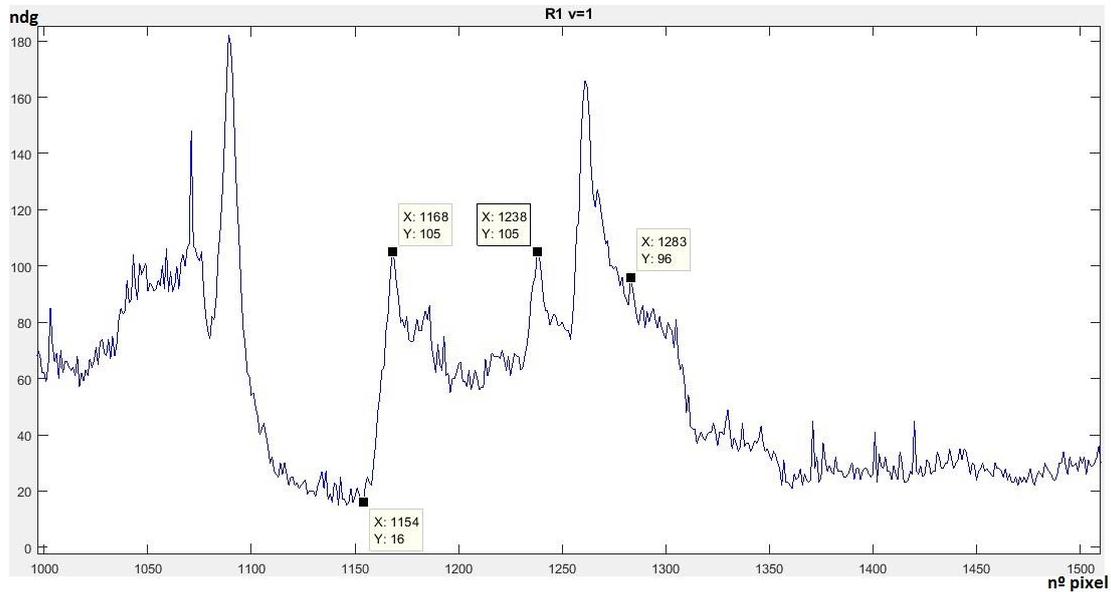


Figura 79. Gráfica del nivel de gris de R1, u = 1

En esta gráfica al igual que en el grupo anterior anotamos los límites de la banda de rodadura, además de dos picos que parecen ser indicadores más evidentes de un posible error de retalón en testa.

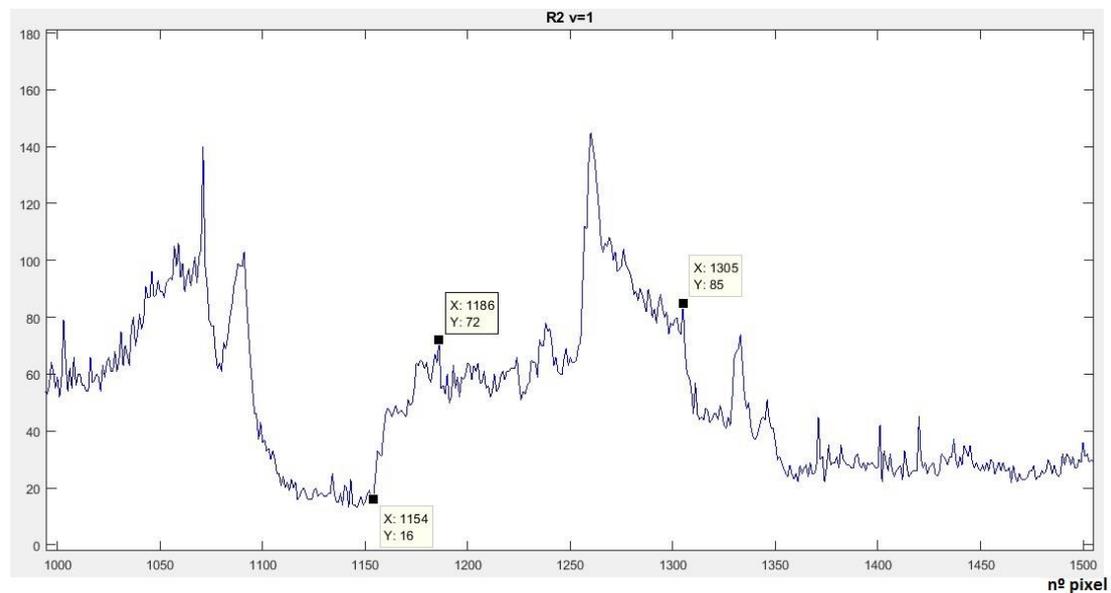


Figura 80. Gráfica del nivel de gris de R2, u = 1



En esta pieza se anotan los límites de la banda de rodadura y un posible retalón, menos indicativo que en el caso anterior.

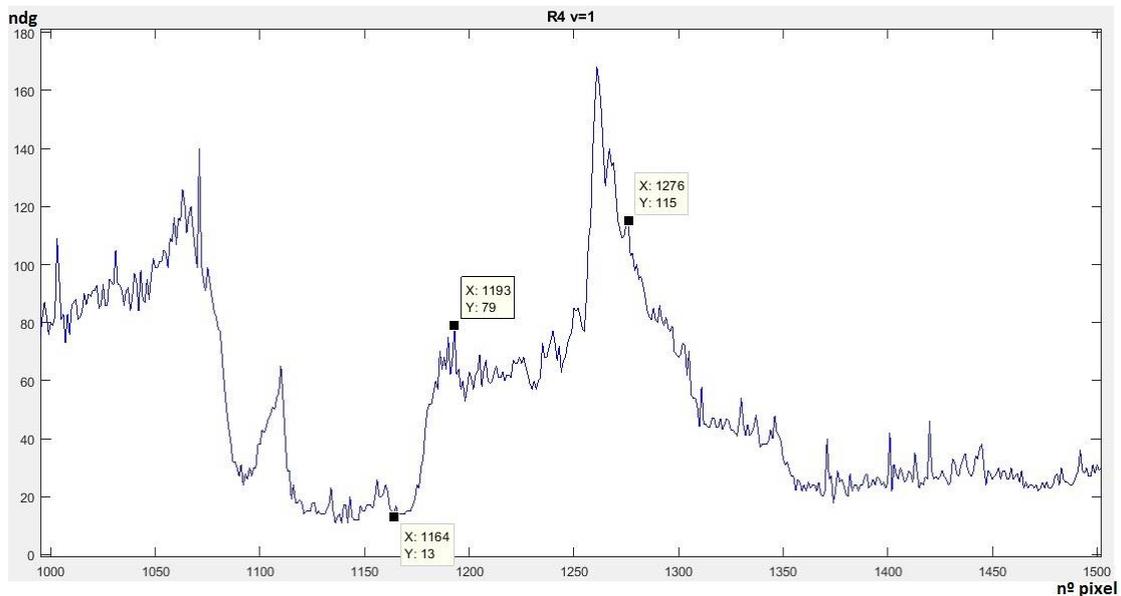


Figura 82. Gráfica del nivel de gris de R4, u = 1

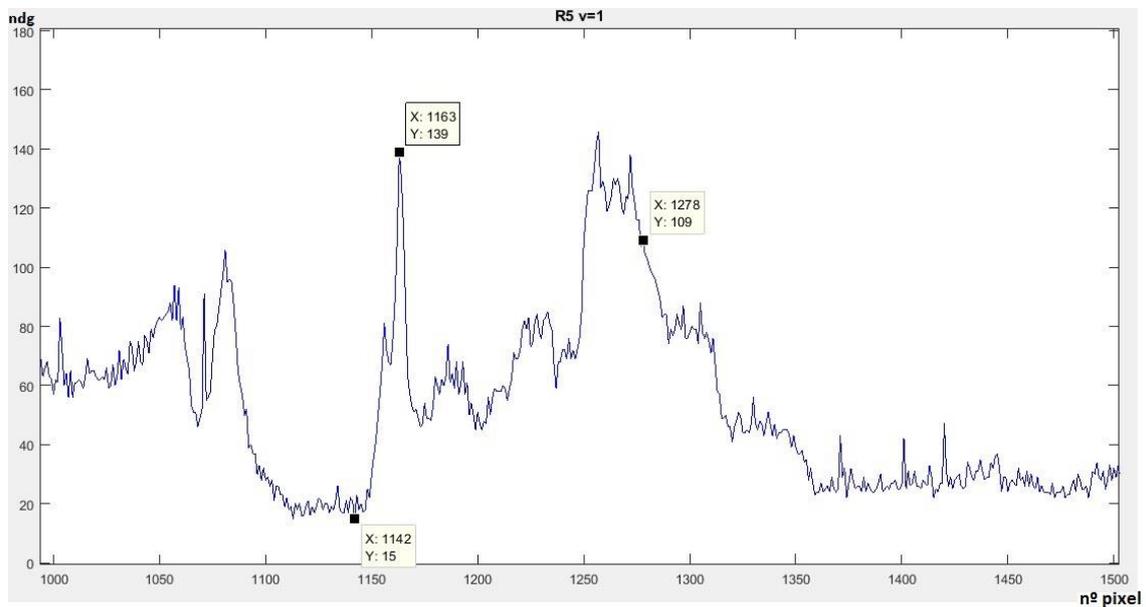


Figura 81. Gráfica del nivel de gris de R5, u = 1

En esta gráfica resulta mucho más evidente la presencia de un posible retalón debido a la gran diferencia presente en el nivel de gris entre la banda de rodadura y el pico presente en la misma.

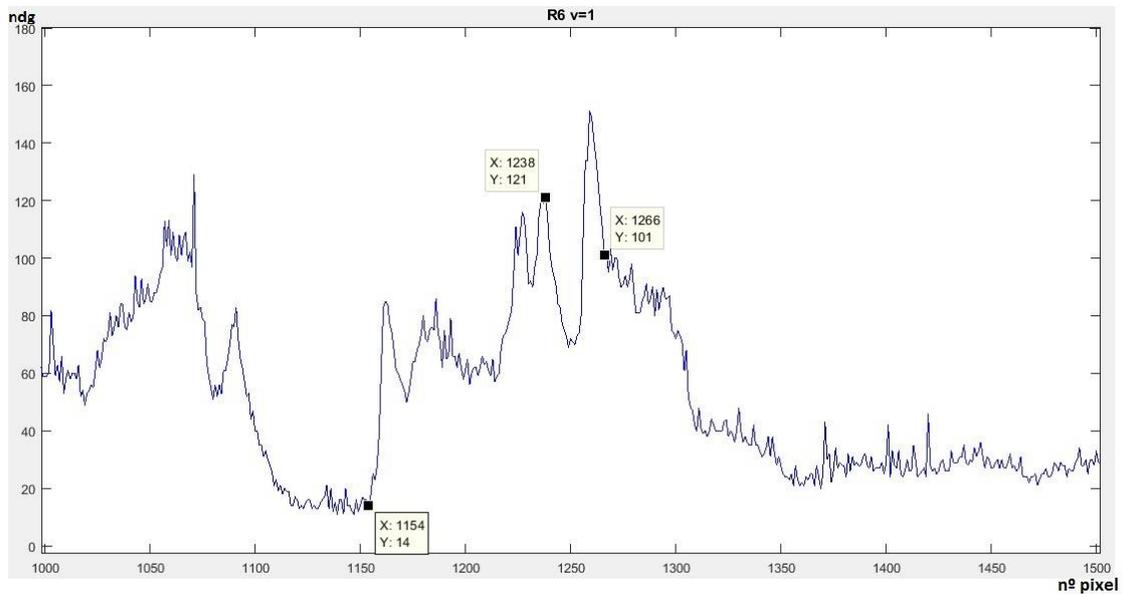


Figura 83. Gráfica del nivel de gris de R6, u = 1

Para esta pieza también apreciamos posible retalones, se ha identificado el que presenta mayor diferencia en cuanto a nivel de gris respecto al resto de píxeles de la banda de rodadura.

En este grupo de piezas se observan máximos muy pronunciados que pueden indicar la presencia de un retalón en la banda de rodadura, además estas piezas se caracterizan por tener un nivel de gris mayor (son más claras), siendo sus valores mínimos en la banda de rodadura superiores a 50 e incluso mayores.



Piezas con error de testa sin limpiar (TS):

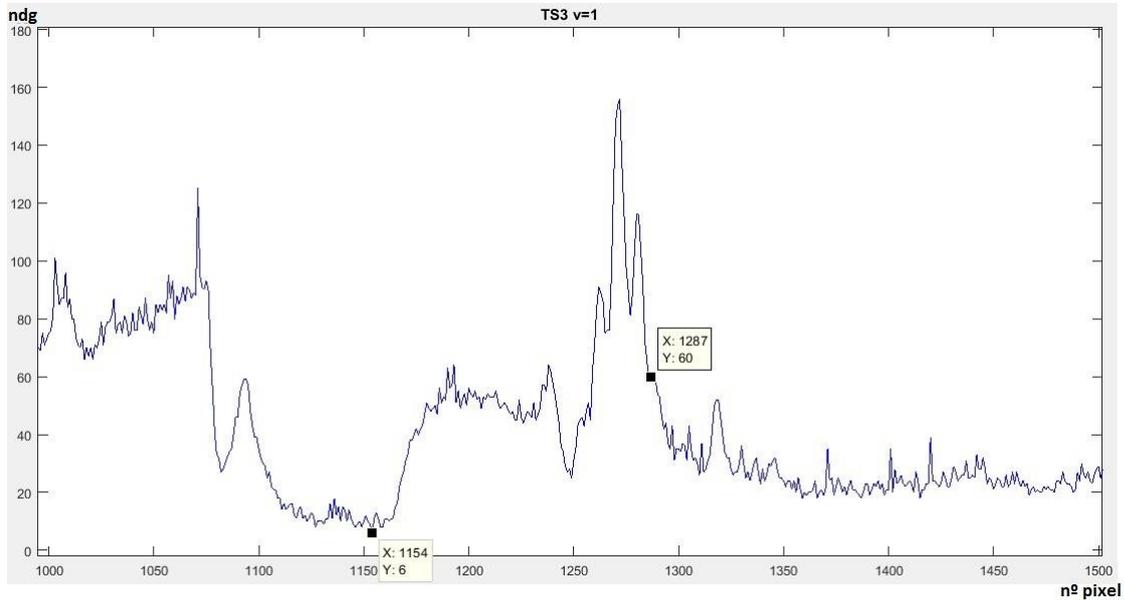


Figura 84. Gráfica del nivel de gris de TS3, u = 1

En esta pieza del tercer grupo solo hemos anotado el inicio y final de la banda de rodadura.

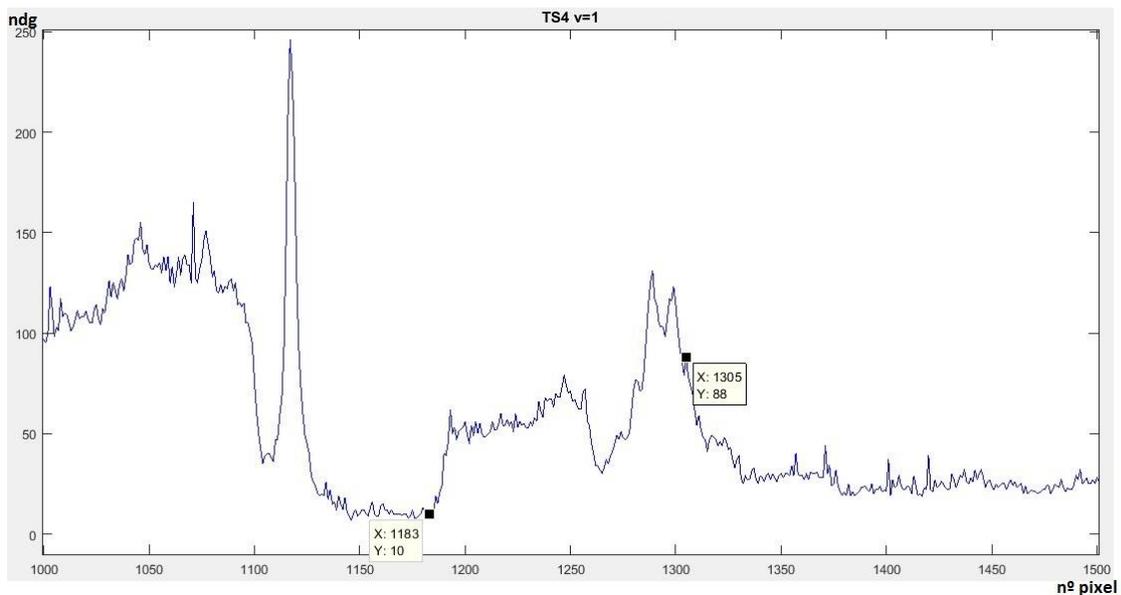


Figura 85. Gráfica del nivel de gris de TS4, u = 1



Al igual que en el caso anterior solo anotamos el inicio y final de la banda de rodadura, de interés podría ser que presenta valores globales con menor variación en cuanto a nivel de gris.

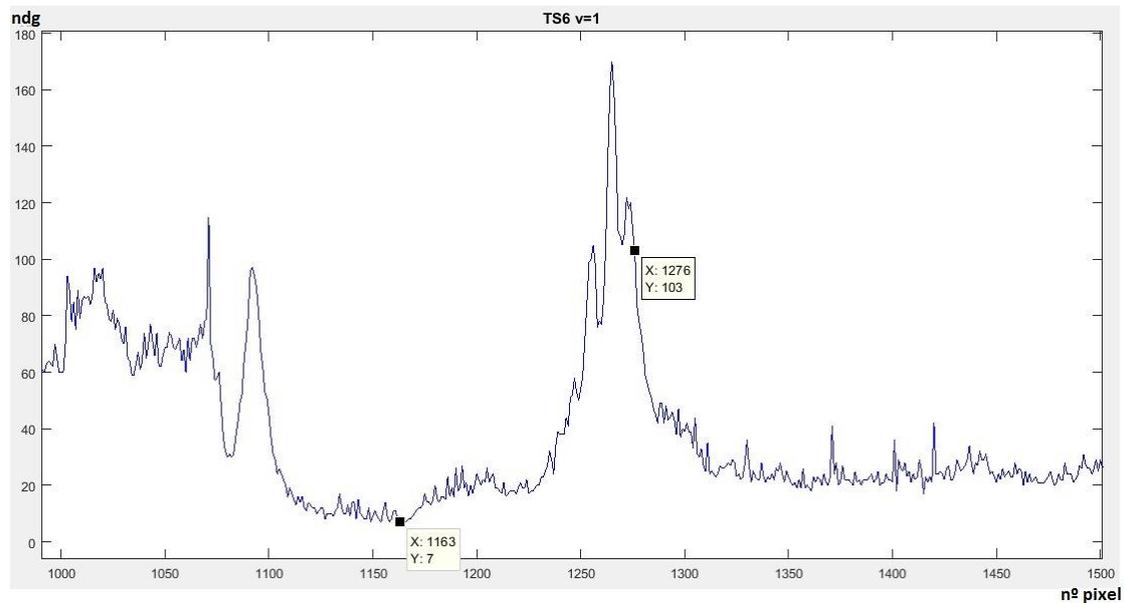


Figura 86. Gráfica del nivel de gris de TS6, u = 1

En esta gráfica al igual que en las anteriores anotamos el comienzo y final de la banda de rodadura, pero además se puede apreciar un gran descenso del nivel de gris de los píxeles comprendidos entre estos límites, ignorando los picos del final de la banda.

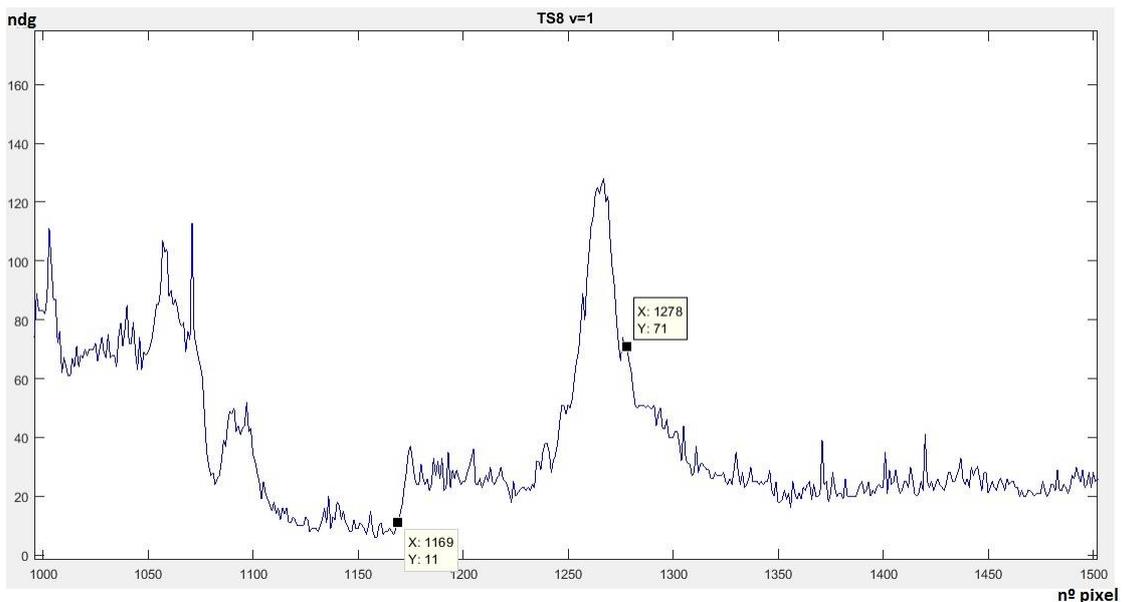


Figura 87. Gráfica del nivel de gris de TS8, u = 1



Esta pieza en cambio si presenta un nivel de gris en la banda de rodadura inferior al de una pieza catalogada como OK.

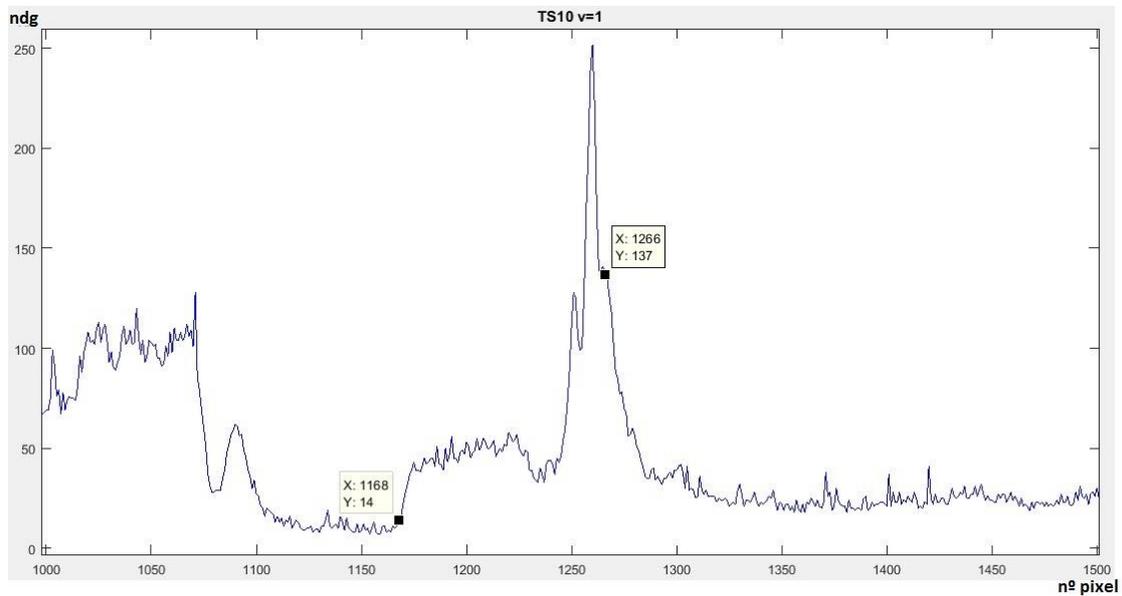


Figura 89. Gráfica del nivel de gris de TS10, u = 1

En estas dos últimas gráficas se ha anotado lo mismo, inicio y final de la banda de rodadura, de forma aproximada, y se aprecia que el nivel de gris en la mis es similar a una pieza OK.

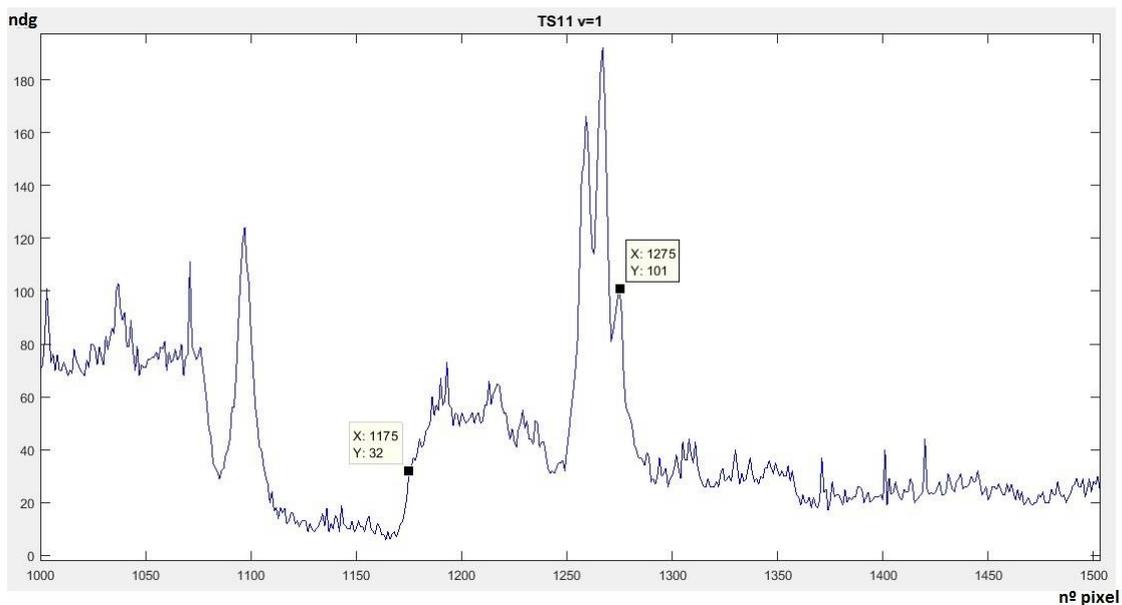


Figura 888. Gráfica del nivel de gris de TS11, u = 1

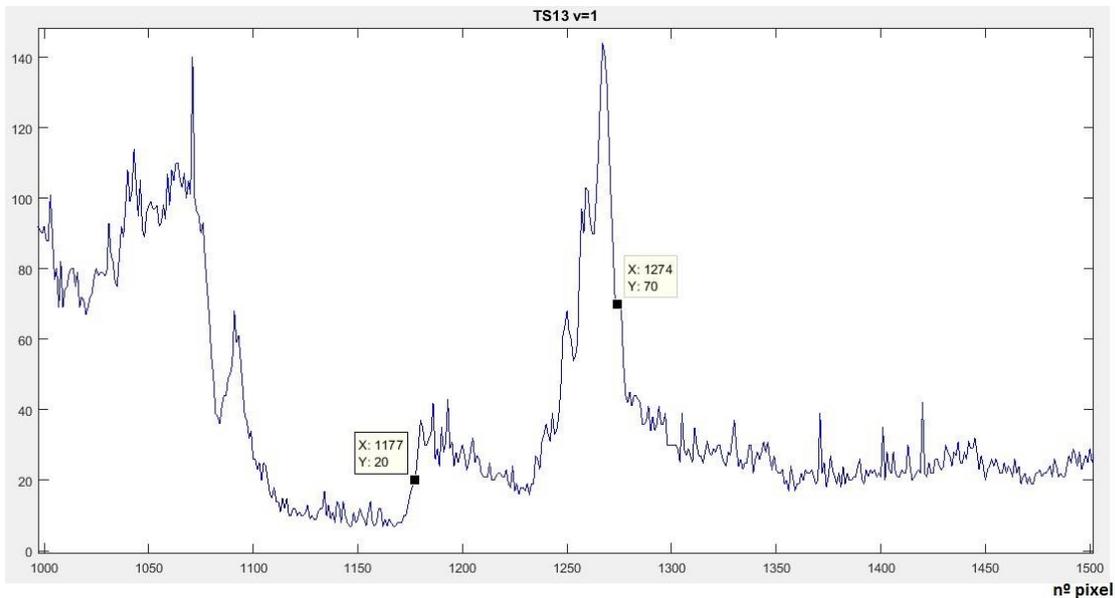


Figura 90. Gráfica del nivel de gris de TS13, u = 1

En esta gráfica se observa valores similares al caso anterior, picos poco significativos, y un valor del nivel de gris de los píxeles pertenecientes a la banda de rodadura de 40 o menos, algo que puede ser indicador de error de testa sin limpiar.

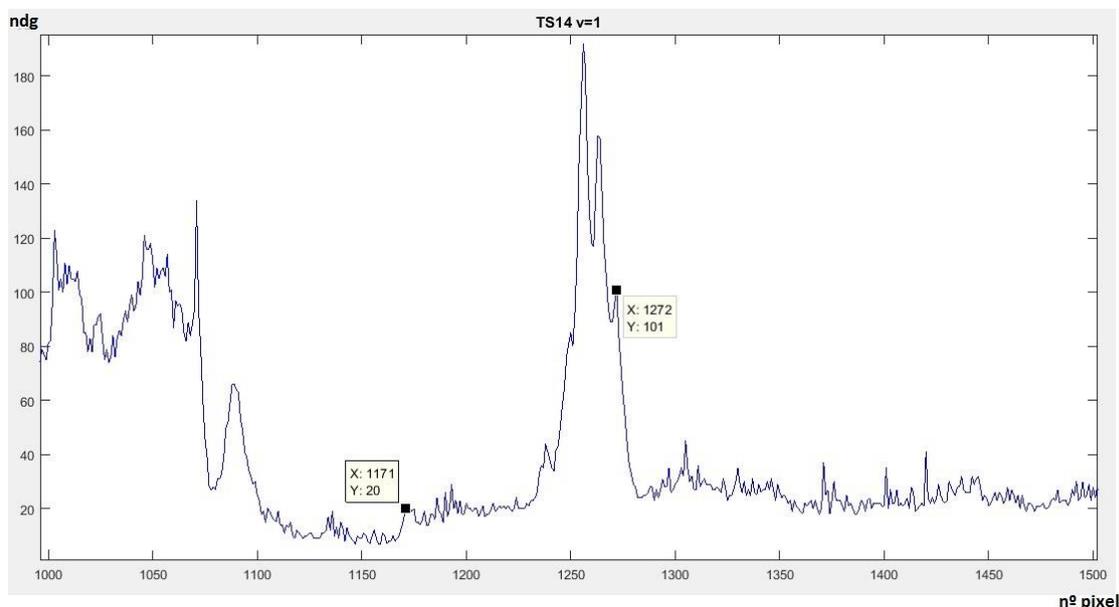


Figura 91. Gráfica del nivel de gris de TS14, u = 1

En esta última pieza del grupo observamos un nivel de gris inferior a 40, en los píxeles pertenecientes a la banda de rodadura, salvo los picos que indican el final de la misma.



En este grupo de gráficas de piezas de testa sin limpiar encontramos como indicador principal de este tipo de error que los píxeles pertenecientes a la banda de rodadura tengan un nivel inferior a los vistos en las gráficas del grupo OK, además apreciamos en algunas graficas picos que presentan una variación del nivel de gris de poca importancia y algunas piezas con graficas semejantes a piezas OK, pero que han sido catalogadas como piezas con error, lo que indica que el error no se encuentra en la zona que hemos graficado.



ANEXO V. Gráficas del histograma de la banda de rodadura.

Piezas sin error superficial (OK):

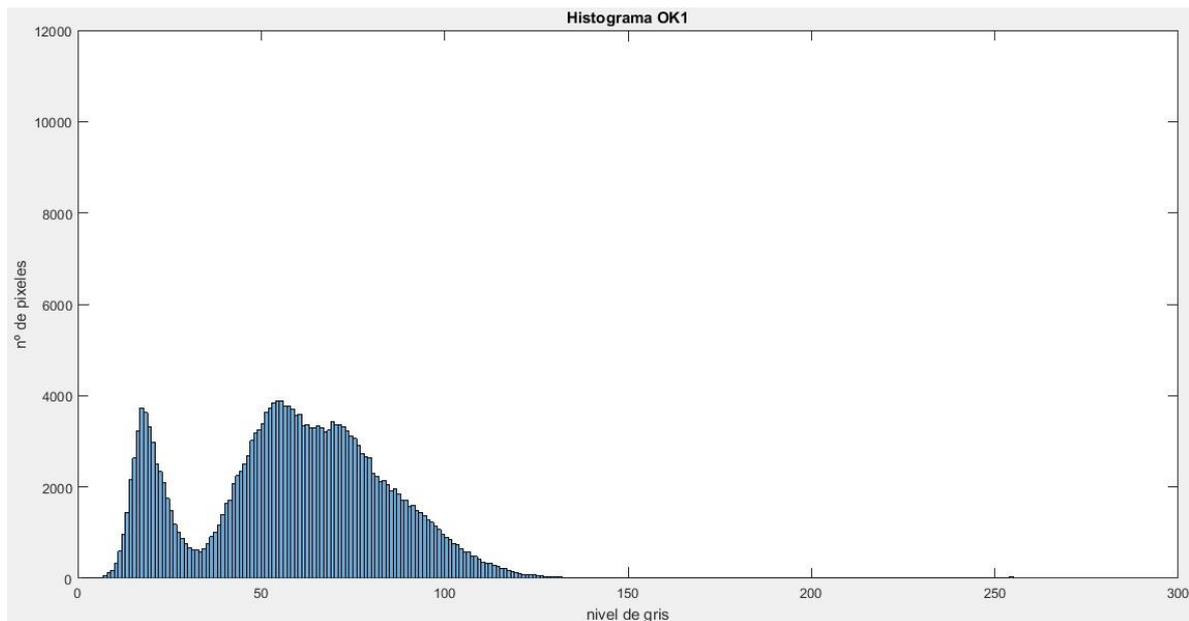


Figura 92. Histograma OK1

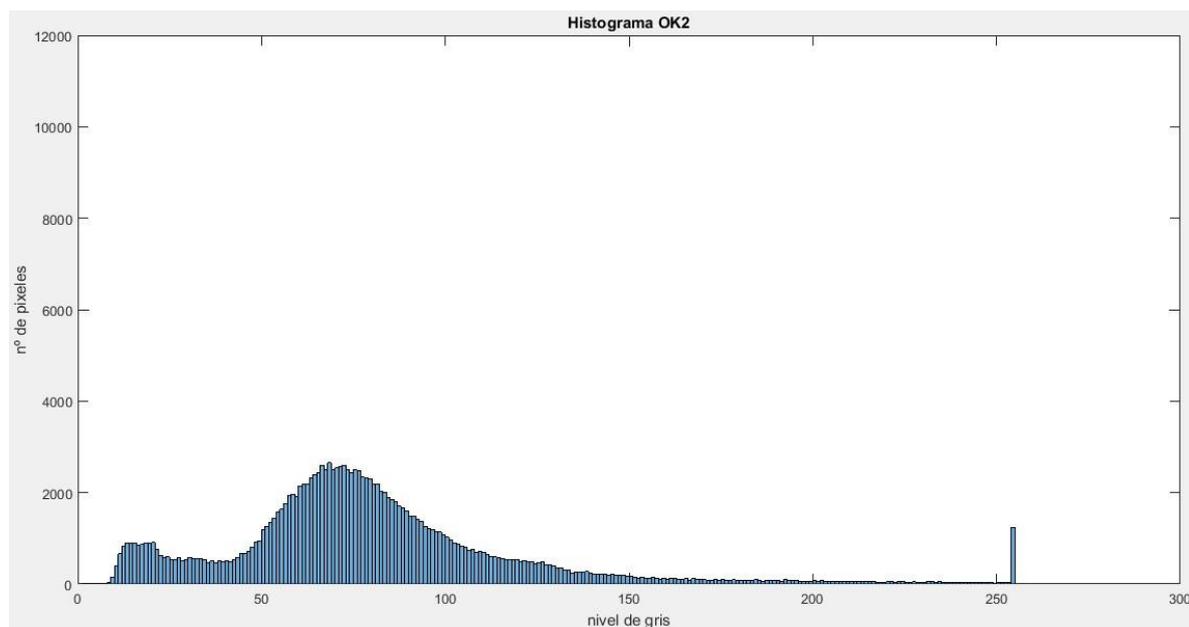


Figura 102. Histograma OK2

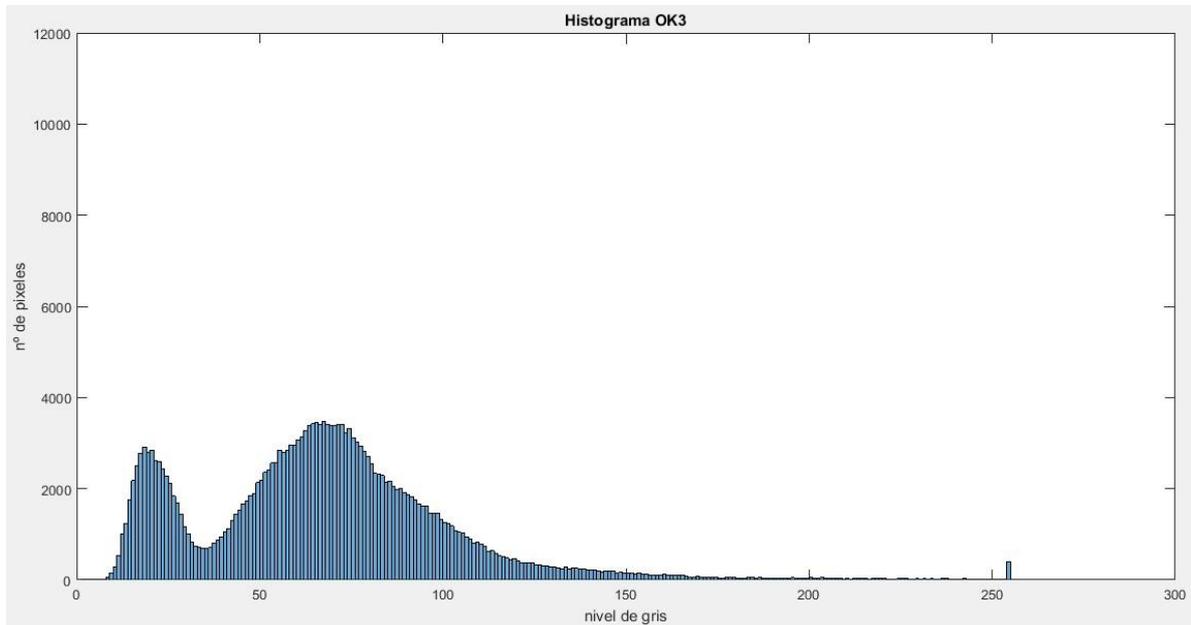


Figura 103. Histograma OK3

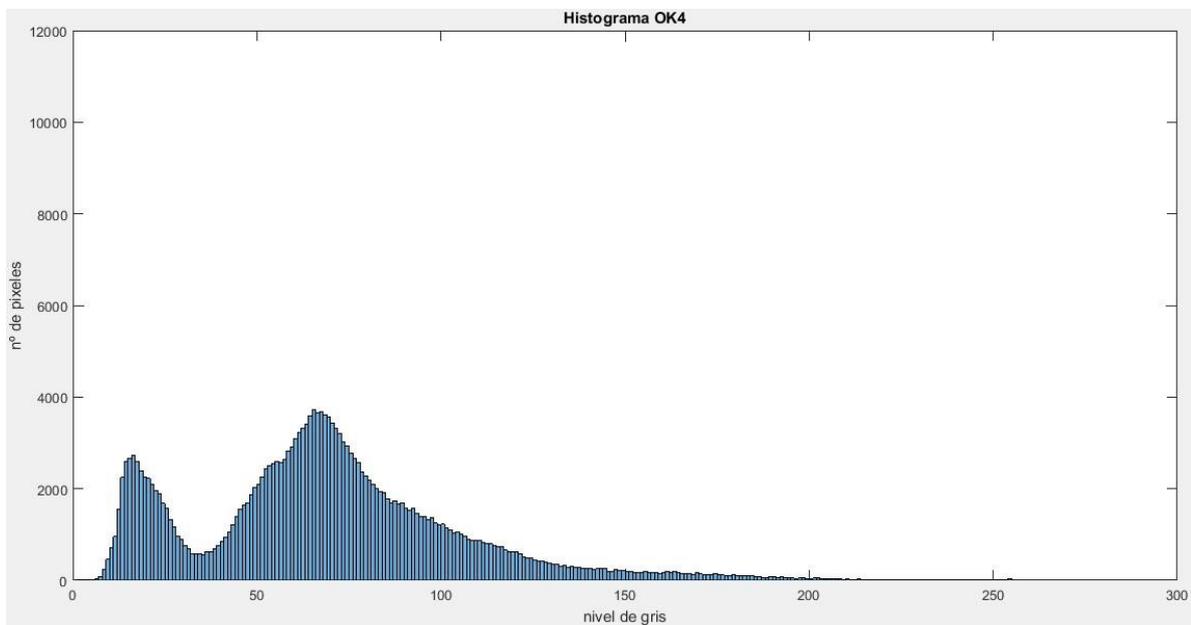


Figura 104. Histograma OK4

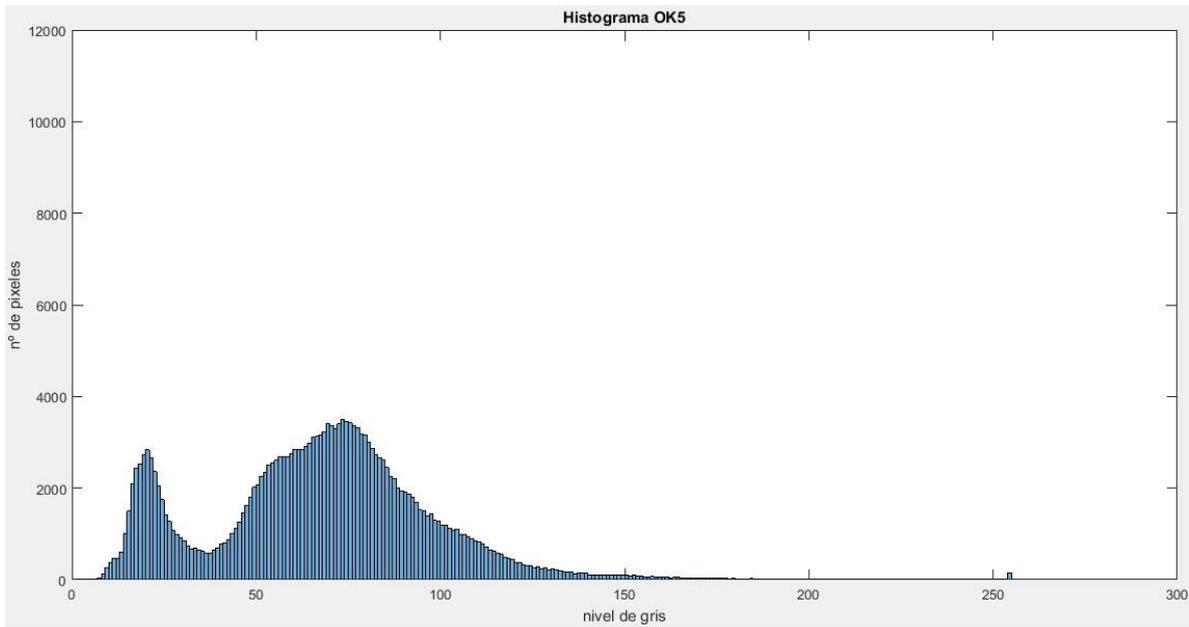


Figura 93. Histograma OK5

Piezas con retalón en testa (R):

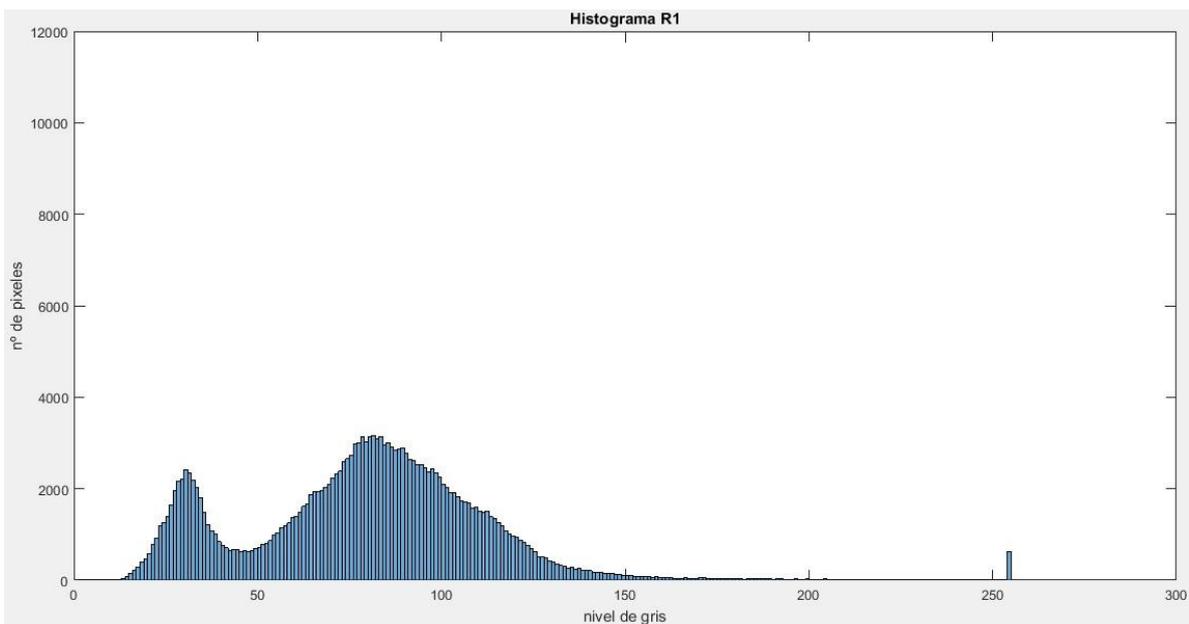


Figura 94. Histograma R1

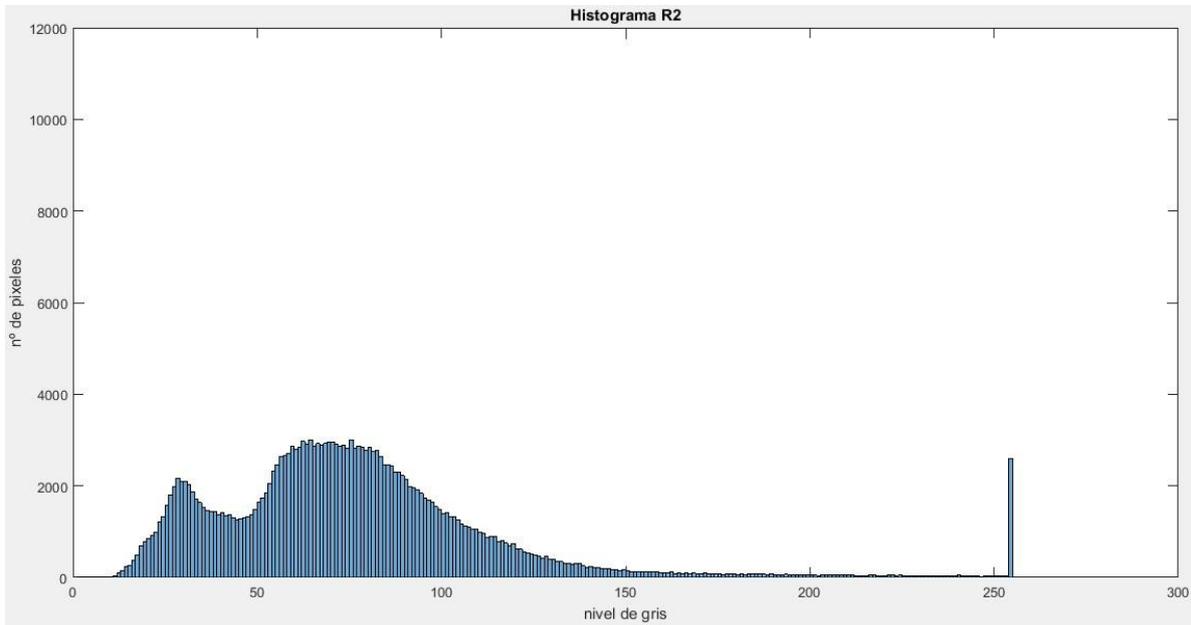


Figura 96. Histograma R2

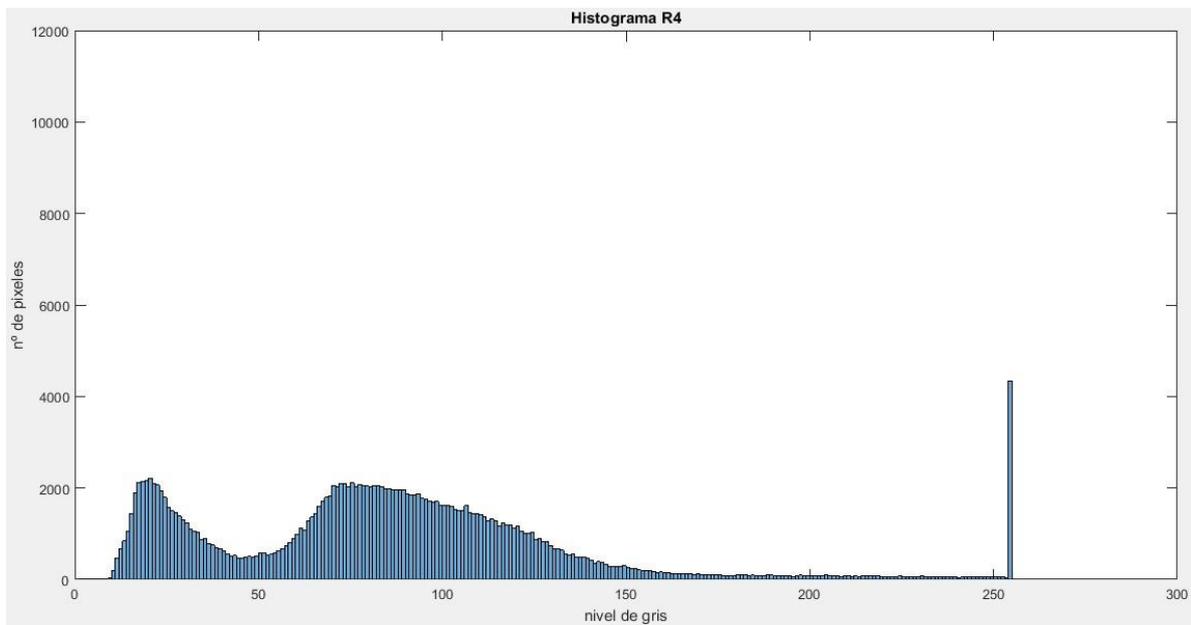


Figura 95. Histograma R4

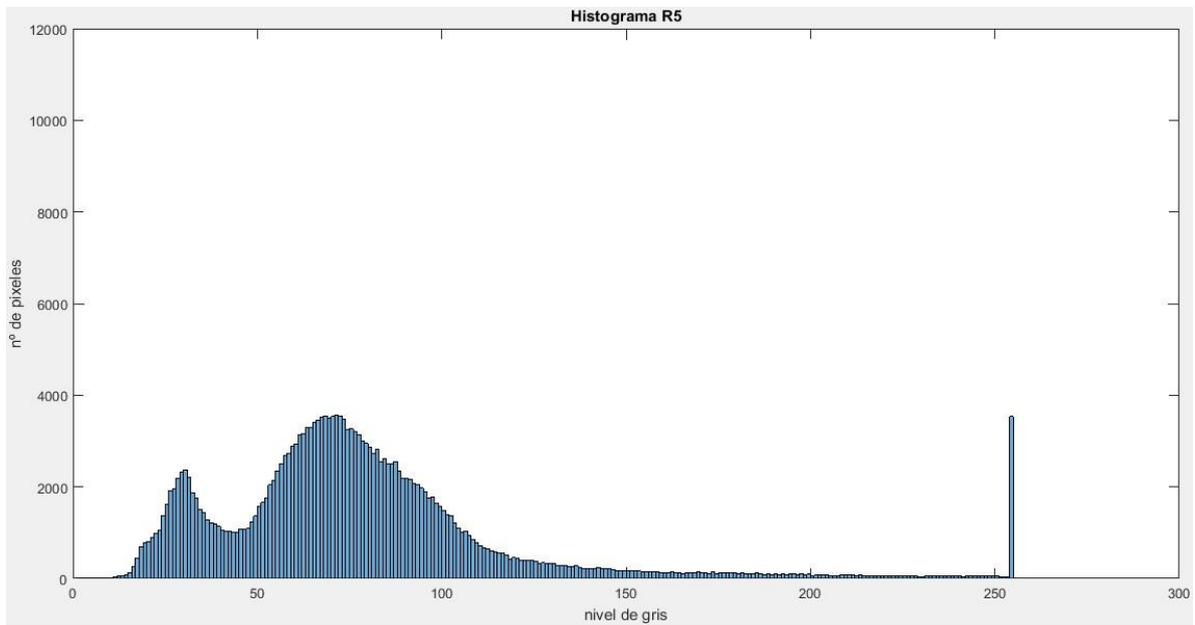


Figura 97. Histograma R5

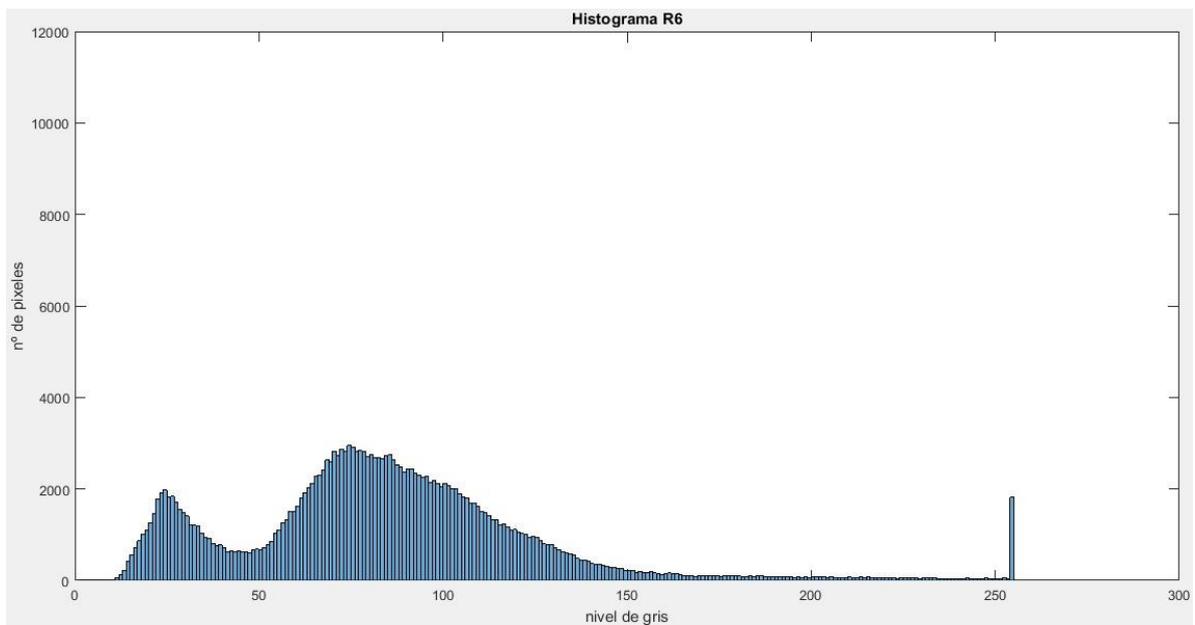


Figura 98. Histograma R6



Piezas con error de testa sin limpiar (TS):

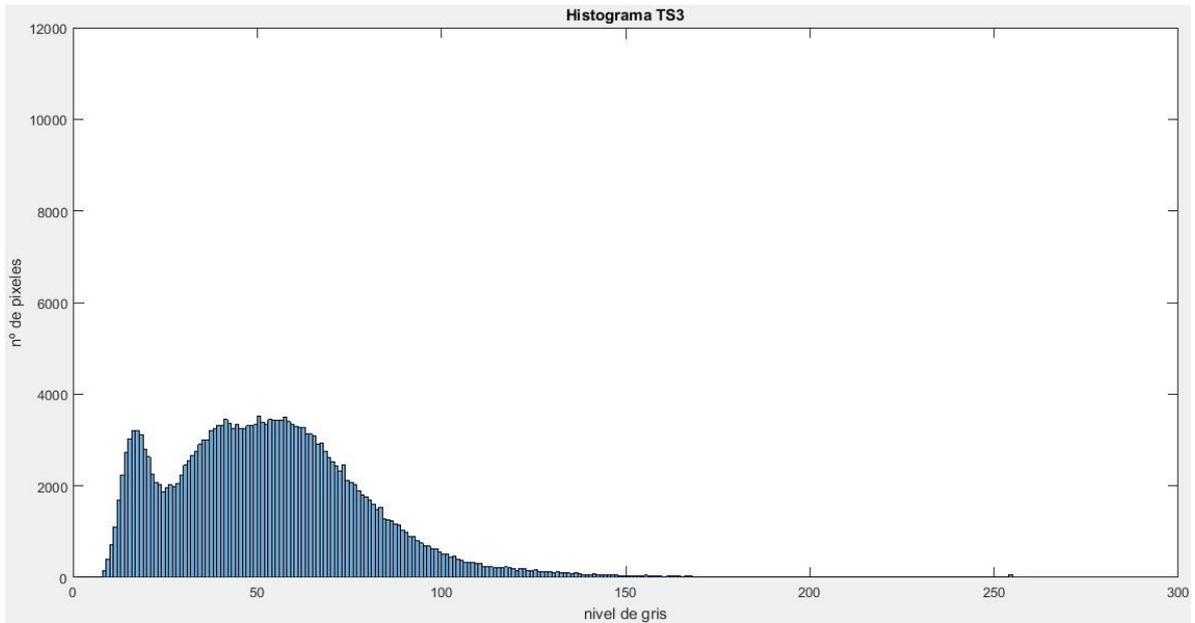


Figura 100. Histograma TS3

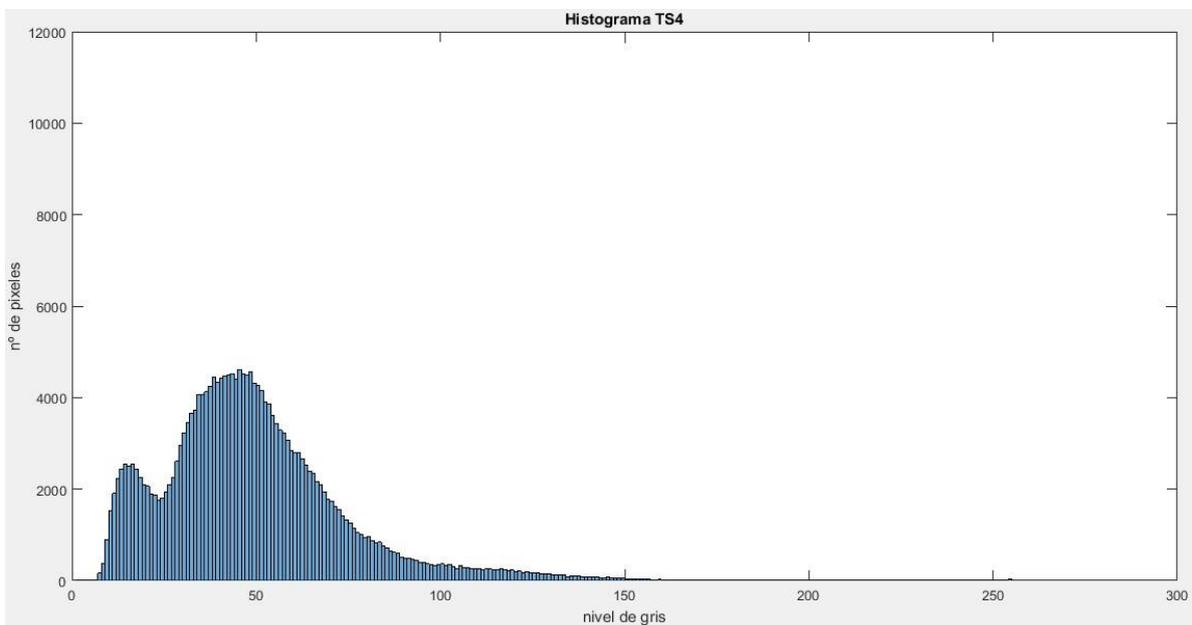


Figura 99. Histograma TS4

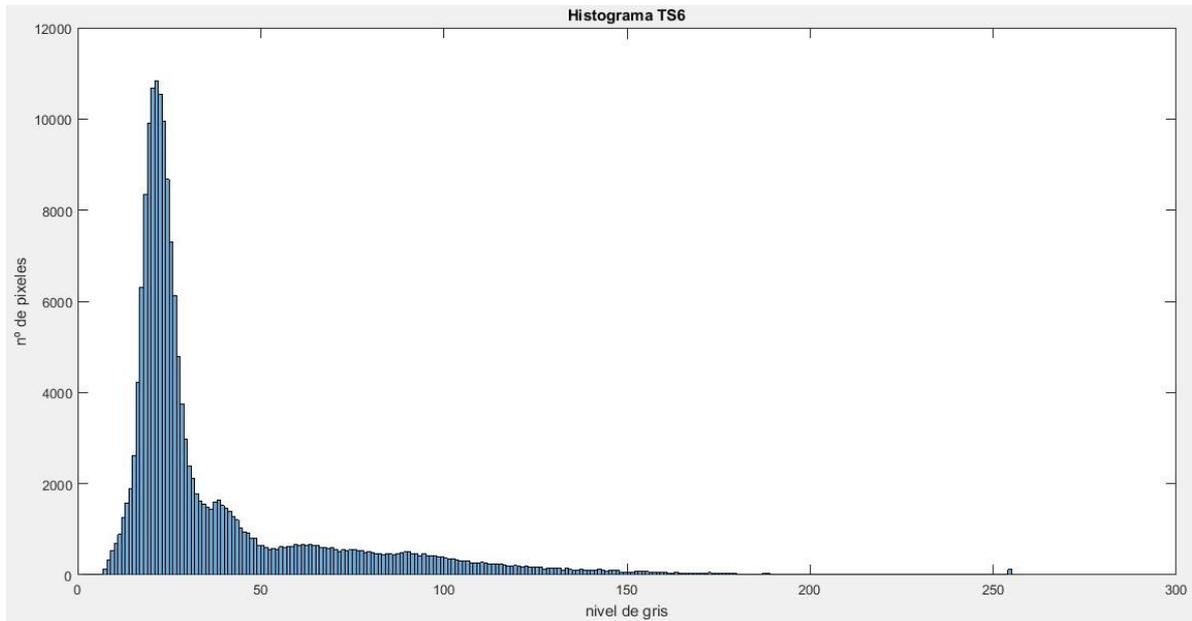


Figura 113. Histograma TS6

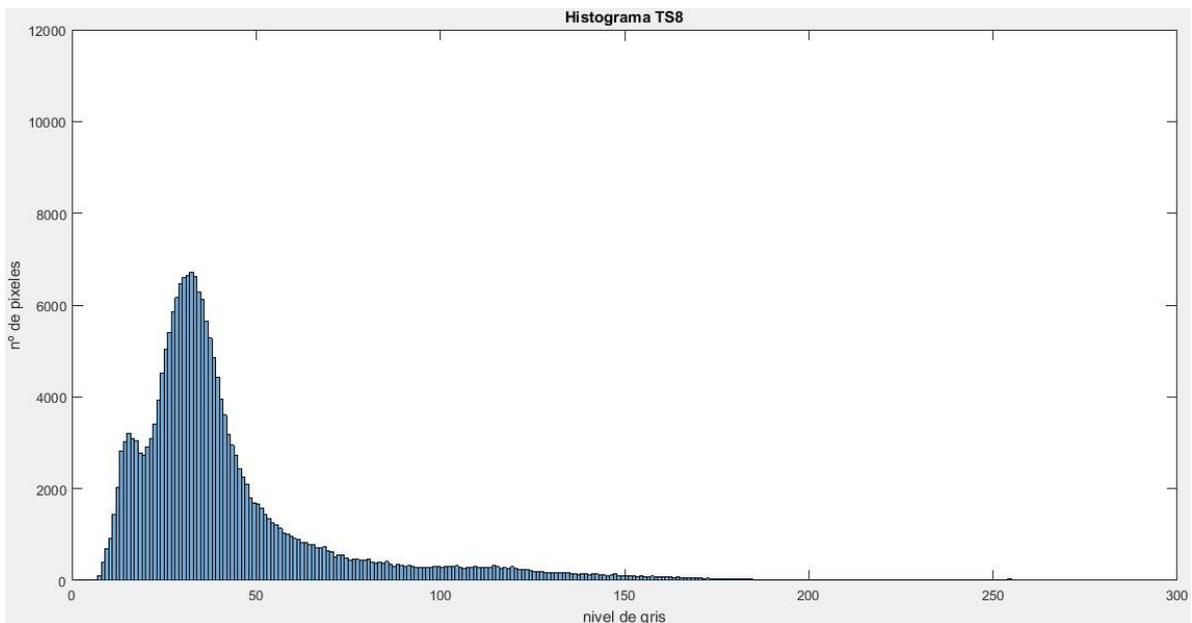


Figura 101. Histograma TS8

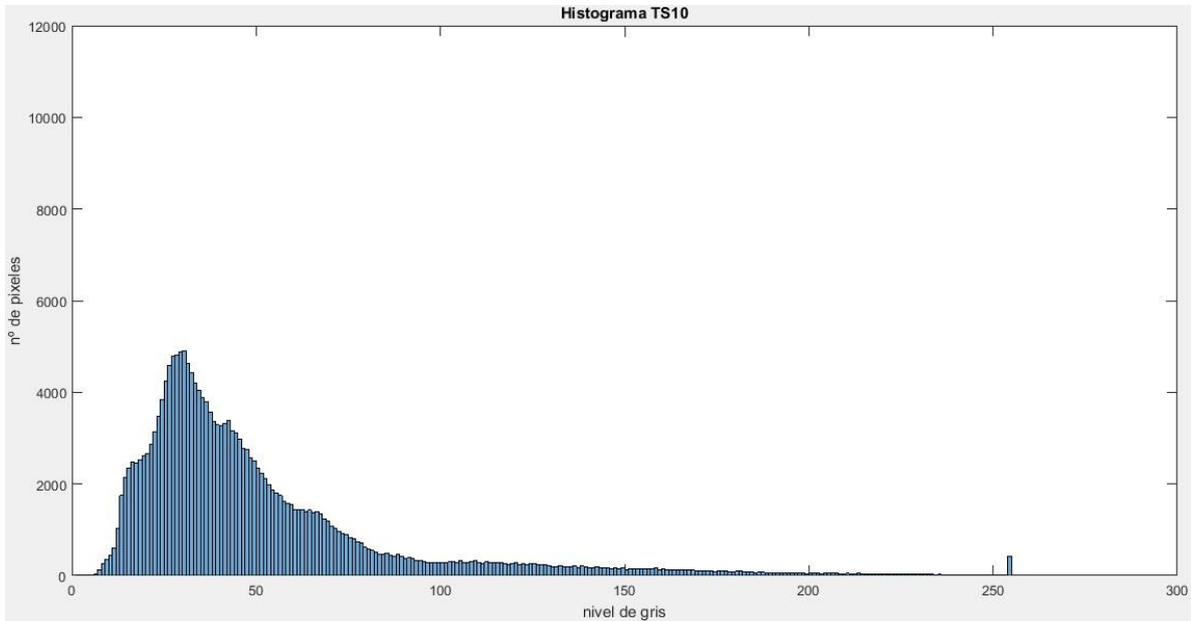


Figura 102. Histograma TS10

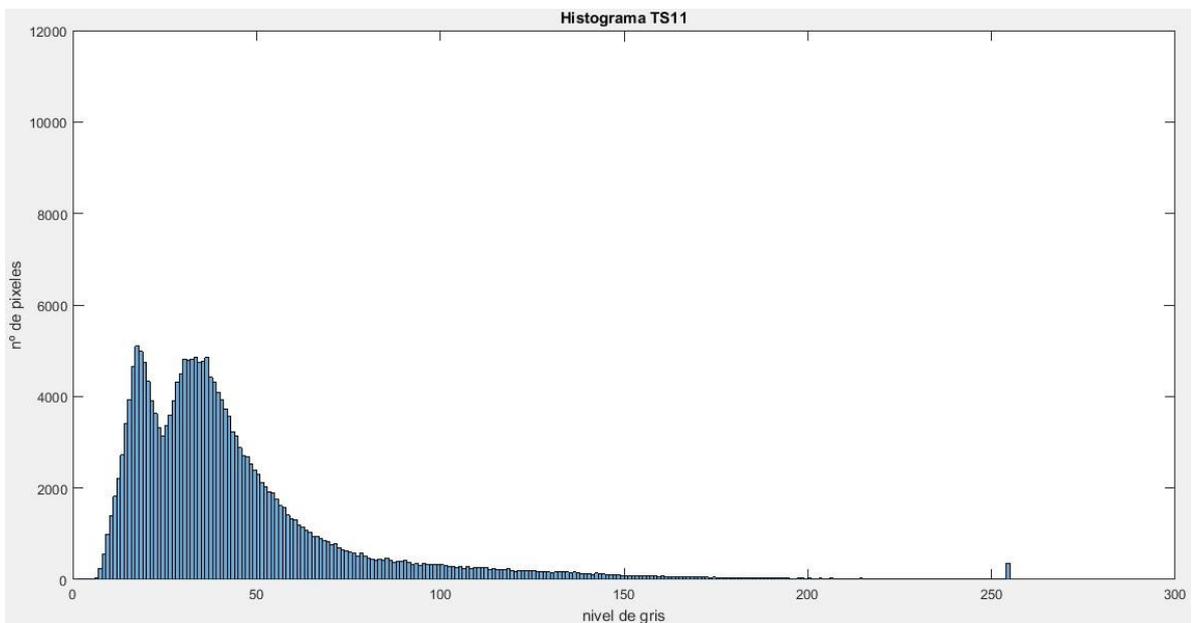


Figura 116. Histograma TS11

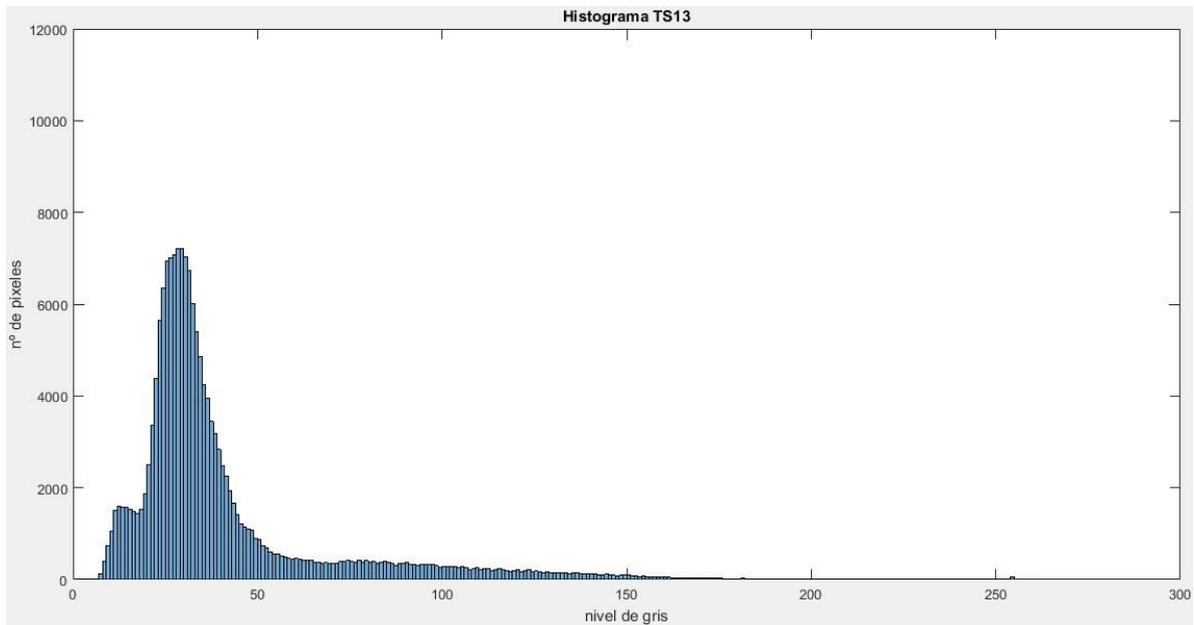


Figura 104. Histograma TS13

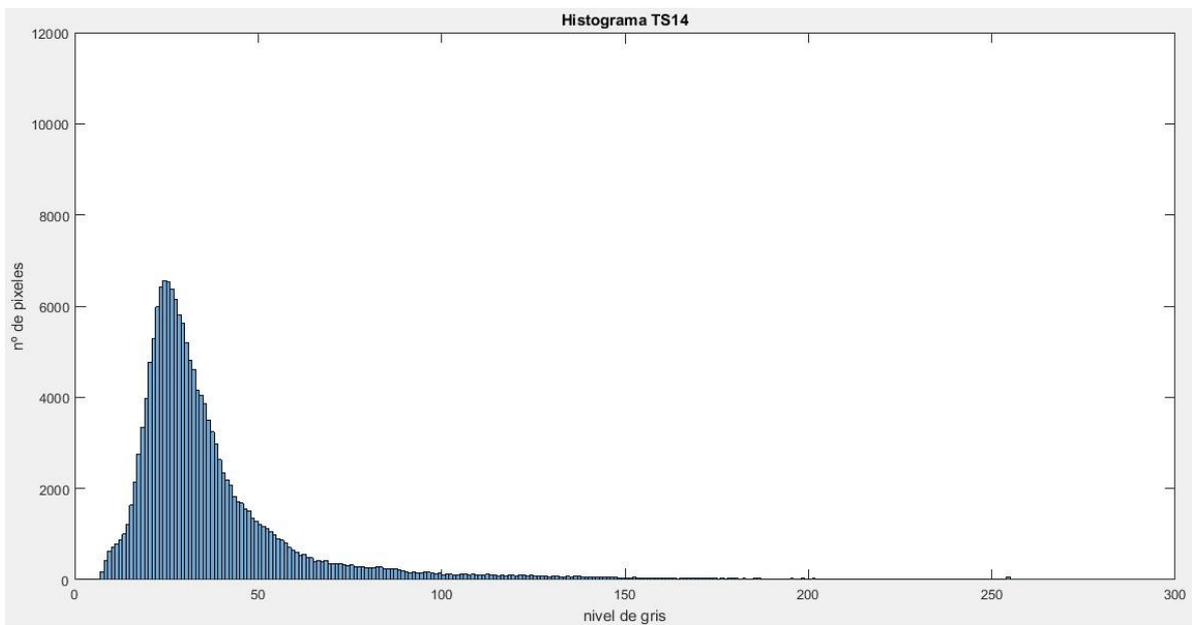


Figura 103. Histograma TS14



ANEXO VI. Código Matlab® comentado.

```
%%Estrategias de análisis de imagen para la detección de defectos
%en la superficie de rodadura de rodamientos utilizando visión
industrial.
%Módulo 1
% clc
% clear
[filename, pathname] = uigetfile({'*.bmp'}, 'Seleccione una imagen a
analizar');
image = imread(filename);

%%Módulo 2
T = graythresh (image); % Cálculo del umbral mediante el método de
Otsu
imbw = im2bw (image,T); % Paso de escala de grises a BW

% Estructuras morfológicas predefinidas para la detección de bordes

%SED = strel('octagon',9);
SED = strel('square',15) ; %Estructura empleada en el dilatamiento
de los píxeles de los bordes

SEE = strel('square',18) ; %Estructura empleada en la erosión

BWD = imdilate(imbw,SED);%Dilatación de los bordes
BWE = imerode(BWD,SEE);%Erosión de los puntos dilatados

% figure;imshow(image);title('imagen original');
% figure;imshow(imbw);title('umbralizado');
% figure;imshow(BWD);title('Dilatación de píxeles');
% figure;imshow(BWE);title('Erosión de píxeles');
%figure;imshow(BWE);title('Umbralizado punto inferior');
%Representación de la imagen segmentada

abw = BWE(:,1); %selección de la primera columna de la imagen
umbralizada

v_inicial = find(diff(abw)<0,6,'last'); %búsqueda de variación
nrgativa 0--1 Elegida
v_ini_inf = v_inicial(end,1); %punto de inicio del vector limitante
inferior

A = min (image(v_ini_inf-250:1180,1)); % ndg mínimo de la zona
superior a la banda de rodadura

imbw2 = image< (A+5); %Se le da un margen para asegurar un mínimo de
puntos activos
```



```
%figure;imshow(imbw2); % de la segunda umbralización, en este caso
dejamos activos los puntos inferiores al límite fijadp

BWD2 = imdilate(imbw2,SED);%Dilatación de los bordes
BWE2 = imerode(BWD2,SEE);%Erosión de los puntos dilatados
%figure;imshow(BWE2);title('umbral para punto inicial')

B = find(diff(BWE2(:,1))<0,6,'last'); %Busqueda del punto inicial
v_ini_sup = B(end,1);

%una vez que se tienen los dos puntos iniciales se procede a la
creación de
%los vectores que definen la banda

b_inf=ones(1,2208); %inicialización del vector inferior
u_ini=1;
u_fin=2208-1;

b_inf(1)=v_ini_inf;
v=v_ini_inf;
m=3; %número de píxeles en los que busca la mínima variación del ndg
for u=u_ini:u_fin

    f_flip=flip(image(v-m:v+m,u+1));
    [gradmin, I] = min(f_flip);
    v_gradmin=v-m+I-1;
    %v_gradmin=v+m-I+1;
    v=v_gradmin;
    b_inf(u+1)=v;
end

b_sup=ones(1,2208); %inicialización del vector inferior
u_ini=1;
u_fin=2208-1;

b_sup(1)=v_ini_sup;
v=v_ini_sup;
m=5; %número de píxeles en los que busca la mínima variación del ndg
for u=u_ini:u_fin

    f_flip=flip(image(v-m:v+m,u+1));
    [gradmin, I] = min(f_flip);

    v_gradmin=v+m-I+1;
    v=v_gradmin;
    b_sup(u+1)=v;
end
% t1=toc; % fin del contador de tiempo

% figure;imshow(image);hold
on;plot(b_sup,'r','linewidth',2);plot(b_inf,'r','linewidth',2);
%hold off; % representación de los vectores sobre la imagen original
```



```
%% Módulos 3 y 4

for i=1:2208
    image(1:b_sup(1,i),i)=0;
    image(b_inf(1,i):3000, i)=0;
end
imshow(image) %muestra la imagen recortada

[u_first, v_first] = find(diff(image)>0,1); %busqueda de las
coordenadas del 1er pixel activo
[ufind_last, vfind_last] = find(diff(image)~=0);%busqueda de todos los
pixeles activos
[u_last,I] = max(ufind_last); % coordenadas u, del ultimo pixel activo

% Dimensionado de la ventana de corte de la imagen
[x11, x2] = size(image);
x1=1;
y1 = u_first-1;
y2 = (u_last-u_first)+10;
%se crea una ventana dejando margen para no perder información

%image_crop = imcrop(image,[x1 y1 x2 y2]); %Recorte de la imagen
image_crop = image;
%figure;imshow(image_crop);

q_ini=1;
q_fin=2208;
%L2= zeros(120,2208);
[J0, K0, L0] = find(image(:,1));
%L2(:,1)=L0;

for q = q_ini:q_fin;
    [J, K, L] = find(image(:,q)); %Busqueda de valores >0
    L2(1:length(L),q)=L;
    J2(1:length(J),q)=J;
end

L3=L2(1:35,905:1304);
%L3=L2(1:45,:);
L4=L2(15:50,905:1304);
%Time=toc;

vector_ret_pks = zeros(1,2208);

vector_ret = zeros(1, 2208);
e_ini=1;
e_fin=2208;

for e=e_ini:e_fin;
    r=L2(1:35,e);
```



```
rd= double(r);

[pks,locs] = findpeaks(rd,'Npeaks',3,'SortStr','descend');
vector_ret_pks(1,e)=pks(1,1);
vector_ret(1,e) = locs(1,1);

[Jtes, Ktes, Ltes]= find(L2(:,e)<50);
vec_min50(e)=length(Ktes);
[J_med, K_med, L_med] = find(L2(:,e)); %Busqueda de valores ~=0
L_Avg(e) = mean(L_med);%media de ndg por columnan

end
LM_NDG = L_Avg(1,300:1907);
Testa_50_vec = vec_min50(1,300:1907);
RET_position= J2(1,:)+vector_ret(1,:);%primer punto de cada
columna+punto donde hay retalón

% figure;imshow(image);hold on;plot(RET_position,'r','linewidth',2);
% hold off; % representación del los vectores sobre la imagen original
```

```
%%Módulo 5
```

```
%% TESTA_MED_NDG
```

```
load('TESTA_MED_NDG.mat')
```

```
testa_results_mean = zeros(8,1608);
```

```
testa_results_mean(1,:)= Testa_Media_NDG(1,:)- Testa_Media_NDG(2,:);
testa_results_mean(2,:)= Testa_Media_NDG(1,:)- Testa_Media_NDG(3,:);
testa_results_mean(3,:)= Testa_Media_NDG(1,:)- Testa_Media_NDG(4,:);
testa_results_mean(4,:)= Testa_Media_NDG(1,:)- Testa_Media_NDG(5,:);
testa_results_mean(5,:)= Testa_Media_NDG(1,:)- Testa_Media_NDG(6,:);
testa_results_mean(6,:)= Testa_Media_NDG(1,:)- Testa_Media_NDG(7,:);
testa_results_mean(7,:)= Testa_Media_NDG(1,:)- Testa_Media_NDG(8,:);
testa_results_mean(8,:)= Testa_Media_NDG(1,:)- Testa_Media_NDG(9,:);
```

```
offset_med = 12;
```

```
[JMETS3, KMETS3, LMETS3]= find(testa_results_mean(1,:)>offset_med);
percent_METS3 = (length(KMETS3)/1608)*100;
```

```
[JMETS4, KMETS4, LMETS4]= find(testa_results_mean(2,:)>offset_med);
percent_METS4 = (length(KMETS4)/1608)*100;
```

```
[JMETS6, KMETS6, LMETS6]= find(testa_results_mean(3,:)>offset_med);
percent_METS6 = (length(KMETS6)/1608)*100;
```

```
[JMETS8, KMETS8, LMETS8]= find(testa_results_mean(4,:)>offset_med);
```



```
percent_MTS8 = (length(KMTS8)/1608)*100;

[JMTS10, KMTS10, LMTS10]= find(testa_results_mean(5,:)>offset_med);
percent_MTS10 = (length(KMTS10)/1608)*100;

[JMTS11, KMTS11, LMTS11]= find(testa_results_mean(6,:)>offset_med);
percent_MTS11 = (length(KMTS11)/1608)*100;

[JMTS13, KMTS13, LMTS13]= find(testa_results_mean(7,:)>offset_med);
percent_MTS13 = (length(KMTS13)/1608)*100;

[JMTS14, KMTS14, LMTS14]= find(testa_results_mean(8,:)>offset_med);
percent_MTS14 = (length(KMTS14)/1608)*100;

Testa_percent_med_ndg= zeros(8,1);
Testa_percent_med_ndg(1,1)= percent_MTS3;
Testa_percent_med_ndg(2,1)= percent_MTS4;
Testa_percent_med_ndg(3,1)= percent_MTS6;
Testa_percent_med_ndg(4,1)= percent_MTS8;
Testa_percent_med_ndg(5,1)= percent_MTS10;
Testa_percent_med_ndg(6,1)= percent_MTS11;
Testa_percent_med_ndg(7,1)= percent_MTS13;
Testa_percent_med_ndg(8,1)= percent_MTS14;

%% Position Testa MED

testa_results_mean_pos(1,:)= Testa_Media_NDG(1,:)- LM_NDG(1,:);

[JMTSpos, KMTSpos, LMTSpos]=
find(testa_results_mean_pos(1,:)>offset_med);
percent_MEAN_TESTA = (length(KMTSpos)/1608)*100;

m_ini=1;
m_fin= 1608;

for m = m_ini:m_fin;
    ktest_pos= testa_results_mean_pos(1,m)>offset_med;
    k_testa(m) = ktest_pos;
end

Testa_position_1 = J2(:,300:1907);

for s = 1:1:1608;
    Position-Ta = k_testa(1,s)*Testa_position_1(1,s);
    Position_TF(s) = Position-Ta;
end
```



```
POS_TES_F=zeros(1,2208);
POS_TES_F(1,300:1907)= Position_TF;

% image2 = imread ('TS4_f12+1.5_texp500_G0_I31_d55_1.bmp');
% figure;imshow(image2);hold on;plot(POS_TES_F,'m.','linewidth',4);
% hold off;

%% TESTA_NDG50

load('TESTA_NDG50.mat')

testa_results_50 = zeros(8,1608);

testa_results_50(1,:)= TESTA_n50(2,:)- TESTA_n50(1,:);
testa_results_50(2,:)= TESTA_n50(3,:)- TESTA_n50(1,:);
testa_results_50(3,:)= TESTA_n50(4,:)- TESTA_n50(1,:);
testa_results_50(4,:)= TESTA_n50(5,:)- TESTA_n50(1,:);
testa_results_50(5,:)= TESTA_n50(6,:)- TESTA_n50(1,:);
testa_results_50(6,:)= TESTA_n50(7,:)- TESTA_n50(1,:);
testa_results_50(7,:)= TESTA_n50(8,:)- TESTA_n50(1,:);
testa_results_50(8,:)= TESTA_n50(9,:)- TESTA_n50(1,:);

offset_n50 = 26;

[J50TS3, K50TS3, L50S3]= find(testa_results_50(1,:)>offset_n50);
percent_50TS3 = (length(K50TS3)/1608)*100;

[J50TS4, K50TS4, L50TS4]= find(testa_results_50(2,:)>offset_n50);
percent_50TS4 = (length(K50TS4)/1608)*100;

[J50TS6, K50TS6, L50TS6]= find(testa_results_50(3,:)>offset_n50);
percent_50TS6 = (length(K50TS6)/1608)*100;

[J50TS8, K50TS8, L50TS8]= find(testa_results_50(4,:)>offset_n50);
percent_50TS8 = (length(K50TS8)/1608)*100;

[J50TS10, K50TS10, L50TS10]= find(testa_results_50(5,:)>offset_n50);
percent_50TS10 = (length(K50TS10)/1608)*100;

[J50TS11, K50TS11, L50TS11]= find(testa_results_50(6,:)>offset_n50);
percent_50TS11 = (length(K50TS11)/1608)*100;

[J50TS13, K50TS13, L50TS13]= find(testa_results_50(7,:)>offset_n50);
percent_50TS13 = (length(K50TS13)/1608)*100;

[J50TS14, K50TS14, L50TS14]= find(testa_results_50(8,:)>offset_n50);
percent_50TS14 = (length(K50TS14)/1608)*100;

Testa_percent_ndg50= zeros(8,1);
Testa_percent_ndg50(1,1)= percent_50TS3;
Testa_percent_ndg50(2,1)= percent_50TS4;
```



```
Testa_percent_ndg50(3,1)= percent_50TS6;  
Testa_percent_ndg50(4,1)= percent_50TS8;  
Testa_percent_ndg50(5,1)= percent_50TS10;  
Testa_percent_ndg50(6,1)= percent_50TS11;  
Testa_percent_ndg50(7,1)= percent_50TS13;  
Testa_percent_ndg50(8,1)= percent_50TS14;  
  
%% Position Testa  
  
testa_results_50_pos(1,:)= Testa_50_vec(1,:)-TESTA_n50(1,:);  
  
[JTESTA50, KTESTA50, LTESTA50]=  
find(testa_results_50_pos(1,:)>offset_n50);  
percent_TESTA50 = (length(KTESTA50)/1608)*100;  
  
m_ini=1;  
m_fin= 1608;  
  
for m = m_ini:m_fin;  
    ktest_50_pos= testa_results_50_pos(1,m)>offset_n50;  
    k_testa50(m) = ktest_50_pos;  
end  
  
Testa_position_50_1 = J2(:,300:1907);  
  
for s = 1:1:1608;  
    Position_T50a = k_testa50(1,s)*Testa_position_50_1(1,s);  
    Position_TF50(s) = Position_T50a;  
end  
  
POS_TES_F50=zeros(1,2208);  
POS_TES_F50(1,300:1907)= Position_TF50;  
  
% image2 = imread ('TS8_f12+1.5_texp500_G0_I31_d55_2.bmp');  
% figure;imshow(image2);hold on;plot(POS_TES_F50,'m.','linewidth',4);  
% hold off;  
  


---

  
%%Módulo 6  
  
%% Calculo filtro GAUSSIANO  
vector_CALC_Ret = vector_ret_pks(1,300:1907);  
  
vector_G = vector_CALC_Ret;  
%plot(vector_G, 'r-', 'linewidth', 2);  
%set(gcf, 'Position', get(0,'ScreenSize')); % Maximize figure.
```



```
% Construct blurring window.
windowWidth = int16(5);
halfWidth = windowWidth / 2;
gaussFilter = gausswin(120);
gaussFilter = gaussFilter / sum(gaussFilter); % Normalize.

% Do the blur.
smoothVector = conv(vector_G, gaussFilter, 'same');
%plot it.
% hold on;
% plot(smoothVector(halfWidth:end-halfWidth), 'b-', 'linewidth', 3);
%
% Desv_smoothVector = std(smoothVector);
%
%
% hold off

%% Calculo directo retalon
load('DATOS_RETALON_1600.mat')

results_retalon = zeros(5,1608);

results_retalon(1,:) = DATA_RET(2,:) - DATA_RET(1,:);
results_retalon(2,:) = DATA_RET(3,:) - DATA_RET(1,:);
results_retalon(3,:) = DATA_RET(4,:) - DATA_RET(1,:);
results_retalon(4,:) = DATA_RET(5,:) - DATA_RET(1,:);
results_retalon(5,:) = DATA_RET(6,:) - DATA_RET(1,:);

positivos=find(results_retalon(3,*)>0); %Busqueda de valores ~=0
POSITIVOS_R4= results_retalon(3,positivos);
MEANPOSR4=mean(POSITIVOS_R4);

offset_ret = MEANPOSR4+10;
[JR1, KR1, LR1]= find(results_retalon(1,*)>offset_ret);
percent_R1 = (length(KR1)/1608)*100;

[JR2, KR2, LR2]= find(results_retalon(2,*)>offset_ret);
percent_R2 = (length(KR2)/1608)*100;

[JR4, KR4, LR4]= find(results_retalon(3,*)>offset_ret);
percent_R4 = (length(KR4)/1608)*100;

[JR5, KR5, LR5]= find(results_retalon(4,*)>offset_ret);
percent_R5 = (length(KR5)/1608)*100;

[JR6, KR6, LR6]= find(results_retalon(5,*)>offset_ret);
percent_R6 = (length(KR6)/1608)*100;
```



```
Percent_results= zeros(5,1);
Percent_results(1,1)= percent_R1;
Percent_results(2,1)= percent_R2;
Percent_results(3,1)= percent_R4;
Percent_results(4,1)= percent_R5;
Percent_results(5,1)= percent_R6;

Percent_ret_direct_a = vector_CALC_Ret(1,:)-DATA_RET(1,:);
[JRdirect, KRdirect, LRdirect]=
find(Percent_ret_direct_a(1,:)>offset_ret);
percent_Rdirect = (length(KRdirect)/1608)*100;

%% Posición retalon en imagen

diff_results_retalon = vector_CALC_Ret(1,:)- DATA_RET(1,:);
m_ini=1;
m_fin= 1608;

for m = m_ini:m_fin;
    k_pos= diff_results_retalon(1,m)>offset_ret;
    k_RET(m) = k_pos;
end
% plot(k_RET)

RET_position_R1_limited = J2(1,300:1907)+vector_ret(1,300:1907);

for s = 1:1:1608;
    Position_R1a = k_RET(1,s)*RET_position_R1_limited(1,s);
    Position_R1(s) = Position_R1a;
end

POS_TR_R1=zeros(1,2208);
POS_TR_R1(1,300:1907)= Position_R1;
%
% figure;imshow(image);hold on;plot(POS_TR_R1,'m+', 'linewidth',4);
% hold off; % representación del los vectores sobre la imagen
original

%% Calculo retalon zonas oscuras

Diff_GAUSS = smoothVector(1,:)- vector_CALC_Ret(1,:);

for g= 1:1608;

    if Diff_GAUSS(1,g)>0;
        Result_Position(1,g)= 1*vector_CALC_Ret(1,g);
    else Diff_GAUSS(1,g)<0;
        Result_Position(1,g)= 0;
    end
end
% smoothVector
% vector_CALC_Ret
```



```
positivos_Ret=find(Result_Position(1,:)>0);
ncolumns = length(positivos_Ret);
results_retaion_position= Result_Position(1,:)-DATA_RET(1,:);

[JR_Pos, KR_Pos, LR_Pos]=
find(results_retaion_position(1,:)>offset_ret);

percent_Ret_Pos = (length(KR_Pos)/ncolumns)*100;

m_ini=1;
m_fin= 1608;

for m = m_ini:m_fin;
    kr_pos2= results_retaion_position(1,m)>offset_ret;
    k_RET222(m) = kr_pos2;
end

RET_position_R_Dark = J2(1,300:1907)+vector_ret(1,300:1907);

for s = 1:1:1608;
    Position_RDa = k_RET222(1,s)*RET_position_R_Dark(1,s);
    Position_RD(s) = Position_RDa;
end

POS_TR_RD=zeros(1,2208);
POS_TR_RD(1,300:1907)= Position_RD;

% figure;imshow(image);hold on;plot(POS_TR_RD,'m','linewidth',4);
% hold off;
end



---



%%Módulo 7

%% Resultado

FINAL_RESULT = zeros(4,1);
FINAL_RESULT(1,1) = percent_Rdirect;
FINAL_RESULT(2,1) = percent_Ret_Pos;
FINAL_RESULT(3,1) = percent_MEAN_TESTA;
FINAL_RESULT(4,1) = percent_TESTA50;

TIME = toc;
```