

# MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA MECÁNICA

## TRABAJO FIN DE MÁSTER

***ESTUDIO DEL REPERFILADO Y REAVIVADO DE  
MUELAS DE DIAMANTE CON AGLOMERANTE  
TIPO RESINA MEDIANTE SIC Y TANTALIO***

<b>Estudiante</b>	<i>Muñoz, Paredes, Arkaitz</i>
<b>Director</b>	<i>Sánchez, Galíndez, José Antonio</i>
<b>Codirectora</b>	<i>Godino, Fernández, Leire</i>
<b>Departamento</b>	<i>Ingeniería Mecánica</i>
<b>Curso académico</b>	<i>2020/2021</i>

*Bilbao, 11, 05, 2021*

---

## Índice

Índice.....	2
1. Resumen.....	6
1.1. Castellano.....	6
1.2. Euskera.....	8
1.3. English.....	9
2. Lista de tablas, Figuras y Nomenclatura.....	10
2.1. Lista de Tablas.....	10
2.2. Lista de Figuras.....	11
2.3. Nomenclatura.....	16
3. Introducción.....	19
3.1. Contexto.....	19
3.2. Descripción del problema.....	20
3.3. Objetivos.....	21
3.4. Beneficios.....	21
4. Alternativas para la solución del problema.....	23
4.1. Métodos Mecánicos.....	23
4.1.1. Diamantado convencional con herramientas rotativas.....	24
4.1.2. Combinación reperfilado con moleta de abrasivo convencional y reavivado con stick de corindón.....	25
4.1.3. Diamantado “Crush” con aglomerante frágil.....	26
4.2. Métodos electro-físicos.....	28
4.2.1. Diamantado in situ por electroerosión de corte por hilo (IWEDD).....	28
4.3. Métodos por emisión.....	29
4.3.1. Diamantado por haz de láser.....	30
4.3.2. Diamantado por chorro de agua abrasiva.....	30
4.4. Métodos Híbridos.....	31
4.4.1. Diamantado por ultrasonidos.....	32
4.5. Solución adoptada.....	33
5. Estado del arte.....	35
5.1. Muelas de diamante con aglomerante tipo resina.....	35
5.1.1. Material superabrasivo: Diamante.....	35

---

5.1.2. Aglomerante: Resina .....	37
5.1.2.1. Aglomerante plástico .....	38
5.1.2.2. Resina fenólica .....	38
5.1.2.3. Resina poliimida .....	38
5.2. Combinación reperfilado con moleta de abrasivo convencional y reavivado con stick de corindón .....	40
5.2.1. Reperfilado .....	42
5.2.2. Reavivado .....	51
5.2.3. Análisis topográfico .....	54
5.2.4. Mecanismo de arranque .....	55
5.2.5. Influencia en el rectificado .....	57
6. Banco de ensayos experimental .....	59
6.1. Descripción de fases, protocolo de ensayos y equipos .....	59
6.1.1. Descripción de fases y metodología .....	59
6.1.2. Descripción de equipos .....	61
6.1.2.1. Muela abrasiva, Diamantadores rotativos / Moletas y Stick de Tantalio .....	61
6.1.2.2. Herramientas auxiliares: Bloque de grafito y Moleta de corindón blanco .....	63
6.1.2.3. Rectificadora cilíndrica FG600S de DANOBAT .....	64
6.1.2.4. Sistema de refrigeración .....	64
6.1.2.5. Microscopio Digital Dino-Lite AM7515MZTL EDGE .....	65
6.1.2.6. Motor 1,5 kW ER11 220V / Variador de frecuencia Huanyang .....	66
6.1.2.7. Acoplamiento del eje motor y platillo de seguridad .....	67
6.2. Desarrollo de procedimientos .....	67
6.2.1. Puesta a punto del banco de ensayos (Fase 0) .....	67
6.2.1.1. Elección del accionamiento .....	67
6.2.1.2. Montaje en máquina .....	69
6.2.1.3. Acondicionamiento de las moletas .....	71
6.2.2. El proceso de reperfilado (Fase 1) .....	72
7. Desarrollo de un método de evaluación del estado general de la muela abrasiva	76
7.1. Evaluación de la superficie .....	76
7.1.1. Variación de la concentración de grano .....	78
7.1.2. Salto de grano .....	82
7.1.3. Seguimiento de grano .....	83
7.2. Evaluación de la geometría .....	85

8.	Discusión de resultados.....	87
8.1.	Bloque de ensayos SiC H – 1º .....	87
8.1.1.	Evaluación de la superficie después de 10 pasadas de SiC H – 1º.....	88
8.1.2.	Evaluación de la superficie después de 20 pasadas de SiC H – 1º.....	89
8.1.3.	Evaluación de la superficie después de 30 pasadas de SiC H – 1º.....	91
8.1.4.	Evaluación de la superficie después de 40 pasadas de SiC H – 1º.....	92
8.1.5.	Evaluación de la superficie después de 50 pasadas de SiC H – 1º.....	93
8.1.6.	Análisis de la geometría SiC H – 1º .....	94
8.1.7.	Discusión de resultados SiC H – 1º.....	94
8.2.	Bloque de ensayos SiC J – 1º .....	100
8.3.	Bloque de ensayos Tantalio – 1º.....	104
8.4.	Bloque de ensayos Tantalio - DIACUT .....	109
8.5.	Bloque de ensayos SiC H – 2º .....	113
8.6.	Bloque de ensayos SiC J – 2º .....	117
8.7.	Comparativa entre los distintos reperfilados .....	121
8.7.1.	Concentración de granos.....	121
8.7.2.	Estudio del comportamiento de los granos.....	122
8.7.3.	Evaluación de la geometría.....	124
9.	Conclusiones y líneas futuras .....	125
10.	Bibliografía.....	129
11.	Anexos .....	131
	ANEXO I: Introducción a los parámetros del diamantado .....	131
I.1.	Ratio de solapamiento $Ud$ .....	131
I.2.	Ratio de afilado $\gamma d$ .....	132
I.3.	Profundidad de pasada $aed$ .....	133
I.4.	Ratio de velocidades del diamantado $qd$ .....	133
I.5.	Ratio de diamantado $Gd$ .....	134
	ANEXO II: Cálculo de resultados.....	135
II.1.	Bloque de ensayos SiC J – 1º.....	135
II.1.1.	Evaluación de la superficie después de 10 pasadas de SiC J – 1º.....	136
II.1.2.	Evaluación de la superficie después de 20 pasadas de SiC J – 1º.....	137
II.1.3.	Evaluación de la superficie después de 30 pasadas de SiC J – 1º.....	138
II.1.4.	Evaluación de la superficie después de 40 pasadas de SiC J – 1º.....	139
II.1.5.	Evaluación de la superficie después de 50 pasadas de SiC J – 1º.....	140
II.1.6.	Análisis de la geometría SiC J – 1º.....	141
II.2.	Bloque de ensayos Tantalio - 1º .....	141

---

II.2.1. Evaluación de la superficie después de 10 pasadas de Tantalio – 1º ...	143
II.2.2. Evaluación de la superficie después de 20 pasadas de Tantalio – 1º ...	144
II.2.3. Evaluación de la superficie después de 30 pasadas de Tantalio – 1º ...	145
II.2.4. Evaluación de la superficie después 40 pasadas de Tantalio – 1º.....	146
II.2.5. Evaluación de la superficie después de 50 pasadas de Tantalio – 1º ...	147
II.2.6. Análisis de la geometría Tantalio – 1º.....	147
II.3. Bloque de ensayos Tantalio – DIACUT.....	148
II.3.1. Evaluación de la superficie después de 5 reperfilados de Tantalio – DIACUT.....	149
II.3.2. Evaluación de la superficie después de 10 reperfilados de Tantalio – DIACUT.....	150
II.3.3. Evaluación de la superficie después de 15 reperfilados de Tantalio – DIACUT.....	151
II.3.4. Evaluación de la superficie después de 20 reperfilados de Tantalio – DIACUT.....	152
II.3.5. Análisis de la geometría Tantalio - DIACUT .....	153
II.4. Bloque de ensayos SiC H – 2º.....	154
II.4.1. Evaluación de la superficie después de 10 pasadas de SiC H – 2º .....	155
II.4.2. Evaluación de la superficie después de 10 pasadas de SiC H – 2º .....	156
II.4.3. Evaluación de la superficie después de 30 pasadas de SiC H – 2º.....	157
II.4.4. Evaluación de la superficie después de 40 pasadas de SiC H – 2º .....	158
II.4.5. Evaluación de la superficie después de 50 pasadas de SiC H – 2º .....	159
II.4.6. Análisis de la geometría SiC H – 2º.....	160
II.5. Bloque de ensayos SiC J – 2º.....	161
II.5.1. Evaluación de la superficie después de 10 pasadas de SiC J – 2º.....	162
II.5.2. Evaluación de la superficie después de 20 pasadas de SiC J – 2º .....	163
II.5.3. Evaluación de la superficie después de 30 pasadas de SiC J – 2º.....	164
II.5.4. Evaluación de la superficie después de 40 pasadas de SiC J – 2º.....	165
II.5.5. Evaluación de la superficie después de 50 pasadas de SiC J – 2º.....	166
II.5.6. Análisis de la geometría SiC J – 2º.....	167

---

# 1. Resumen

## 1.1. Castellano

Este trabajo tiene como objetivo estudiar el comportamiento de una muela de diamante con aglomerante tipo resina sometida a un proceso de reperfilado y reavivado con diferente tipo de herramientas. Como se detalla más adelante la fase experimental se centra en el reperfilado, mientras que la parte teórica detalla tanto el reperfilado como el reavivado. Para la fase experimental del trabajo se realizan distintos ensayos en una rectificadora Danobat FG-600-S. Se trata de una máquina para el rectificado cilíndrico fabricada por DanobatGroup y dispuesta en la Universidad del País Vasco, concretamente en la Escuela de Ingeniería de Bilbao.

Al comienzo del trabajo se realiza una revisión del estado actual de los métodos para el diamantado de muelas de diamante. Después de un estudio de las alternativas, se elige el método que se emplea para el trabajo. A continuación, se detalla en profundidad el proceso, tanto la fase de reperfilado como la del reavivado.

Tras ello se procede a la fase experimental del trabajo. En primer lugar, se diseña y fabrica un banco de ensayos que permite llevar a cabo los ensayos experimentales. Una vez se pone a punto el montaje se realizan ensayos de reperfilado con diferentes herramientas y condiciones. En los ensayos se emplean dos tipos de herramientas diferentes; herramientas rotativas de SiC de diferentes durezas y una herramienta estática de Tantalio. Además, con cada herramienta se ensayan dos tipos de condiciones de reperfilado diferentes.

Para estudiar el comportamiento de la muela durante el proceso, se analiza la superficie durante la realización de los ensayos. Para ello, por un lado se establece una metodología de evaluación de superficie y por otro lado se desarrolla una herramienta mediante el software Spyder y lenguaje Python. La herramienta consta de tres módulos que permiten estudiar la concentración de granos, el número de salto de grano y realizar un seguimiento a los granos concretos deseados.

Además de la evaluación de la superficie de la muela abrasiva, otro aspecto que se analiza en cada bloque de ensayos es la desviación del perfil de la muela. Para ello, se establece una metodología sencilla para el análisis de la geometría de la muela de diamante basada en la obtención del negativo de la muela en un bloque de grafito y su posterior medición utilizando un microscopio óptico.

De los resultados experimentales se obtiene que un proceso completo de diamantado se consigue combinando el diamantado con moleta de SiC, para la eliminación de la capa desgastada de la muela de diamante, correspondiente al reperfilado paso 1 y posteriormente el diamantado con el stick de Tantalio tanto para recuperar la geometría de la muela como para obtener las condiciones de corte adecuadas en la superficie de la muela. Este resultado es de gran interés industrial tanto para fabricantes como para

---

usuarios de muelas de diamante con aglomerante resina y sus correspondientes diamantadores. Además, cabe destacar la versatilidad de aplicación del software y metodología desarrollados a diferentes tipos de muelas abrasivas.

---

## 1.2. Euskera

Lan honek, diamantezko eta erretxina aglutinantezko artezketa-errotarri batek, erreminta ezberdinekin egindako birprofilazio eta berpiztu prozesuen aurrean duen portaera aztertzea da. Aurrerago zehaztuko den moduan, fase experimentalak birprofilazio prozesuan zentratuko da. Horretarako, entsegu ezberdinak abian jarriko dira Danobat FG-600-S artezketa makinan. Honek DanobatGroup fabrikatutako artezketa zilindrikorako makina da eta Euskal Herriko Unibertsitatean dagoena, hain zuzen, Bilboko Ingenieritza Eskolan. Hala ere, fase teorikoa bi prozesuak aztertzen ditu.

Lanaren hasieran, diamantezko artezketa-errotarrien diamantatzeko prozesuen oraingo egoerari buruzko azterlana egiten da. Orduan, ebatziak azterlana baten ostean, lanean erabiliko den metodoa aukeratzen da. Ondoren, aukeratutako prozesuan sakontzen da, birprofilazio fasean nahiz berpitu fasean.

Behin hau eginda, fase experimentalarekin hasten da. Fase honetan entsegu ezberdinak burutzen dira. Hala ere, entseguen hasi aurretik hauek burutzea posible egiten duen muntake espezifiko bat egiten da. Behin muntaketa doituta dagoenean egiten dira entseguak erreminta eta baldintza ezberdinekin. Entseguetan bi erreminta mota ezberdinak erabiltzen dira; alde batetik, SiC-ko erreminta birakariak eta bestetik, Tantaliozko erreminta estatikoa. Horretaz aparte, erreminta mota bakoitzarekin bi prozesuaren baldintza ezberdinak erabiltzen dira.

Lanaren helburua bete ahal izateko, artezketa-errotarriaren portaera analizatzea, haren gainazala aztertzen da entseguak burutzen diren bitartean. Horretarako, alde batetik gainazala ebaluatzeke metodologia garatzen da eta beste aldetik tresna bat garatzen da Spyder softwarekin eta Python lenguaian. Tresna honek hiru moduluz ostata dago eta hainbat parametro aztertzea posible egiten du. Modulu batek aleen kontzentrazioa estimatzen du, beste batek zenbat ale salto egin duten kuantifikatzen du eta garatzen dena, ale zehatz batzuen jarraipena egitea aukera ematen du.

Gainazal ebaluaketaz aparte, aztertzen den beste aldagaia artezketa-errotarriaren perfilaren desbiaketa da. Horretarako, geometriaren analisirako metodologia erraz bat ezartzen da. Metodologia honek artezketa-errotarriaren perfil negatiboa grafitozko bloke batean lortzean datza. Ondoren, bloke hau mikroskopio optiko batekin ebaluatzen da.

Behin emaitza experimentalak aztertzean, ikusten da nola erabateko diamantadoa lortu daitekeela SiC-ko moleten bidezko eta ondoren tantaliozko stick bidezko diamantadoen konbinazioarekin. Alde batetik, SiC moleten bidezko diamantadoarekin harri urratzailearen higaturiko geruza kentzeaz arduratzen da, birprofilazioaren lehengo pausua izango zena. Beste aldetik, Tantaliozko diamantadoarekin, harriaren profila berreskuratzea posible da eta aldi berean, ebaketarako gainalazaren baldintza optimoak lortzen dira. Emaitza hau industri interes altukoa da diamantezko-errotarrien fabrikatzaile eta erabiltzaileentzako. Hortaz aparte, aipagarria da metodologia eta softwarearen aplikazioaren moldakortasuna beste artezketa harriekin erabiltzeko.

---

## 1.3. English

This work aims to study the behaviour of a resin-bond diamond wheel in the process of truing and conditioning with different type of tools. As discussed later, the experimental part of the work is mainly focused on the process of truing while the theoretical part involves the two processes. For the experimental part different test are held in the grinding machine Danobat FG-600-S. It is a cylindrical grinding machine, manufactured by DanobatGroup for the University of the Basque Country.

The first step of this work consist on a wide revision of the different processes for dressing diamond wheels. Then a study of the alternatives is carried out and the method used in this work is chosen. Next, this method is deeply detailed, both truing and conditioning.

Once this is done, the experimental part is carried out which contains different test. Before the tests, as part of the work, a specific assembly must be done in order to be possible to carry out the designed tests. Once the assembly is ready test with different tools and conditions are done. Two types of tools are used in the test; SiC from roller and a stationary tool composed of tantalum. Besides, two different conditions are used for each tool.

Aiming to study the behaviour of the wheel during the process, its surface is continuously analysed and an evaluation methodology is developed. For this purpose, on the one side a methodology is established for analysing the surface of the wheels and a tool is developed by the software Spyder and Python language. This tool contains three units. One unit is used for estimating the concentration of diamond grain on the surface, other unit can quantify the number of grain pull-out, and the last unit enables the monitoring of certain grains during the process.

Apart from the surface of the wheel, the loss of the wheel's profile is also estimate in each test block. For this purpose, a simple methodology is established which consists on the obtaining of the negative profile of the wheel with a graphite block. Then, this block is measured with an optical microscope.

Finally, the experimental tests showed that a complete dressing process can be achieved by a combination of both dressing process with SiC wheels and Tantalum stick. The dressing process with SiC wheels causes the elimination of the worn surface of the wheel, related with the first step of truing. The dressing process with Tantalum stick, improves the profile of the wheel and gives the wheel its cutting ability by altering its surface topography. This result is of industrial interest for diamond resin bond manufacturers and users. Besides, the versatility of application of the developed software and methodology to different types of abrasive wheel should be highlighted.

---

## 2. Lista de tablas, Figuras y Nomenclatura

### 2.1. Lista de Tablas

Tabla 4.1: Análisis de soluciones .....	33
Tabla 5.1: Condiciones empleadas para la Figura 5.4. Fuente: [14].....	39
Tabla 5.2: Características de la moleta recomendada para el dispositivo de freno mecánico. Fuente: [11] .....	41
Tabla 5.3: Condiciones empleadas para la Figura 5.8. Fuente: [3].....	47
Tabla 5.4: Condiciones de reavivado. Fuente: [3] .....	53
Tabla 6.1: Descripción de las herramientas del reperfilado .....	62
Tabla 6.2: Características de la muela .....	62
Tabla 6.3: Dimensiones de la muela según FEPA .....	63
Tabla 6.4: Características de la herramienta de corindón blanco .....	64
Tabla 6.5: Características técnicas del microscopio Dino-Lite.....	65
Tabla 6.6: Características técnicas del accionamiento.....	66
Tabla 6.7: Características técnicas del variador de frecuencia.....	66
Tabla 6.8: Condiciones para eliminar el salto radial .....	71
Tabla 6.9: Características de las herramientas de SiC de los ensayos .....	72
Tabla 6.10: 1º y 2º condiciones de los reperfilados .....	73
Tabla 6.11: Condiciones DIACUT .....	73
Tabla 6.12: Bloques de ensayos .....	74
Tabla 8.1: Desviación de forma SiC H - 1º.....	100
Tabla 8.2: Desviación de forma en valores angulares SiC J - 1º.....	104
Tabla 8.3: Desviación de forma en valores angulares Tantalio - 1º.....	109
Tabla 8.4: Desviación de forma angular Tantalio - DIACUT .....	113
Tabla 8.5: Desviación de forma angular SiC H - 2º .....	117
Tabla 8.6: Desviación de forma angular SiC J - 2º .....	121
Tabla 8.7: Comparativa de las desviaciones geométricas en valores de porcentaje .	124

---

Tabla 8.8: Comparativa de las desviaciones geométricas en valores angulares .....	124
Tabla 9.1: Comparativa entre materiales de herramienta.....	126

## 2.2. Lista de Figuras

Figura 3.1: a) Ideko S.Coop. b) Escuela de Ingeniería de Bilbao. Fuente: Ideko, UPV/EHU.....	19
Figura 4.1: Clasificación de los métodos de diamantado para muelas de diamante....	23
Figura 4.2: a) Rodillo de diamante. b) Moleta de diamante. Fuente: [1]. .....	24
Figura 4.3: Esquema del proceso: a) mediante moleta de diamante, b) mediante rodillo de diamante. Fuente: [1]. .....	25
Figura 4.4: a) Esquema del reperfilado. b) Esquema del reavivado. Fuente: [3]. .....	26
Figura 4.5: Esquema de control. Fuente: [5]. .....	27
Figura 4.6: Mecanismo del proceso. Fuente: [5]. .....	27
Figura 4.7: Esquema del proceso: a) mediante herramienta de rodillo b) mediante herramienta de disco. Fuente: [6].....	28
Figura 4.8:Esquema del proceso IWEDD. Fuente: [6].....	29
Figura 4.9: Esquema del proceso de diamantado con haz láser. Fuente: [9]. .....	30
Figura 4.10: Esquema del proceso AWJ. Fuente: [10]. .....	31
Figura 4.11: a) Mecanismo de arranque b) Esquema del proceso de diamantado con ultrasonidos. Fuente: [8] y [7]......	32
Figura 5.1: Dureza de los materiales en función de la temperatura. Fuente: [12].....	35
Figura 5.2: a) Algunas estructuras del carbono. b) Diagrama de fases del carbono. Fuente: [13] .....	37
Figura 5.3: a) Diamante CVD. b) Diamante natural. Fuente: dr kaiser .....	37
Figura 5.4: Comparación resina fenólica y poliimida. Fuente: [14] .....	39
Figura 5.5: Dispositivo de amarre y frenado de la moleta usado por Inasaki en 1989. Fuente: [11]. .....	40
Figura 5.6: a) Trayectoria de la moleta. b) Esquema del proceso del reperfilado. Fuente: [15]. .....	42
Figura 5.7: Geometría y cinemática del reperfilado: a) Uni-direccional b) Contra-direccional. Fuente: [15]......	44

Figura 5.8: Relación del ratio de reperfilado y velocidad de deslizamiento. Fuente: [3]	47
Figura 5.9: Ratios de reperfilado con diferentes ratios de velocidad y tamaños de grano. Fuente: [15]	47
Figura 5.10: a) Eficiencia del reperfilado en función de la agresividad y el tamaño de grano. b) La energía específica del reperfilado en función de la agresividad y el tamaño de grano. Fuente: [15]	48
Figura 5.11: Influencia sobre la eficiencia de reperfilado: a) del promedio de cizalladura, b) grado de cumplimiento. Fuente: [15]	50
Figura 5.12: Diferentes tasas de arranque de material por unidad de fuerza en función de la fuerza del proceso. Fuente: [15]	50
Figura 5.13: a) Esquema general del proceso. b) Esquema del fabricante “Diacut-Thinwheel”. Fuente: a) [3]. b) Diacut-Thinwheel	51
Figura 5.14: Evolución de las fuerzas del reavivado. Fuente: [3]	53
Figura 5.15: a) Topografía 3D con las condiciones Tr3. b) Topografía 3D con las condiciones Tr4. Fuente: [3]	54
Figura 5.16: Valores de los parámetros para caracterizar la topografía. Fuente: [3]	55
Figura 5.17: a) Fases de los granos. b) Fase 1. c) Fase 2. d) Fase 3	55
Figura 5.18: a) Viruta del proceso. b) Diamante individual. c) Viruta de abrasivo convencional generada en el proceso. Fuente: [15]	56
Figura 5.19: Rugosidad en la pieza: a) Instante después de reavivar. b) Después de rectificar 75 cm <sup>3</sup> de probeta. Fuente: [3]	57
Figura 6.1: Fases del trabajo	60
Figura 6.2: Esquema de la metodología para el estudio del diamantado de muelas con el método seleccionado.	61
Figura 6.3: Moleta de SiC.	62
Figura 6.4: a) Muela del trabajo. b) Referencia 14 A1 FEPA. Fuente: Comola REFayma	62
Figura 6.5: Bloque de tantalio	63
Figura 6.6: a) Bloque de grafito. b) Moleta de corindón	63
Figura 6.7: Rectificadora cilíndrica DANOBAT FG600S	64
Figura 6.8: Sistema de refrigeración	65

Figura 6.9: Microscopio Digital Dino-Lite.....	65
Figura 6.10: a) Motor 1,5 kW ER11 220V. b) Variador de frecuencia Huanyang.....	66
Figura 6.11: a) Acoplamiento del eje motor. b) Platillo de seguridad.....	67
Figura 6.12: a) Eje del motor tipo ER11. b) Acoplamiento del eje motor .....	68
Figura 6.13: Ejes de la máquina .....	69
Figura 6.14: Paralelismo motor - muela .....	70
Figura 6.15: Conexiones del variador de frecuencia. Fuente: ebay.es .....	71
Figura 6.16: Volumen de moleta perdido: a) idealmente b) realmente .....	75
Figura 7.1: a) Microscopio Dino-Lite en la máquina de ensayos. b) Interfaz del software "DinoCapture2.0" .....	76
Figura 7.2: Sector analizado y granos de referencia para un caso.....	77
Figura 7.3: Interfaz del programa WSA.....	78
Figura 7.4: Interfaz del módulo "Diamond Grain Percentage" .....	79
Figura 7.5: Modelo HSV. Fuente: Wikipedia.org .....	80
Figura 7.6: a) Efecto del "Close Filter". b) Efecto del "Open Filter".....	81
Figura 7.7: Sector 20 - SiC H - 1°.....	81
Figura 7.8: Interfaz del módulo "Grain Pull Out" .....	82
Figura 7.9:a) Rayos de luz en superficies planas. b) Rayos de luz en superficie inclinada .....	83
Figura 7.10: Interfaz del módulo "Grain size" .....	84
Figura 7.11: Procedimiento de selección de grano .....	85
Figura 7.12: a) Útil de amarre del bloque de grafito. b) Posición del grafito respecto a la muela del trabajo .....	86
Figura 7.13:a) Análisis del bloque de grafito. b) Herramientas para la medición de ángulos.....	86
Figura 8.1: Estado de la muela previo a los ensayos .....	87
Figura 8.2: Estado de la superficie previo al bloque de ensayos SiC H - 1° .....	88
Figura 8.3: Comparativa, estado inicial - 10 pasadas (SiC H - 1°).....	89
Figura 8.4:Comparativa, 10 pasadas - 20 pasadas (SiC H - 1°).....	90
Figura 8.5:Comparativa, 20 pasadas - 30 pasadas (SiC H - 1°).....	91
Figura 8.6:Comparativa, 30 pasadas - 40 pasadas (SiC H - 1°).....	92
Figura 8.7:Comparativa, 40 pasadas - 50 pasadas (SiC H - 1°).....	93

Figura 8.8: Análisis de la geometría de la muela SiC H – 1º .....	94
Figura 8.9: Estados de la muela SiC H - 1º .....	95
Figura 8.10: Concentración de granos en SiC H – 1º.....	96
Figura 8.11: Evolución de los granos de la zona azul (SiC H – 1º).....	97
Figura 8.12: Evolución de los granos de la zona amarilla (SiC H – 1º).....	98
Figura 8.13: Evolución de los granos de la zona verde (SiC H – 1º) .....	99
Figura 8.14: Desviación de forma SiC H - 1º.....	99
Figura 8.15: Estados de la muela SiC J - 1º.....	100
Figura 8.16: Concentración de granos en SiC J - 1º .....	101
Figura 8.17: Evolución de los granos de la zona azul (SiC J - 1º) .....	102
Figura 8.18: Evolución de los granos de la zona amarilla (SiC J - 1º) .....	103
Figura 8.19: Evolución de los granos de la zona verde (SiC J - 1º).....	103
Figura 8.20: Desviación de forma SiC J - 1º.....	104
Figura 8.21: Estados de muela Tantalio - 1º .....	105
Figura 8.22: Concentración de granos en Tantalio - 1º .....	106
Figura 8.23: Evolución de los granos de la zona azul (Tantalio - 1º) .....	107
Figura 8.24: Evolución de los granos de la zona amarilla (Tantalio - 1º) .....	107
Figura 8.25: Evolución de los granos de la zona verde (Tantalio - 1º).....	108
Figura 8.26: Desviación de forma Tantalio - 1º .....	108
Figura 8.27: Estados de muela Tantalio – DIACUT.....	109
Figura 8.28: Concentración de granos Tantalio – DIACUT .....	110
Figura 8.29: Evolución de los granos de la zona azul (Tantalio – DIACUT) .....	111
Figura 8.30: Evolución de los granos de la zona amarilla (Tantalio – DIACUT).....	111
Figura 8.31: Evolución de los granos de la zona verde (Tantalio – DIACUT) .....	112
Figura 8.32: Desviación de forma Tantalio - DIACUT.....	112
Figura 8.33: Estados de muela SiC H - 2º.....	113
Figura 8.34: Concentración de granos SiC H - 2º .....	114
Figura 8.35: Evolución de los granos de la zona azul (SiC H - 2º) .....	115
Figura 8.36: Evolución de los granos de la zona amarilla (SiC H - 2º).....	115
Figura 8.37: Evolución de los granos de la zona verde (SiC H - 2º) .....	116
Figura 8.38: Desviación de forma SiC H - 2º.....	116
Figura 8.39: Estados de muela SiC J - 2º .....	117

Figura 8.40: Concentración de granos SiC J - 2º .....	118
Figura 8.41: Evolución de los granos de la zona azul (SiC J - 2º) .....	119
Figura 8.42: Evolución de los granos de la zona amarilla (SiC J - 2º) .....	119
Figura 8.43: Evolución de los granos de la zona verde (SiC J - 2º).....	120
Figura 8.44: Desviación de forma SiC J - 2º.....	120
Figura 8.45: Evolución de la concentración de granos durante los bloques de ensayo .....	122
Figura 8.46: a) Variación media de grano / intervalo. b) Reducción media. c) Granos desprendidos .....	123
Figura 9.1: Fases de un grano durante las pasadas de reperfilado.....	126
Figura 9.2: Fases del proceso de un diamantado completo de muelas de diamante con aglomerante de resina .....	127
Figura 11.1: a) Ratio menor. b) Ratio mayor. Fuente: Comegui S.L.....	132
Figura 11.2: Influencia del ratio de afilado.....	133
Figura 11.3: Ratio de velocidades del diamantado. Fuente: [12].....	134
Figura 11.4: Estado de la muela previo al bloque de ensayos SiC J-1º.....	135
Figura 11.5: Estado de la superficie previo a los ensayos del bloque SiC J .....	135
Figura 11.6: Comparativa: Estado inicial - 10 pasadas (SiC J-1º) .....	136
Figura 11.7: Comparativa: 10 pasadas - 20 pasadas (SiC J-1º).....	137
Figura 11.8: Comparativa: 20 pasadas - 30 pasadas (SiC J-1º).....	138
Figura 11.9: Comparativa: 30 pasadas - 40 pasadas (SiC J-1º).....	139
Figura 11.10: Comparativa: 40 pasadas - 50 pasadas (SiC J-1º).....	140
Figura 11.11: Análisis de la geometría de la muela SiC J – 1º .....	141
Figura 11.12. Estado inicial Tantalio-1º.....	142
Figura 11.13. Sector de superficie a analizar Tantalio – 1º .....	142
Figura 11.14: Comparativa: Estado inicial - 10 pasadas (Tantalio-1º) .....	143
Figura 11.15: Comparativa: 10 pasadas - 20 pasadas (Tantalio-1º).....	144
Figura 11.16: Comparativa: 20 pasadas - 30 pasadas (Tantalio-1º).....	145
Figura 11.17: Comparativa: 30 pasadas - 40 pasadas (Tantalio-1º).....	146
Figura 11.18: Comparativa: 40 pasadas - 50 pasadas (Tantalio-1º).....	147
Figura 11.19: Análisis de la geometría Tantalio - 1º.....	148
Figura 11.20: Estado inicial bloque de ensayos Tantalio – DIACUT.....	149

Figura 11.21: Sector de la superficie a analizar Tantalio - DIACUT.....	149
Figura 11.22: Comparativa: Estado inicial - 5 reperfilados (Tantalio - DIACUT) .....	150
Figura 11.23: Comparativa: 5 reperfilados - 10 reperfilados (Tantalio - DIACUT).....	151
Figura 11.24:Comparativa: 10 reperfilados - 15 reperfilados (Tantalio - DIACUT).....	152
Figura 11.25: Comparativa: 15 reperfilados - 20 reperfilados (Tantalio - DIACUT)....	153
Figura 11.26: Análisis de la geometría tantalio – DIACUT .....	154
Figura 11.27: Estado inicial bloque de ensayos SiC H - 2º.....	154
Figura 11.28: Sector de la superficie analizar SiC J – 2º.....	155
Figura 11.29: Comparativa: Estado inicial - 10 pasadas (SiC H - 2º) .....	156
Figura 11.30: Comparativa: 10 pasadas - 20 pasadas (SiC H - 2º).....	157
Figura 11.31: Comparativa: 20 pasadas - 30 pasadas (SiC H - 2º).....	158
Figura 11.32: Comparativa: 30 pasadas - 40 pasadas (SiC H - 2º).....	159
Figura 11.33: Comparativa: 40 pasadas - 50 pasadas (SiC H - 2º).....	160
Figura 11.34: Análisis de la geometría SiC H - 2º .....	161
Figura 11.35: Estado inicial de la superficie bloque de ensayos SiC J – 2º.....	161
Figura 11.36: Sector de la superficie a analizar SiC J – 2º.....	162
Figura 11.37: Comparativa: Estado inicial - 10 pasadas (SiC J - 2º) .....	163
Figura 11.38: Comparativa: 10 pasadas - 20 pasadas (SiC J - 2º).....	164
Figura 11.39: Comparativa: 20 pasadas - 30 pasadas (SiC J - 2º).....	165
Figura 11.40: Comparativa: 30 pasadas - 40 pasadas (SiC J - 2º).....	166
Figura 11.41: Comparativa: 40 pasadas - 50 pasadas (SiC J - 2º).....	167
Figura 11.42: Análisis de la geometría SiC J - 2º .....	168

## 2.3. Nomenclatura

$\Delta Vol_d$ [mm <sup>3</sup> ]	Volumen de herramienta de diamantado consumido
$\Delta Vol_T$ [mm <sup>3</sup> ]	Volumen de herramienta de reperfilado consumido
$\Delta Vol_s$ [mm <sup>3</sup> ]	Volumen de muela abrasiva consumido
$\Delta Vol_D$ [mm <sup>3</sup> ]	Volumen de muela de diamante consumido
$\Delta_D$ [mm <sup>3</sup> /N·s]	Tasa de arranque de material de la muela por unidad de fuerza
$\tau_T$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Promedio de cizalladura del reperfilado

---

$\omega_T$	[rad/s]	Velocidad angular de la moleta de reperfilado
$\omega_D$	[rad/s]	Velocidad angular de la muela de diamante
$\gamma_d$	[-]	Ratio de afilado del diamantado
$a_{ed}$	[mm]	Profundidad de pasada en el diamantado
$a_{er}$	[mm]	Profundidad de pasada de reavivado
$Aggr$	[-]	Agresividad del proceso
$a_{pd}$	[mm]	Anchura de contacto
$a_T$	[mm]	Profundidad de pasada de reperfilado
$a_{T,eff}$	[mm]	Profundidad de pasada de reperfilado efectiva
$b_d$	[mm]	Anchura activa de la herramienta de diamantado
$b_s$	[mm]	Anchura de la herramienta de reavivado (“Stick”)
$b_T$	[mm]	Ancho de reperfilado
$d_{g,D}$	[ $\mu\text{m}$ ]	Tamaño de grano de la muela de diamante
$d_{g,T}$	[ $\mu\text{m}$ ]	Tamaño de grano de la herramienta de reperfilado
$e_d$	[J/mm <sup>3</sup> ]	Energía específica del reavivado
$e_T$	[J/mm <sup>3</sup> ]	Energía específica del reperfilado
$f_{ad}$	[mm/rev]	Avance axial del diamantado por revolución de la muela
$F_n$	[N]	Fuerza normal
$F_t$	[N]	Fuerza tangencial
$F_T$	[N]	Fuerza tangencial del reperfilado
$G_d$	[-]	Ratio de diamantado
$G_T$	[-]	Ratio de reperfilado
$h_{eq}$	[ $\mu\text{m}$ ]	Espesor de viruta equivalente
$h_s$	[mm]	Altura de la herramienta de reavivado (“Stick”)
$l_c$	[mm]	Longitud de contacto en el reperfilado
$n_{sT}$	[rev/min]	Número de revoluciones por minuto de la moleta
$n_{sd}$	[rev/min]	Número de revoluciones por minuto de la muela
$Q'_w$	[mm <sup>3</sup> /mm·s]	Caudal específico de arranque de material
$Q$	[mm <sup>3</sup> /s]	Ratio de arranque de material
$Q_T$	[mm <sup>3</sup> /s]	Ratio de arranque de material de la moleta de reperfilado

---

---

$Q_D$	[mm <sup>3</sup> /s]	Ratio de arranque de material de la muela de diamante
$q_d$	[-]	Ratio de velocidades en el diamantado.
$q_T$	[-]	Ratio de velocidades en el reperfilado
$r_{D0}$	[mm]	Radio de la muela de diamante
$r_{T0}$	[mm]	Radio de la moleta de reperfilado
$r_p$	[mm]	Radio punta de la moleta
$S_p$	[μm]	Diferencia en altura entre el pico más alto y el plano medio
$S_T$	[mm]	Paso de reperfilado
$S_z$	[μm]	Diferencia en altura entre el pico más alto y el valle más profundo
$S_v$	[μm]	Diferencia en altura entre el plano medio y el valle más profundo
$T_m$	[Nm]	Momento torsor del control
$T_T$	[-]	Grado de cumplimiento del reperfilado
$U_d$	[-]	Ratio de solapamiento del diamantado
$U_T$	[-]	Ratio de solapamiento de reperfilado
$V_{fa,D}$	[mm/min]	Velocidad de avance axial de la moleta de diamantado
$V_{fa,T}$	[mm/min]	Velocidad de avance axial de la moleta de reperfilado
$V_{fr,D}$	[mm/min]	Velocidad de avance radial de la muela en el reavivado
$V_D$	[m/s]	Velocidad de deslizamiento
$V_d$	[m/s]	Velocidad de la herramienta de diamantado
$V_T$	[m/s]	Velocidad de la moleta de reperfilado
$V_D$	[m/s]	Velocidad de la muela de diamante
$V_s$	[m/s]	Velocidad periférica de la muela abrasiva

## 3. Introducción

### 3.1. Contexto

Este trabajo se realiza en cooperación educativa junto a la empresa Ideko S.Coop., centro tecnológico especializado en tecnologías de fabricación y producción industrial, situado en el polígono Arriaga en Elgóibar, Guipúzcoa. El material correspondiente a las herramientas de los ensayos es facilitado por la empresa Abrasivos Unesa S.L, empresa dedicada a la consultoría técnica de rectificado y fabricante de muelas abrasivas. Cabe destacar que el trabajo se desarrolla en los talleres de la Escuela de Ingeniería de Bilbao de la Universidad del País Vasco. Aun así, el contacto con ambas empresas es directo y continuo, realizando reuniones periódicas.

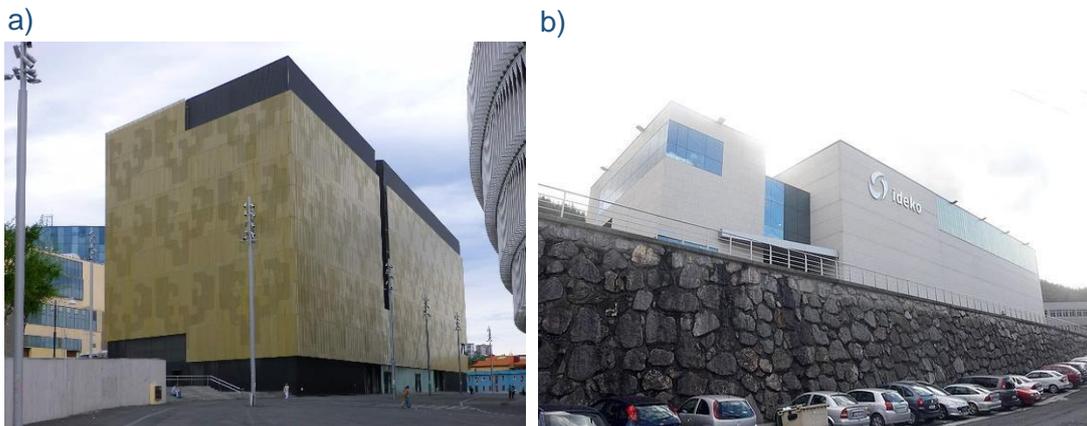


Figura 3.1: a) Ideko S.Coop. b) Escuela de Ingeniería de Bilbao. Fuente: Ideko, UPV/EHU

Ideko S.Coop. es un centro tecnológico especializado en tecnologías de fabricación y producción industrial. Ofrecen soluciones avanzadas para mejorar las capacidades de producción y competitividad de sus clientes en diferentes sectores como máquina herramienta, ferrocarril, aeronáutica, bienes de equipo, automoción y energía, entre otros. Se caracteriza por la excelencia científica desarrollada en 4 grupos de investigación; Dinámica de control, Diseño e ingeniería de precisión, TICs y Automatización y Procesos de fabricación. Este último es el encargado de dirigir este trabajo.

El grupo de investigación se centra en introducir las últimas tecnologías y las soluciones más avanzadas en los procesos de fabricación como torneado, rectificado, fresado, plegado, taladrado o láser. El objetivo es optimizar los procesos productivos, ganar eficiencia en la reducción de los costes de fabricación, mejorar la calidad y garantizar la seguridad. Dentro de estos objetivos entra el trabajo desarrollado, que trata de estudiar varios métodos para el diamantado de un tipo concreto de muela abrasiva y buscar la alternativa más eficiente para profundizar en ella apoyado por ensayos experimentales con los que ampliar el conocimiento sobre el proceso. Siempre bajo la premisa de

---

asegurar la calidad del proceso y al mismo tiempo aumentar la eficiencia medioambiental.

## 3.2. Descripción del problema

El diamantado es un proceso ubicado dentro del rectificado de piezas y componentes industriales. El rectificado es de vital importancia en el mecanizado de piezas, es un proceso que le da un valor añadido a las piezas fabricadas. Se sitúa en las etapas finales de la fabricación de piezas, por lo que requiere de alta precisión además de fiabilidad. La herramienta utilizada en el rectificado es la muela abrasiva. Esta herramienta está compuesta por granos de material abrasivo y un aglomerante que une los granos dejando algunos espacios (poros). A medida que la muela trabaja, esta sufre un desgaste, lo que causa una pérdida de capacidad abrasiva y geometría, un aumento en el consumo de potencia... Cuando eso ocurre es necesario diamantarla para recuperar las prestaciones perdidas. Para ello se realiza un proceso conocido como diamantado que a su vez está compuesto por dos pasos. En primer lugar, el diamantado consiste en un proceso de **reperfilado** con el que se recupera la forma y el perfil específico de la muela abrasiva y se elimina la capa que ha perdido la capacidad abrasiva. A continuación, se realiza un proceso conocido como **reavivado**. Es un proceso menos agresivo con el que se dota a la superficie de la muela con las condiciones de corte óptimas.

El material abrasivo de la muela condiciona directamente el proceso de diamantado. Para muelas de abrasivo convencional el diamantado convencional con herramienta rotativa o estática está constatado y es el método más fiable y económico con eficiencias de diamantado altas.

Sin embargo, la evolución en la industria cada vez necesita de piezas de mayor precisión, con geometrías más complejas y materiales más exigentes y, por lo tanto, cada vez se necesitan muelas más precisas y complejas. Además, las solicitudes cada vez son más agresivas por lo que se necesitan materiales más duros, y de la misma manera, las muelas abrasivas han de ser todavía más duras si cabe. Estas herramientas se fabrican de materiales superabrasivos cada vez más duros. Dentro de estos superabrasivos están el CBN y el diamante. Este trabajo se centra en muelas de diamante, cada vez más empleadas. El problema reside en que el diamantado de muelas de diamante es un reto debido a su extrema dureza. El método más empleado es el diamantado convencional con herramientas de diamante. Sin embargo, la dureza del abrasivo conlleva a grandes desgastes de las herramientas reduciendo su vida útil. Además, cabe destacar el alto precio de dichas herramientas. Por esa razón, se han buscado distintas alternativas a este método, buscando economizar el proceso con resultados satisfactorios. La idea de este trabajo surge de esta necesidad. Hay métodos que apuntan a ser un posible reemplazo al diamantado convencional. Sin embargo, existe poca investigación sobre los fundamentos de estos y hay poca información sobre los parámetros que entran en juego, su influencia... En ese contexto este trabajo aporta una pequeña revisión bibliográfica sobre los procesos de diamantado de muelas de diamante. Una vez revisadas las alternativas, se escoge el método más adecuado para una muela de diamante con aglomerante de tipo resina y se profundiza en él. Además,

---

con el fin de aumentar el conocimiento sobre los parámetros que influyen en el proceso el trabajo se apoya ensayos experimentales.

### 3.3. Objetivos

Partiendo del contexto y la descripción del problema previamente explicado, la labor de este trabajo está enfocada en la optimización del proceso completo de diamantado o “dressing” de muelas de diamante con aglomerante de resina. Para ello, se realiza una revisión bibliográfica de las alternativas y tras un análisis se opta por el método que mejor se adecua al contexto del trabajo y a la descripción del problema. Una vez hecho esto, se detalla el proceso profundizando en las variables que entran en juego. A continuación, se realizan varios ensayos diferentes en máquina y se estudian los resultados obtenidos. Mediante estos ensayos se quiere conocer la diferencia entre tres tipos de herramientas de diamantado y tres condiciones del proceso diferentes. Además, para que la obtención de resultados sea posible se desarrolla un método de evaluación del estado de la superficie de muelas abrasivas. Entonces, los principales objetivos de este trabajo son los siguientes:

- Estudiar el proceso de reperfilado y de reavivado para muelas de diamante con aglomerante de resina.
- Desarrollar un método de evaluación del estado de la superficie de las muelas abrasivas.
- Analizar la incidencia en el proceso de los diferentes tipos de herramientas y condiciones.

### 3.4. Beneficios

Respecto a los beneficios que trae esta investigación, en primer lugar, se amplía el conocimiento técnico del proceso de reperfilado y reavivado de muelas de diamante, así como de las variables más importantes que toman parte. En segundo lugar, mediante el método desarrollado es posible estudiar el estado de la superficie de las muelas abrasivas de manera sencilla y práctica. Además, la puesta a punto del banco de ensayos y la metodología empleada es ajustable a futuros trabajos relacionados con los objetivos.

En cuanto al conocimiento técnico obtenido, este trabajo estudia los diferentes métodos de diamantado de muelas de diamante y entre ellos profundiza en el proceso óptimo para la muela abrasiva del trabajo, que se trata de una muela de diamante con aglomerante de resina. Por lo tanto, el trabajo aporta una contextualización inicial para el problema descrito además de profundizar en uno de los métodos. Dentro del método escogido, el trabajo analiza al detalle las diferentes variables que entran en juego y además se apoya en los ensayos experimentales para aportar mayor conocimiento del comportamiento del proceso con diferentes herramientas y condiciones.

Por último, la metodología desarrollada permite estudiar el comportamiento de cualquier muela durante el proceso de diamantado, así como durante el proceso de rectificado, permitiendo detectar el desgaste de la superficie de las muelas abrasivas. La herramienta de evaluación de superficie permite estudiar la concentración de granos, el número de saltos de grano además de estudiar varios granos individualmente durante

las pasadas de diamantado. Además, cabe destacar que el análisis de la muela se realiza en la propia rectificadora, es decir, sin necesidad de parar el proceso y externalizar el análisis. Desde el punto de vista industrial, el realizar el análisis en la propia rectificadora supone un gran ahorro de tiempo y por ende, este análisis es viable económicamente para la industria.

## 4. Alternativas para la solución del problema

En este apartado se detallan varias metodologías disponibles a día de hoy para la solución del problema previamente descrito. Una vez explicadas las características generales de cada método se procede a realizar un análisis de viabilidad para seleccionar el método adecuado para el caso planteado.

Como paso previo, se realiza una clasificación de los métodos disponibles. Estos se pueden clasificar de manera general en función del origen de los conceptos en los que se apoya cada método. Se realiza un esquema ilustrativo en la siguiente figura.

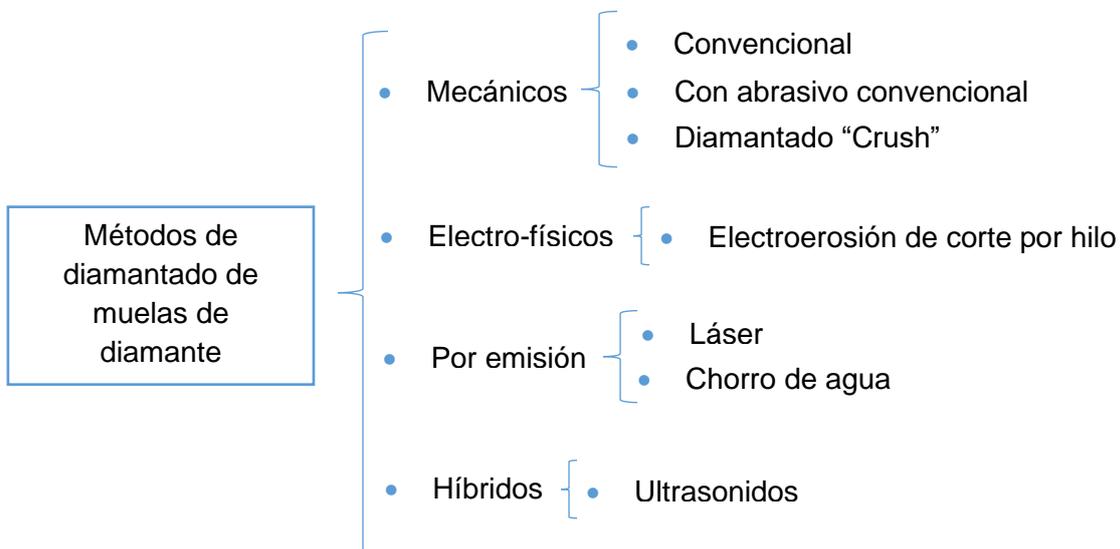


Figura 4.1: Clasificación de los métodos de diamantado para muelas de diamante

A continuación, se estudian las características generales de los métodos y posteriormente, en el siguiente apartado se profundiza en el método elegido. Para ello ver el apartado 5. *Estado del arte*.

### 4.1. Métodos Mecánicos

En este tipo de métodos el contacto de la muela abrasiva y la herramienta de diamante es directo, generalmente acompañado por un fluido que realiza las funciones de refrigerante y lubricante. Las herramientas pueden ser tanto estáticas (monopunta, multipunta...) como rotativas (rodillos, discos/moletas...). Este tipo de métodos están recomendados para muelas de diamante con aglomerante no metálico. La razón es que la dureza de los aglomerantes metálicos conlleva a un mayor desgaste de la herramienta de diamantado al existir contacto. Y es que una de las desventajas de este tipo de métodos es el desgaste que sufren dichas herramientas y la influencia que tiene en el proceso. Además, un desgaste rápido reduce la vida útil de la herramienta aumentando

el gasto económico y más cuando se trata de herramientas de diamante como en los métodos de los apartados 4.1.1. *Diamantado convencional con herramientas rotativas* y 4.1.3. *Diamantado “Crush” con aglomerante frágil*.

#### 4.1.1. Diamantado convencional con herramientas rotativas

Dentro del diamantado convencional, se estudia el realizado con herramientas rotativas ya que las herramientas estáticas son más adecuadas para muelas de abrasivo convencional. Asimismo, dentro del proceso se diferencian dos métodos según el tipo de herramienta rotativa, aunque ambos tienen características muy similares. El proceso de reperfilado y el de reavivado se realiza con la misma herramienta. La herramienta puede ser de tipo disco de diamante (generalmente conocida como moleta) o de tipo rodillo de forma de diamante (ver Figura 4.2).

a) Rodillo de diamante



b) Moleta de diamante



Figura 4.2: a) Rodillo de diamante. b) Moleta de diamante. Fuente: [1].

Por un lado, el proceso de diamantado convencional con moletas es un proceso similar al diamantado convencional con diamantador estático. La diferencia es que el diamantador, en lugar de mantener una localización fija, es un disco fino que rota alrededor de su propio eje. En la Figura 4.3 se puede ver un esquema del proceso. Con control numérico (CNC) se pueden conseguir geometrías complejas diferentes mediante este tipo de herramientas.

Por otro lado, está el diamantado convencional con rodillo de diamante. En este caso el proceso trata de realizar un diamantado en penetración, análogo al rectificado en penetración. En este caso el rodillo tiene una geometría específica que será la que tome posteriormente la muela. Es adecuado para la fabricación de grandes tiradas de piezas de la misma geometría. La mayor diferencia respecto a los esquemas del proceso consiste en la dirección de avance de la herramienta de diamantado. Las moletas tienen avance axial mientras que los rodillos tienen avance radial. En la Figura 4.3 se puede ver un esquema del proceso.

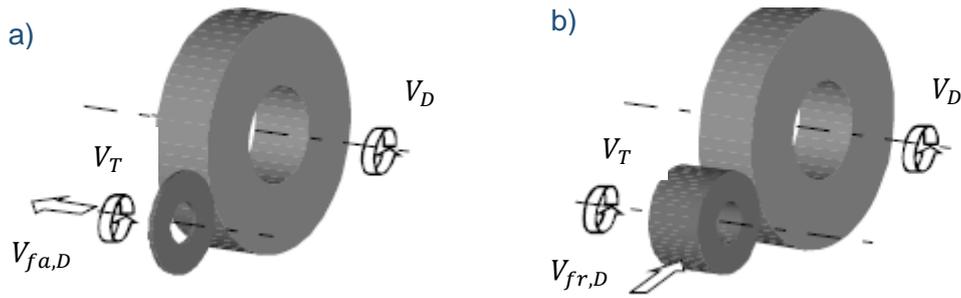


Figura 4.3: Esquema del proceso: a) mediante moleta de diamante, b) mediante rodillo de diamante.  
Fuente: [1].

Actualmente son los procesos más empleados, ya que la precisión de los resultados está constatada. Son procesos de rápidos y no requieren de ninguna instalación especial ni de desmontar la muela de la máquina. Sin embargo, al igual que la muela, estas herramientas sufren un desgaste debido al contacto directo entre los diamantes, que es difícil de estimar y, además, influye directamente en el rectificado de la pieza. Hay trabajos dedicados a la estimación de dicho desgaste y conocer su influencia en el rectificado [2]. Debido a su complejidad no se suele tener en cuenta, aunque tienen una notable influencia en la precisión de los resultados. Además, son herramientas extremadamente caras comparadas con herramientas de abrasivo convencional.

#### 4.1.2. Combinación reperfilado con moleta de abrasivo convencional y reavivado con stick de corindón

Es un método mecánico de diamantado, por lo que comparte varias características con el método anterior. El proceso consiste en una combinación de un proceso de reperfilado y uno posterior de reavivado y como norma general, se realizan mediante herramientas diferentes. Generalmente, el proceso de reperfilado se realiza mediante un disco (moleta) de Silicio de Carburo (SiC). El proceso de reavivado se realiza mediante un stick de Corindón ( $Al_2O_3$ ) en penetración. Dicho stick dispone de una anchura mayor que la de la muela de diamante. Para el proceso del reavivado también es posible realizarlo con un disco de  $Al_2O_3$ . También se emplean materiales como el Tantalio y Titanio para el proceso.

El reperfilado se hace con el objetivo de recuperar la geometría de la muela además de eliminar las capas que han perdido la capacidad abrasiva óptima. Sin embargo, este proceso en este método deja la muela con una estructura demasiado cerrada. Por lo que el objetivo del reavivado es el de abrir la estructura de la muela y conseguir que los granos sobresalgan lo suficiente como para conseguir el acabado deseado en la pieza. En otras palabras, el objetivo del reavivado es conseguir las condiciones de corte óptimas de la muela. En la Figura 4.4 se puede ver un esquema de ambos procesos.

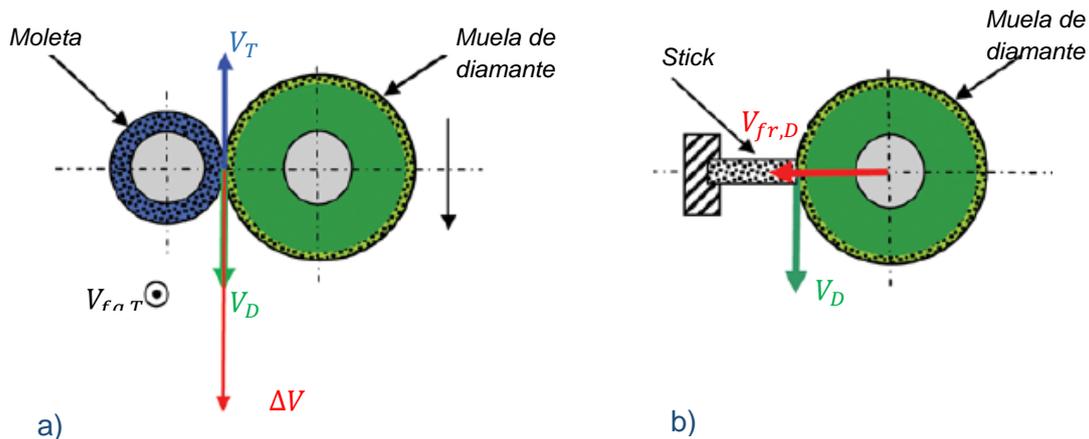


Figura 4.4: a) Esquema del reperfilado. b) Esquema del reavivado. Fuente: [3].

Es un proceso con el que se han conseguido eficiencias de diamantado satisfactorias para muelas de diamante con aglomerante tipo resina [3]. Para este tipo de muelas el proceso de reavivado es fundamental ya que carecen de la porosidad suficiente para que la viruta se forme y se evacue de forma adecuada.

Es un proceso largo que, además, consume una gran cantidad de volumen del abrasivo de la moleta. Se trata de un proceso que consume tiempo, sin embargo, hay trabajos orientados en la reducción de estos tiempos de trabajo [4]. Sin embargo, es muy económico. El precio de las moletas de abrasivo convencional es bajo y, además, no requiere de ninguna instalación especial en la máquina ni del desmontaje de la muela. Por lo que se está buscando su aplicación adecuada a la industria, sin embargo, el conocimiento sobre el proceso a día de hoy es bajo.

#### 4.1.3. Diamantado “Crush” con aglomerante frágil

Se trata de un proceso mecánico de diamantado. Se puede decir que una particularización del diamantado convencional con herramientas rotativas. La cinemática de este método es muy similar a la del método mencionado. La gran diferencia es que este método se basa en el proceso destructivo denominado “Crush” que se da cuando el ratio de velocidades  $q_d$  del diamantador rotativo y la muela es igual a 1. Es decir, cuando ambas giran a la misma velocidad. Por lo tanto, la condición que se debe cumplir es la siguiente.

$$q_d = \frac{V_T}{V_D} = 1 \quad [4.1]$$

Esto condiciona todo el proceso, por lo tanto, para que el método tenga resultados positivos esta relación debe mantenerse en cada instante. El caso es que a medida que la herramienta de diamantado sufre desgaste y esto conlleva a una no intencionada variación de la velocidad que debe ser corregida. Para corregirla, se dispone de un sistema de control que garantiza la sincronización en todo momento. El control consiste en controlar el par generado por el motor que acciona la herramienta de diamantado en lugar de la velocidad. Conocido el par necesario para obtener la velocidad requerida, este se guarda en el control. Una vez se detecta el contacto con la muela mediante un sensor acústico, se cambia del control de velocidad al control por momento torsor que

hace que el motor genere el par deseado. En la siguiente figura se muestra el esquema del control.

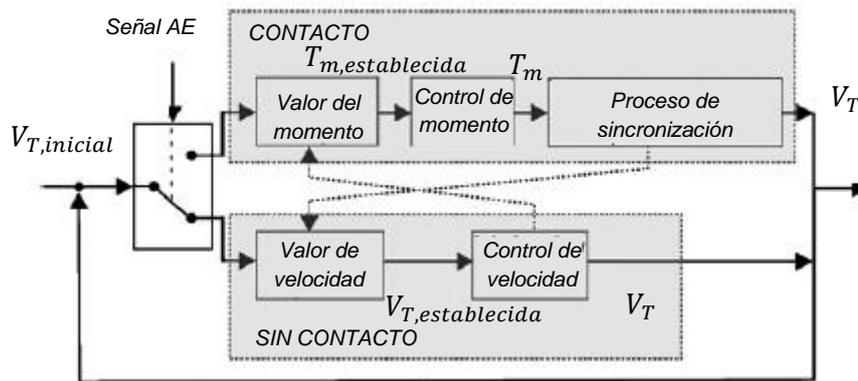


Figura 4.5: Esquema de control. Fuente: [5].

Sincronizar las velocidades de giro de la muela y herramienta de diamantado, conlleva a que solo una fuerza normal ejerza sobre los granos de diamante. Es decir, la fuerza tangencial queda anulada. La fuerza normal genera una tensión en los puentes de aglomerante que unen los granos. Cuando dicha tensión es lo suficientemente grande como para romper los puentes de aglomerante, el grano se desprende de la superficie completamente. Un requisito para que los puentes de aglomerante se fracturen es que este debe ser frágil. Es por eso, que este método se emplea en muelas de diamante con aglomerante vítreo, generalmente.

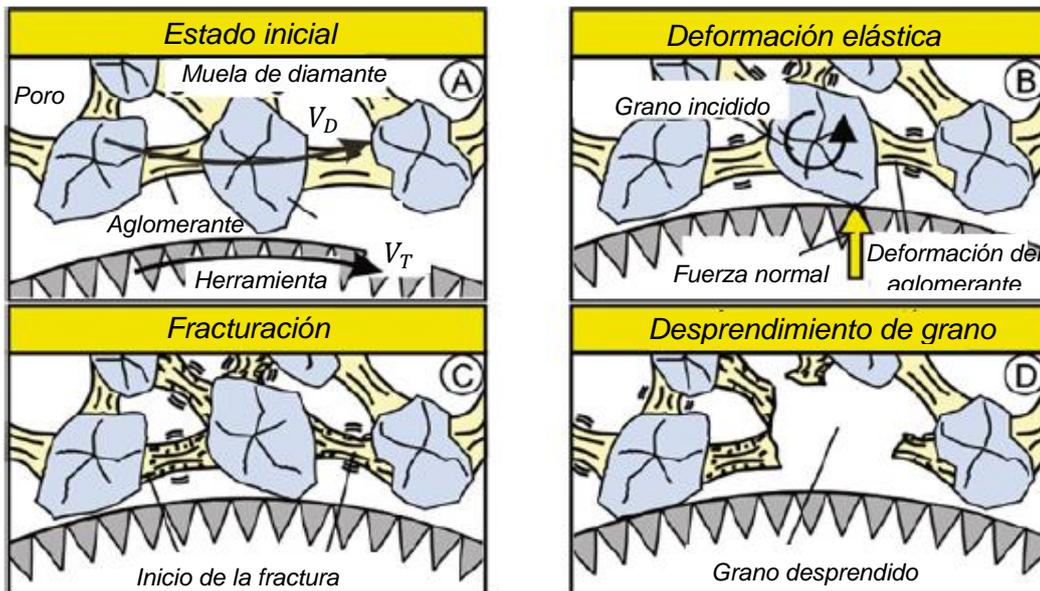


Figura 4.6: Mecanismo del proceso. Fuente: [5].

La herramienta de diamantado en este caso vuelve a ser de diamante, generalmente, diamante CVD. Para este proceso, también se pueden emplear dos tipos de herramientas. Por un lado, se emplean rodillos con la geometría negativa de la muela, lo que simplifica y agiliza el proceso. Este tipo de herramienta es adecuado para grandes

tiradas de piezas. En la Figura 4.7 se puede ver un esquema del proceso con este tipo de herramienta.

Por otro lado, están los discos con radio punta pequeños. Con estas herramientas el proceso se complica ligeramente para dar la forma específica a la muela, pero, se gana mucha flexibilidad en cuanto al tipo de geometría posible. En la siguiente figura se puede ver un esquema del proceso con este tipo de herramienta.

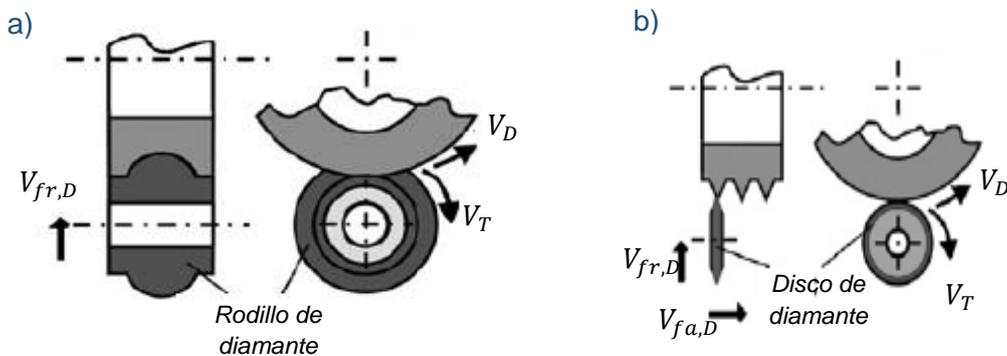


Figura 4.7: Esquema del proceso: a) mediante herramienta de rodillo b) mediante herramienta de disco.  
Fuente: [6].

En comparación con otros métodos, en este se consigue anular la fuerza tangencial en el contacto entre muela y la herramienta de diamantado. Esto resulta en una reducción del desgaste de la herramienta. Sin embargo, al igual que sucede con el diamantado convencional el desgaste de la herramienta de diamantado es difícil de estimar y afecta directamente en el resultado. Aunque, mediante el sistema de control que dispone este método es posible compensar dicho desgaste. Pero para ello, requiere la instalación del control. Además, el coste de las herramientas de diamantado es elevado.

## 4.2. Métodos electro-físicos

Los métodos electro-físicos son adecuados para las muelas de diamante con aglomerante metálico ya que utilizan conceptos eléctricos, donde la conductividad del aglomerante es necesaria. La mayoría de los métodos de este tipo requieren realizarlos en una máquina aparte. Sin embargo, para evitar errores de montaje y pérdida de precisión por las holguras del husillo, es un aspecto importante en cuanto a precisión del proceso, realizar el diamantado en la máquina. Por esa razón, se estudia el método IWEDD.

### 4.2.1. Diamantado in situ por electroerosión de corte por hilo (IWEDD)

Se trata de un método electro-físico de diamantado y está basado en los principios de electroerosión. Es un método adecuado para muelas de diamante con aglomerante metálico [6]. Este tipo de muelas son muy perjudiciales para las herramientas de diamantado debido a la dureza del aglomerante. Debido al contacto, las herramientas de diamantado sufren mayor desgaste con este tipo de muelas de diamante, por lo que, lo más adecuado para este tipo de muelas es evitar los métodos de diamantado mecánicos [7]. Como la estructura del aglomerante es extremadamente cerrada este tipo de muelas no tienen porosidad. Por esa razón, aglomerante debe de estar en una

capa inferior a los granos, de manera que sea posible la formación de la viruta y que los granos sobresalgan lo necesario para conseguir el acabado y el arranque de material deseado. Problema similar ocurre con las muelas de aglomerante de resina después del reperfilado.

En este método se coloca un fluido dieléctrico entre la muela de diamante y el electrodo (en este caso se trata de un hilo). Se aplica una diferencia de potencial elevada entre el husillo y el hilo de manera que el dieléctrico se vuelve conductor localmente durante un instante y se genera una descarga eléctrica. Esta descarga causa que el aglomerante metálico se funda en una zona localizada y se merme sin afectar a los granos de diamante. En la siguiente figura se puede ver un esquema del proceso.

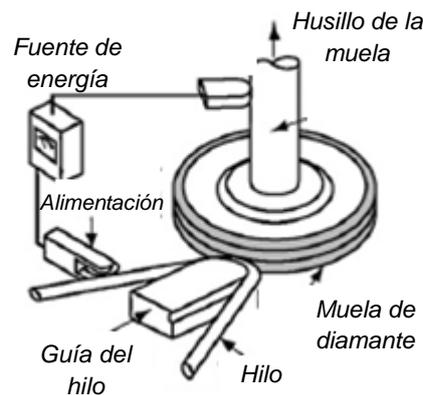


Figura 4.8: Esquema del proceso IWEDD. Fuente: [6].

Una acumulación de estas descargas resulta en el diamantado de la muela. Mediante la ayuda de una guía el hilo se mantiene a la distancia suficiente de la muela. En el espacio entre hilo y muela se encuentra el fluido dieléctrico. El fluido que se emplea en el rectificado es el mismo que actúa como dieléctrico en el IWEDD. Por lo tanto, es un factor que condiciona mucho el tipo de fluido a usar. Generalmente se emplean aceites específicos [6].

Se trata de un proceso in situ. Se realiza dentro de la misma máquina, lo que conlleva un menor coste de tiempo, aun así, en comparación con los procesos mecánicos es lento. Además, requiere de una instalación compleja y costosa. Es un proceso que requiere de control del calor generado para evitar el daño térmico de la muela abrasiva.

### 4.3. Métodos por emisión

En cuanto a los métodos por emisión, son métodos en los que no existe el contacto y por lo tanto el desgaste que sufre la "herramienta" que genera el diamantado es nulo. Sin embargo, son métodos lentos que necesitan instalación ajena a la máquina. En el caso del diamantado por haz láser se ha conseguido instalarlo en la máquina [8]. Sin embargo, el diamantado por chorro de agua abrasiva es un proceso dañino para la máquina debido a las partículas abrasivas del agua que pueden dañar las guías, por ejemplo.

### 4.3.1. Diamantado por haz de láser

Se trata de un método de diamantado por emisión. Está basado en el arranque del material de la muela mediante un haz láser con una potencia adecuada. Ambos procesos de reperfilado y reavivado se realizan mediante el haz láser. El proceso consiste en la interacción del láser con la muela de diamante. Esta interacción causa calor, material fundido y vaporizado, generación de plasma, ablación de los granos de diamante...

Cuando el haz láser incide en la superficie de la muela, este genera una especie de cráteres debido al arranque de material por cada pulso del láser. El láser tiene avance axial y la muela se mantiene girando. Debido al movimiento relativo entre ambos, los cráteres se generan a lo largo de todo el perímetro de la superficie de la muela. Estos cráteres se solapan axial y circunferencialmente los unos con los otros de manera que la incidencia del haz láser cubre toda la superficie de la muela. De esta manera el arranque de material por toda la superficie está asegurado. La geometría de los cráteres es un aspecto muy importante del proceso y viene definida por los parámetros del láser. Es un parámetro que influye en la muela, define la cantidad de material arrancado y tiene influencia directa en la topografía de la muela. En la siguiente figura se puede ver un esquema que resume el proceso.

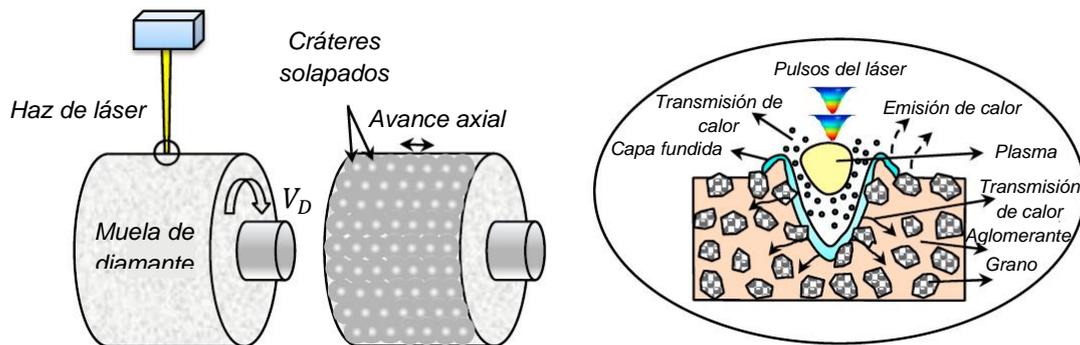


Figura 4.9: Esquema del proceso de diamantado con haz láser. Fuente: [9].

Es un proceso que ha dado resultados satisfactorios y se adecua para todo tipo de muelas abrasivas [9]. Sin embargo, requiere de una instalación compleja para realizarlo en máquina. Es un proceso costoso en términos de tiempo y potencia. Además, es necesario controlar el calor generado para evitar el daño térmico de la superficie de la muela.

En comparación con el otro método por emisión, el diamantado láser consigue perfiles de más complejos y precisos.

### 4.3.2. Diamantado por chorro de agua abrasiva

Se trata de un método de diamantado por emisión. En este caso el método consiste en incidir la superficie de la muela con un chorro de agua con partículas abrasivas (SiC) a alta velocidad. En la siguiente figura se puede ver el esquema del proceso.

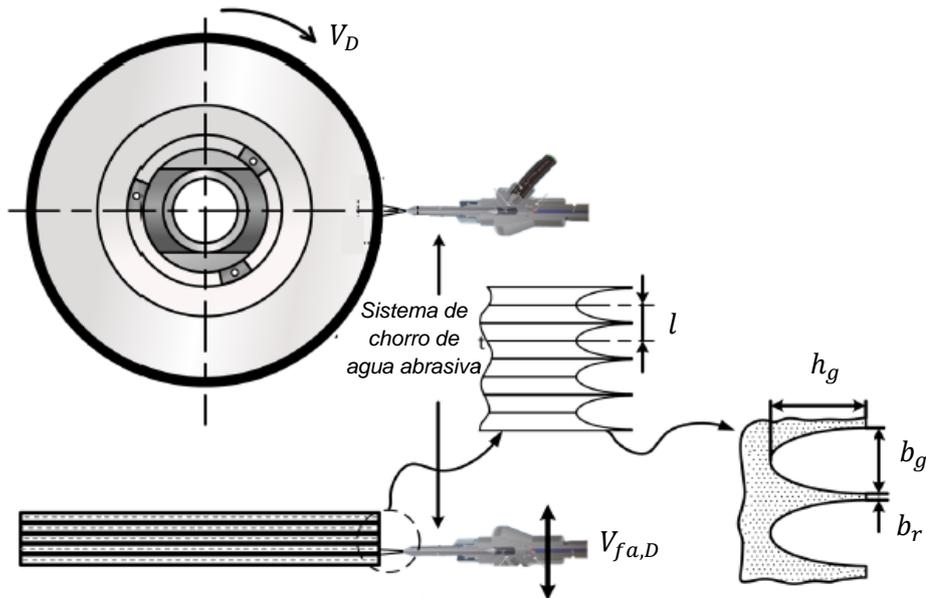


Figura 4.10: Esquema del proceso AWJ. Fuente: [10].

Donde  $h_g$  es la profundidad con la que el chorro penetra la superficie y  $b_g$  es el ancho.  $b_r$  es el espesor del filo de corte que deja el proceso y  $l$  es la distancia entre muescas que viene definida por la velocidad de avance axial  $V_{fa,D}$ .

Ambos procesos de reperfilado y reavivado se realizan mediante el chorro de agua con partículas abrasivas. Sin embargo, el reperfilado de geometrías complejas está limitado.

Es un proceso que tiende a dañar la máquina, por esa razón generalmente se realiza en una máquina ajena a la rectificadora. Esto conlleva a un mayor coste de tiempo y a una pérdida de precisión al montar de nuevo la muela en máquina, lo cual dificulta la aplicación industrial del método. Sin embargo, es un proceso donde no existe el daño térmico y las fuerzas que se generan son muy bajas [7]. Es posible conseguir un ratio de 20 entre la profundidad de pasada y el diámetro del chorro. Con una velocidad de chorro óptima es posible conseguir una rugosidad en la superficie relativa al tamaño de grano de la muela y al nivel de porosidad. Sin embargo, el método está limitado a la hora de conseguir geometrías complejas, por lo que su aplicación se centra en geometrías simples.

#### 4.4. Métodos Híbridos

Los métodos híbridos combinan características y conceptos de varios tipos de métodos. Existen varios métodos híbridos, sin embargo, el que más cerca se intuye de su aplicación industrial es el de diamantado por ultrasonidos. Aunque a día de hoy todavía no se ha realizado la suficiente investigación en este método y su empleo está limitado a nivel de laboratorio. En este análisis se estudia el diamantado por ultrasonidos que mediante señales eléctricas de alta frecuencia varía el contacto directo entre muela y herramienta de diamantado (métodos mecánicos).

#### 4.4.1. Diamantado por ultrasonidos

Es un método híbrido de diamantado, ya que mezcla conceptos de varios tipos de diamantados. Se puede considerar que se trata de un diamantado convencional modificado. Este método se basa en sobreponer vibraciones de alta frecuencia y baja amplitud al movimiento de la herramienta de diamantado. Las herramientas pueden ser tanto estáticas como rotativas. Cada tipo de herramienta se adecua mejor a un tipo de muela. Las rotativas han dado mejor resultados para las de diamante [7]. El generador ultrasónico de ondas produce una señal eléctrica sinusoidal con frecuencia ultrasónica. Esta señal se convierte en una vibración mecánica mediante un transductor y a continuación se amplifica para generar una vibración regular de la herramienta de diamantado. Al mismo tiempo, la herramienta de diamantado realiza la profundidad de pasada  $a_{ed}$  correspondiente con la velocidad de avance axial correspondiente  $V_{fa,D}$ .

Es posible realizar los procesos de perfilado y reavivado con la misma herramienta y proceso.

En la siguiente figura se pueden ver un esquema del proceso para las herramientas rotativas y el mecanismo de arranque de material. Donde  $A_{US}$  es la dirección de las vibraciones.

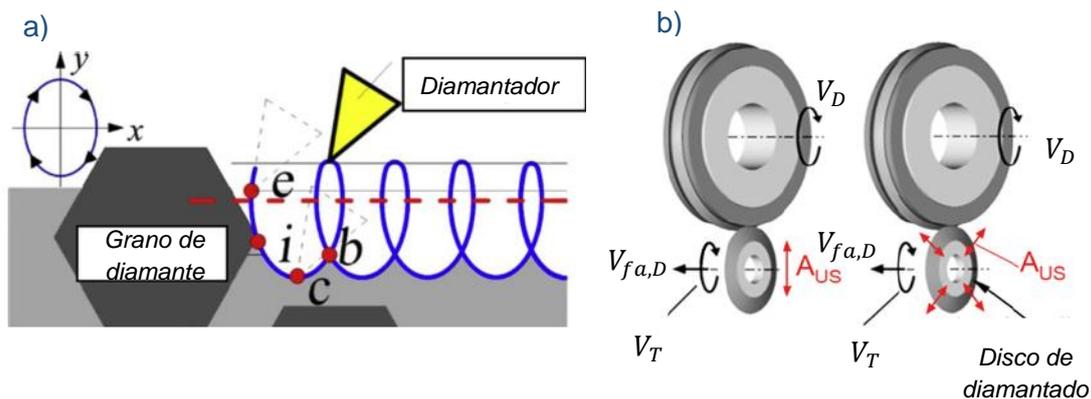


Figura 4.11: a) Mecanismo de arranque b) Esquema del proceso de diamantado con ultrasonidos. Fuente: [8] y [7].

Los puntos  $b-c-i-e$  generan la trayectoria que describe la herramienta en el proceso. El punto de partida  $b$  es donde se comienza a arrancar material y alcanza el punto  $c$ , que es donde la herramienta tiene la mayor amplitud en la dirección negativa de  $Y$ . A continuación, después del punto  $i$  la herramienta se va alejando de la muela describiendo una elipse orbital. Cuando alcanza el punto  $e$ , la herramienta deja de hacer contacto con la muela y sigue la trayectoria espiral y hasta alcanzar de nuevo el punto  $b$ .

Con este método se han conseguido disminuir los esfuerzos en el proceso de rectificado y el desgaste que sufre la muela [7]. Sin embargo, requiere de una instalación externa en la máquina y no es un método habitual en la industria. Es un método del que a día de hoy existe poco conocimiento y sobre el cual se sigue investigando.

## 4.5. Solución adoptada

En este apartado se analizan las alternativas previamente expuestas y se elige la adecuada para el problema planteado. En la siguiente tabla se realiza un análisis de los métodos.

Tabla 4.1: Análisis de soluciones

	Método	Coste		Posibilidad de realizar en máquina	Requiere de instalación especial	Adecuado para aglomerante
		De tiempo	Económico			
Mecánicos	Diamantado convencional con herramientas rotativas	Bajo	Alto	Sí	No	Resina Vítreo
	Combinación reperfilado con moleta de abrasivo convencional y reavivado con stick de corindón	Medio	Bajo	Sí	No	Resina Vítreo
	Diamantado "Crush" con aglomerante frágil	Bajo	Alto	Sí	Sí	Resina Vítreo
Electro-físico	Diamantado in situ por electroerosión de corte por hilo (IWEDD)	Alto	Alto	Sí	Sí	Metálico
Por emisión	Diamantado por haz de láser	Alto	Alto	Sí	Sí	Todo tipo
	Diamantado por chorro de agua abrasiva	Alto	Alto	No	Sí	Metálico
Híbrido	Diamantado por ultrasonidos	Bajo	Alto	Sí	Sí	Resina Vítreo Metálico

En este trabajo se estudia el diamantado de una muela de diamante con aglomerante tipo resina. Dentro de los métodos que son más válidos para este tipo de muelas, analizando la Tabla 4.1, se observa que el que mejores características tiene para ser introducido en la industria es el método que combina el reperfilado con moleta de

abrasivo convencional y el reavivado mediante stick de corindón. Cabe recordar que en la fase experimental del trabajo se profundiza en la parte de reperfilado. Se quiere conocer el proceso de reperfilado con moletas de SiC además de que tipo de incidencia tiene el proceso con stick de tantalio. El reavivado con stick de corindón no entra dentro del alcance de la fase experimental.

Para el proceso seleccionado, el coste de la herramienta de diamantado es el más bajo de todos los métodos, es posible realizarlo en la misma máquina sin dañarla (no así el método de diamantado mediante chorro de agua abrasiva) y además no requiere de ninguna instalación que haga posible la realización del método mientras que los demás métodos si lo hacen. Lo que convierte al método en el más económico de todos los analizados.

Si bien el coste de tiempo en comparación con otros métodos como el diamantado "crush", el convencional y el diamantado por ultrasonidos apunta a ser mayor, es probable que se reduzca dicho tiempo optimizando las condiciones del diamantado. Se han realizado trabajos orientados a reducir tiempos en este método [4].

Se han conseguido resultados satisfactorios [3] para el tipo de muela que se va estudiar en este trabajo.

Es un método en investigación del que no hay mucha información salvo las recomendaciones de parámetros y tamaños de granos de algunos fabricantes, los cuales no dan información sobre cómo han obtenido los valores. Por esa razón es importante profundizar en el método y conocer lo que puede aportar a la industria si es aplicado adecuadamente. Para poder aplicarlo adecuadamente reduciendo costes económicos y temporales, es necesario conocer la influencia de todas las variables que entran en juego. Por eso en el apartado 5. *Estado del arte* se realiza una revisión bibliográfica sobre el método, analizando la cinemática del proceso, la influencia de los parámetros que entran en juego, influencia en el rectificado... La idea es que este método logre sustituir al diamantado convencional y así reducir el coste en herramientas de diamantado.

## 5. Estado del arte

### 5.1. Muelas de diamante con aglomerante tipo resina

Como se ha argumentado en el apartado anterior, el tipo de muela a la que mejor se adapta el método elegido en este trabajo es aquella que dispone de diamante como material abrasivo sujeto mediante aglomerante de tipo resina. En este apartado se detallan las características principales de este tipo de muelas como lo son el material abrasivo y el tipo de aglomerante.

#### 5.1.1. Material superabrasivo: Diamante

La principal propiedad de los materiales abrasivos para los granos es la dureza, la cual debe ser mayor que la de la pieza a rectificar, además de mantenerse a altas temperaturas, ya que al tratarse de un proceso abrasivo, las temperaturas son altas [11]. También es importante que el material no disponga de afinidad química con el material de la pieza a rectificar, a fin de evitar reacciones.

Generalmente se diferencian dos tipos de abrasivos: convencionales y superabrasivos. Dentro de los convencionales, se encuentran la alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) y el carburo de silicio ( $\text{SiC}$ ) y son de dureza notablemente menor que los superabrasivos (generalmente CBN y diamante). Los materiales superabrasivos tienen mejores propiedades y precio más elevado. Como se puede ver en la Figura 5.1 el diamante es el material de mayor dureza. Sin embargo, al igual que todos los materiales empleados, a partir de una temperatura sufre una brusca reducción en la dureza y debido a su afinidad química con el hierro, no es adecuado para el rectificado de materiales férricos.

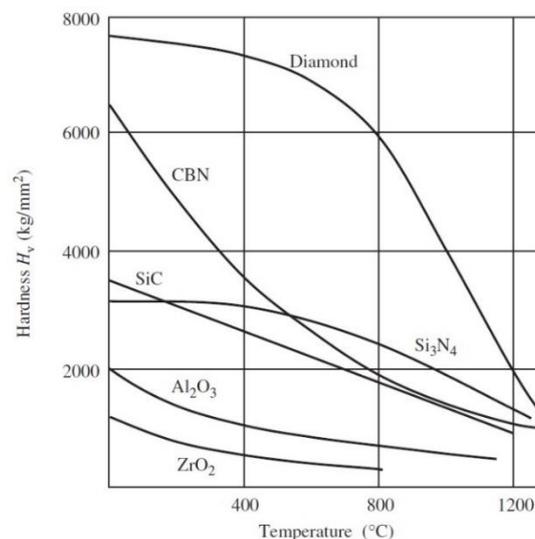


Figura 5.1: Dureza de los materiales en función de la temperatura. Fuente: [12]

---

El diamante es el material de mayor dureza conocido y se puede emplear para el rectificado de materiales extremadamente duros e incluso de las cerámicas más duras. Una de las grandes ventajas del diamante es la elevada temperatura requerida a partir de la cual el diamante comienza a reducir su dureza al cambiar la estructura cristalográfica tal y como se puede ver en la Figura 5.1. El diamante es estable en condiciones ambientales hasta los 760°C. El cambio en la estructura cristalográfica se comienza a dar a partir de los 400-600°C cuando el diamante pasa de una estructura cúbica (de alta dureza) a una estructura hexagonal más blanda.

El diamante es un alótropo del carbono y debida a la afinidad química existente entre el carbono y los materiales férricos, el diamante no es adecuado para el rectificado de este tipo de materiales. Esta afinidad química aumenta notablemente el desgaste del diamante y dicho efecto aumenta con la temperatura. Esto limita su aplicación.

Las buenas propiedades térmicas del diamante reducen las temperaturas generadas en el rectificado. Su conductividad térmica a temperatura ambiente está entre 600 – 2000  $W/mK$ . Al igual que la dureza, esta propiedad también disminuye con la temperatura hasta 70  $W/mK$  a 700°C.

Otra de las características del diamante es que la dureza de un cristal de diamante varía según la dirección de la sollicitación (Anisotropía). Esto se deriva en que la resistencia al desgaste varia hasta un orden de 40 veces según la orientación del cristal de diamante.

El diamante es un material caracterizado como frágil por lo que los impactos se deben evitar. Además, es sensible a los cambios repentinos de temperatura. Esto en el rectificado se traduce en que debe evitarse la aplicación repentina de fluido refrigerante cuando, el diamante se encuentra caliente. Un ejemplo común se suele dar en el diamantado con herramientas de diamante.

En el rectificado se diferencian dos grandes tipos de diamantes: Sintético y Natural. El diamante sintético es el más empleado, pero su precio es más elevado. Sin embargo, el diamante natural se sigue empleando debido a su precio reducido, sobre todo en herramientas de diamantado.

La forma estable del carbono en condiciones normales de temperatura y presión es el grafito donde los átomos se colocan en capas, como se puede ver en la Figura 5.2. Dentro de la misma capa se posicionan creando hexágonos, donde cada átomo se encuentra enlazado mediante enlace covalente con otros tres átomos. Aunque los enlaces entre los átomos sean fuertes, los enlaces entre cada capa son débiles. El diamante es meta-estable en condiciones normales de temperatura y presión, lo cual quiere decir que el carbono en esas condiciones tendra a recuperar su estructura estable (grafito). Sin embargo, dicho cambio tarda millones de años en producirse por lo que se dice que el diamante es meta-estable en dichas condiciones. El diamante tiene estructura atómica cúbica con enlace covalentes puros entre átomos. Cada átomo está enlazado con otros cuatro.

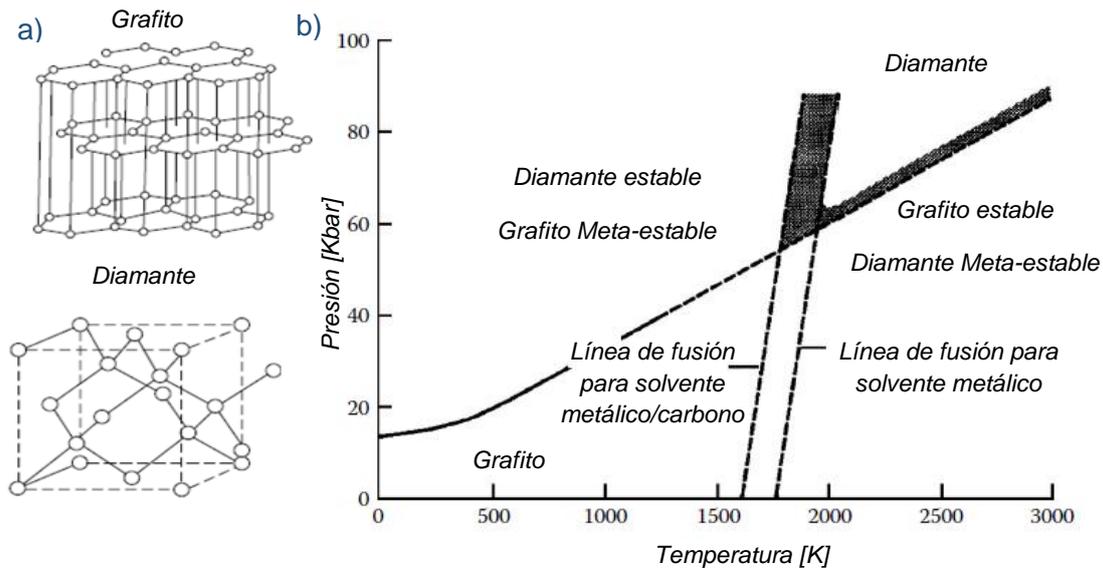


Figura 5.2: a) Algunas estructuras del carbono. b) Diagrama de fases del carbono. Fuente: [13]

La conversión directa de grafito a diamante (producción de diamante sintético) requiere de temperaturas superiores a 2500 K con presiones superiores a los 100 kbar. Mediante el empleo de solventes metálicos se consigue reducir las condiciones de temperatura y presión necesarias para la obtención del diamante sintético mediante grafito, debido a que el grafito tiene mayor solubilidad que el diamante.

Dentro de los diamantes sintéticos comunes en el rectificado están el PCD (Diamante Poli cristalino) y el CVD (Deposición Química de Vapor). El diamante PCD, generalmente se emplea como refuerzo para discos o moletas de diamantado y en superficies de desgaste en rectificadoras. El diamante CVD, no se emplea como material abrasivo, pero resulta efectivo depositado en forma de aguja en herramientas de diamantado (Figura 5.3).

A pesar del gran desarrollo y uso de los diamantes sintéticos, el empleo del diamante natural se ha mantenido, sobre todo para diamantadores mono-puntas y discos o moletas.

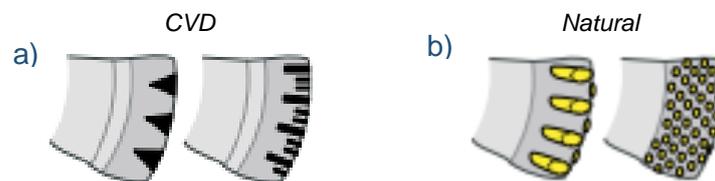


Figura 5.3: a) Diamante CVD. b) Diamante natural. Fuente: dr kaiser

### 5.1.2. Aglomerante: Resina

El aglomerante tipo resina engloba la mayor parte de aglomerantes orgánicos fabricados mediante prensado en caliente con temperatura relativamente baja. Se caracterizan por la naturaleza blanda de corte, la resistencia a temperaturas bajas y estructura elástica. El grado (dureza) y la estructura son muy diferentes al aglomerante vítreo. No existen puentes de aglomerante y la porosidad es mínima. La retención de los granos es

dependiente de la dureza y la resiliencia local del aglomerante que rodea el grano y es muy sensible a la temperatura generada en la zona. Se diferencia tres tipos en función de su fuerza y resistencia a la temperatura; aglomerantes plásticos, resina fenólica y resina poliimida.

#### ***5.1.2.1. Aglomerante plástico***

El empleo de este tipo de aglomerante conlleva a muelas más blandas. Generalmente se utilizan resinas epoxy o uretano. Se emplean sobre todo con abrasivo convencional para rectificado cilíndrico. Su fabricación barata y rápida hacen que su empleo sea atractivo. Con material superabrasivo, el aglomerante plástico se limita al rectificado ultra fino de cristales y cerámicas, pero con una vida útil de la muela limitada.

#### ***5.1.2.2. Resina fenólica***

Después del aglomerante vítreo, la resina fenólica es el aglomerante más empleado con abrasivos convencionales. El aglomerante en sí consiste en resina termoestable con aditivos plastificantes, que se curan a unos 150-200 ° C. Este tipo de aglomerante en términos de nomenclatura de muelas se define por la letra 'B'. La muela empleada en este trabajo contiene este aglomerante. La dureza del aglomerante se controla mediante los plastificadores y el uso de materiales de relleno.

En cuanto al tamaño de grano, generalmente se emplea aquel tamaño que asegura una dureza específica de la muela. Un tamaño de grano pequeño, remueve más material para una misma presión, pero conlleva un mayor desgaste. Normalmente se usa un tamaño pequeño, cuando es necesario una porosidad alta para generar el corte. La porosidad facilita el desprendimiento de grano.

Este tipo de resina también se emplea con material superabrasivo, generalmente con diamante. La resiliencia del aglomerante optimiza el desgaste que sufren los radios pequeños cuando sufren impactos interrumpidos, por ejemplo, en el rectificado de brochas. Para prevenir aumentos de temperaturas en zonas locales, es típico cubrir el abrasivo con capas metálicas de manera que ayuden a disipar el calor generado. Además, también se pueden emplear rellenos de otros metales para aumentar la disipación de calor.

#### ***5.1.2.3. Resina poliimida***

Este tipo de aglomerante aporta a la muela una mayor dureza, resistencia térmica y una menor deformación que el aglomerante de resina fenólica. Sin embargo, su precio es mayor, y esto limita su uso exclusivamente a muelas de superabrasivo. El superabrasivo más efectivo con esta resina es el diamante. Debido a la dureza de las muelas con este aglomerante, es posible que resalte fallos de fabricación de la máquina como el juego del husillo de la herramienta. Además, requieren de una mayor potencia para generar el corte.

Como se puede ver en la Figura 5.4, las muelas abrasivas con aglomerante de tipo resina poliimida sufren menor desgaste radial comparado con las que disponen de aglomerante de tipo resina fenólica.

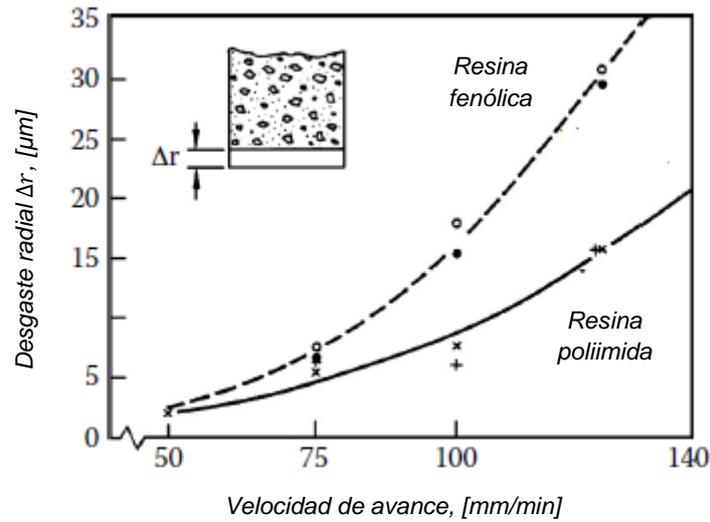


Figura 5.4: Comparación resina fenólica y poliimida. Fuente: [14]

La figura muestra el desgaste radial en función de la velocidad de avance para unas condiciones determinadas detalladas en la Tabla 5.1. La muela abrasiva empleada dispone de un diámetro de 250 mm y un ancho de 6,4 mm. El material abrasivo es diamante con un tamaño de 180 y una concentración de granos de 100.

Tabla 5.1: Condiciones empleadas para la Figura 5.4. Fuente: [14]

<b>Rectificadora</b>	Blohm HFS6
<b>Velocidad de corte [m/s]</b>	28
<b>Refrigerante</b>	Basado en agua
<b>Probeta</b>	P20 carburo
<b>Profundidad de pasada [mm]</b>	2

## 5.2. Combinación reperfilado con moleta de abrasivo convencional y reavivado con stick de corindón

El origen del método reside en el trabajo realizado por Inasaki I. [4] en 1989 que emplea para el diamantado de muelas de diamante un dispositivo de freno mecánico con el que se controla el giro de la herramienta de diamantado. El proceso consiste en que la muela misma accione el giro de la moleta o diamantador rotativo debido al contacto. Para controlar la velocidad de giro el dispositivo dispone de un grupo de frenos que a medida que la velocidad de giro aumenta, la fuerza centrífuga empuja los frenos (colocados con excentricidad) hasta hacer contacto con la pared que cubre parte de la moleta como se puede ver en la Figura 5.5.

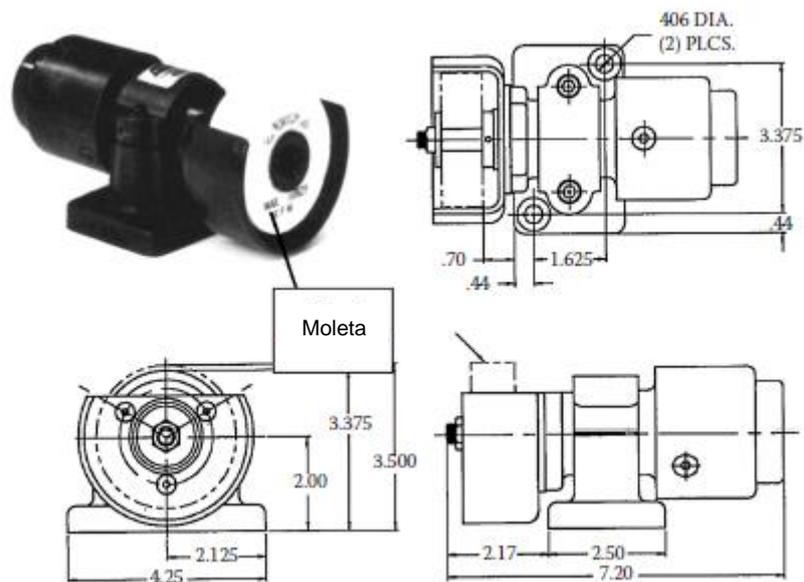


Figura 5.5: Dispositivo de amarre y frenado de la moleta usado por Inasaki en 1989. Fuente: [11].

El sistema permite tener controlada la diferencia de velocidades y por lo tanto el parámetro  $q_T$ . Existen varias recomendaciones que relacionan los parámetros para el proceso y características de la moleta empleada (ver Tabla 5.2). La profundidad de pasada  $a_T$  recomendada ronda los 50-75  $\mu\text{m}$  con velocidades de avance axial  $V_{fa,T}$  de 200 mm/min.

Tabla 5.2: Características de la moleta recomendada para el dispositivo de freno mecánico. Fuente: [11]

Mat. Superabrasivo	Aglomerante	Tamaño de grano	Operación	Con refrigerante		En seco	
				Tam. De grano	Dureza	Tam. De grano	Dureza
Diamante	Resina	80-120	Diamantado	60	L	60	L
		150-320	Diamantado	120	L	60	L
		400-800	Diamantado	325	L	60	L
	Metal	80-120	Diamantado	46	N	46	N
		150-320	Diamantado	80	N	80	N
		400-800	Diamantado	230	N	230	N
	Vítreo	80-120	Diamantado	80	N	80	N
		150-320	Diamantado	150	N	150	N
		400-800	Diamantado	400	N	400	N
CBN	Resina	80-120	Reperfilado	60	J	60	J
		150-320	Reperfilado	120	J	120	J
		400-800	Reperfilado	325	J	325	J
		80-120	Reavivado	220	G	220	G
		150-320	Reavivado	400	G	400	G
		400-800	Reavivado	800	G	800	G
	Metal	80-120	Reperfilado	46	J	46	J
		150-320	Reperfilado	80	J	80	J
		400-800	Reperfilado	230	J	230	J
		80-120	Reavivado	220	G	220	G
		150-320	Reavivado	400	G	400	G
		400-800	Reavivado	800	G	800	G
	Vítreo	80-120	Reperfilado	80	N	80	N
		150-320	Reperfilado	150	N	150	N
		400-800	Reperfilado	400	N	400	N
		80-120	Reavivado	220	G	220	G
		150-320	Reavivado	400	G	400	G
		400-800	Reavivado	800	G	800	G

Sin embargo, el autor no indica cómo se han obtenido dichas recomendaciones. Es un método que requiere de tiempo para realizar y se han ido introduciendo mejoras como sustituir el dispositivo de freno mecánico por un motor de corriente alterna [15] con el que accionar la moleta y separar los procesos de reperfilado y reavivado [3].

Tras realizar una revisión bibliográfica del método, a continuación, en este apartado se desarrolla la cinemática del proceso, se definen los parámetros que entran en juego, se analizan los mecanismos de arranque de los granos y se estudia la influencia que tiene este método en el posterior rectificado.

Como se ha visto, el método se encuentra dentro de los métodos mecánicos para el diamantado de muelas de diamante. Es una alternativa al método de diamantado convencional. Se han conseguido resultados satisfactorios para muelas de diamante con aglomerante de tipo resina en [3] y [15]. En este apartado se estudia la mecánica del proceso, así como la geometría y cinemática y se analiza en términos energéticos basándose en el trabajo [15]. Se diferencian los procesos de reperfilado y reavivado. En función de la herramienta de reavivado empleada, la cinemática del proceso puede ser muy similar a la del reperfilado.

### 5.2.1. Reperfilado

Es el primer paso en el diamantado de una muela de diamante con este método. El objetivo del proceso es el de recuperar el perfil de la muela y al mismo tiempo, eliminar la capa de superficie que ha perdido la capacidad de abrasiva, dejando paso a una nueva sin granos planos ni material embotado entre otros mecanismos de desgaste.

La herramienta de reperfilado generalmente consiste en un disco o moleta de Carburo de Silicio (SiC) con aglomerante vítreo. También es posible usar como material abrasivo sustituyendo al SiC, el corindón ( $Al_2O_3$ ), titanio o tantalio. En los ensayos experimentales que se llevan a cabo en este trabajo se compara el proceso con herramientas de SiC y Tantalio. Los aspectos más influyentes de la herramienta son el grado o dureza y el tamaño de grano del abrasivo. La dureza de la herramienta de reperfilado debe ser de mayor dureza que la de reavivado. En cuanto al tamaño de grano es recomendable que sea un 50% mayor que el tamaño de grano de la muela de diamante [15]. Respecto al empleo o no de refrigerante, los autores recomiendan el uso en caso de que en el posterior rectificado se use.

El consumo del material de las moletas es mucho mayor que el del material de la muela, debido a la diferencia en la dureza del abrasivo. El proceso consiste en realizar un movimiento a través de la superficie de la muela con la herramienta de reperfilado y una profundidad de pasada  $a_T$  a una determinada velocidad de avance axial  $V_{fa,T}$ . La profundidad de pasada se inserta antes de comenzar tanto en el recorrido de avance como en el de retroceso (ver Figura 5.6a). Sin embargo, en una configuración típica del proceso, lo normal es que la profundidad eliminada de muela de diamante sea una fracción de la pasada real programada  $a_T$ . Generalmente, dicha fracción se encuentra entre el 1% y el 20%. En consecuencia, el número de pasadas requeridas es mayor y el esquema del proceso resultante se puede ver en la Figura 5.6b.

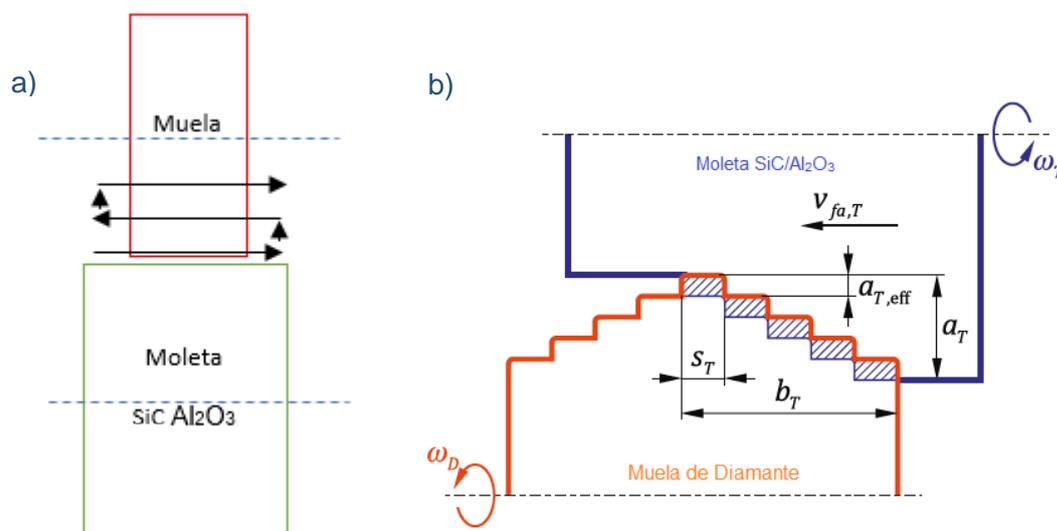


Figura 5.6: a) Trayectoria de la moleta. b) Esquema del proceso del reperfilado. Fuente: [15].

$\omega_T$  es la velocidad angular de la herramienta de reperfilado, que conocido su radio  $r_{T0}$  se puede definir la velocidad lineal de la moleta:

$$V_T = \frac{r_{T0} \cdot \omega_T}{1000} \quad [5.1]$$

Es un parámetro que influye directamente en el valor estimado del paso  $S_T$  que es el ancho de la profundidad de pasada efectiva y sigue la siguiente expresión:

$$S_T = \frac{2\pi \cdot r_{T0} \cdot V_{fa,T}}{V_T \cdot 1000} \quad [5.2]$$

$b_T$  es el ancho de reperfilado y se puede ver en la Figura 5.6b. El valor viene dado en función de la anchura de la muela y el paso  $S_T$ :

$$b_T = \frac{\text{anchura muela}}{2} + \frac{S_T}{2} \quad [5.3]$$

Para el caso de la anchura de reperfilado con “stick” se estima de manera análoga a los diamantadores estáticos. Para diamantadores más anchos de 3 mm se emplea el 35% de la anchura total, como es el caso para este trabajo.

La relación de los últimos dos parámetros define el ratio de solapamiento del reperfilado:

$$U_T = \frac{b_T}{S_T} \quad [5.4]$$

El ratio de solapamiento muestra cada cuanto un punto de la superficie de la muela entra en contacto con la herramienta de reperfilado. Es decir, cuantas revoluciones necesita dar la muela hasta que el diamante entra completamente. Mediante este parámetro y una profundidad de pasada determinada es posible estimar el valor de la profundidad de pasada efectiva:

$$a_{T,eff} = \frac{a_T}{U_T} \quad [5.5]$$

Una vez definidos los variables básicas del proceso, se procede a estudiar la geometría y la cinemática del proceso. En la Figura 5.7 se muestran para los casos de uni-direccional o contra-direccional. El reperfilado es uni-direccional cuando la moleta y la muela giran en sentido opuesto y en el contacto los vectores de velocidad coinciden en dirección. Cuando el reperfilado es uni-direccional el ratio de velocidades  $q_T$  toma valores entre 0 y 1. Para el caso contrario, valores menores que 0. Sigue la expresión [ 4.1 ] orientada al reperfilado:

$$q_T = \frac{V_T}{V_D} \quad [5.6]$$

Otro parámetro relacionado con las velocidades de giro de ambas herramientas es la velocidad de deslizamiento  $\Delta V$  que estima la diferencia relativa entre las dos velocidades teniendo en cuenta las direcciones de las mismas.

$$\Delta V = V_D - V_T \quad [5.7]$$

Obsérvese que para un diamantado “Crush” se tendría un valor de la velocidad de deslizamiento nulo.

A continuación, se trata el modelado del proceso. como la profundidad de pasada del reperfilado es de varios ordenes menor que el tamaño de la muela y la moleta, el modelo de la Figura 5.7 se linealiza respecto la profundidad de pasada. Como simplificación se fija la herramienta de reperfilado y se asume el movimiento relativo de la muela de diamante respecto a ella. La cinemática del proceso viene determinada por el vector de velocidad relativa  $\bar{v}(s)$  en función de la longitud del arco de contacto  $s$ . Las componentes de este vector son la velocidad relativa de la herramienta de reperfilado  $\bar{v}_T(s)$  y la velocidad relativa de la muela de diamante  $\bar{v}_D(s)$ .

$$\bar{v}(s) = \bar{v}_T(s) + \bar{v}_D(s) \quad [5.8]$$

Los vectores de velocidad relativa de herramienta y muela asimismo tienen sus componentes:

$$\bar{v}_T(s) = V_T \left( \frac{-s}{r_{T0}}, 1 \right) \quad [5.9]$$

$$\bar{v}_D(s) = V_D \left( \frac{-s}{r_{D0}}, 1 \right) \quad [5.10]$$

Donde  $V_D$  corresponde al módulo de la velocidad de giro de la muela de diamante definido por el producto del radio de la muela  $r_{D0}$  y su velocidad angular  $\omega_D$ .

$$V_D = r_{D0} \cdot \omega_D \quad [5.11]$$

Como se ha comentado el proceso puede ser uni-direccional o contra-direccional. En el caso de uni-direccional  $V_D$  se representa con un valor positivo mientras que en el caso contra-direccional  $V_D$  se expresa mediante un valor negativo.

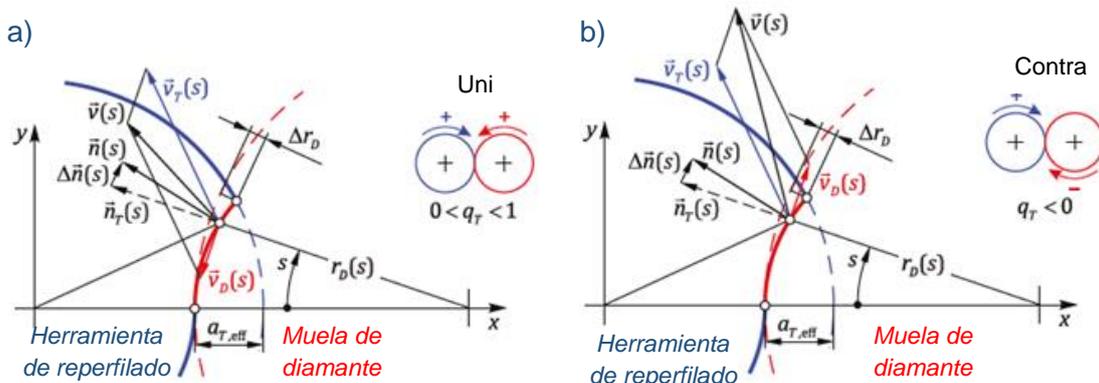


Figura 5.7: Geometría y cinemática del reperfilado: a) Uni-direccional b) Contra-direccional. Fuente: [15].

$\bar{n}(s)$  es el vector normal a la superficie de la muela de diamante una vez se ha producido el arranque del vector de velocidad. Por lo tanto, este vector es la suma del vector normal a la muela previo al arranque  $\bar{n}_T(s)$  y de la variación del vector debido al arranque de material de la muela  $\Delta\bar{n}(s)$ .

$$\bar{n}(s) = \bar{n}_T(s) + \Delta\bar{n}(s) \quad [5.12]$$

Así mismo,  $\bar{n}_T(s)$  y  $\Delta\bar{n}(s)$  tienen las componentes expresadas en [ 5.13 ] y [ 5.14 ].

$$\bar{n}_T(s) = \left( -1, \frac{s}{r_{D0}} \right) \quad [5.13]$$

$$\Delta\bar{n}(s) = \left( 0, -\frac{dr_D(s)}{ds} \right) \quad [5.14]$$

Donde  $r_D(s)$  es el radio de la muela de diamante instantáneo y se puede ver en la Figura 5.7. Entonces, es posible definir el ratio de arranque de material  $Q$ . Se puede calcular mediante la integral de la componente normal del vector de velocidad relativa  $\bar{v}(s)$  sobre la superficie de contacto en el intervalo de cero a la longitud de contacto  $l_c$ .

$$Q = b_T \cdot \int_0^{l_c} \bar{v}(s) \cdot \bar{n}(s) \cdot ds \quad [5.15]$$

La longitud de contacto  $l_c$  viene definida por la expresión [ 5.16 ], donde  $r_{eq}$  es el radio equivalente que relaciona los radios iniciales de la herramienta de reperfilado y de la muela de diamante y sigue la expresión [ 5.17 ].

$$l_c = \sqrt{2 \cdot r_{eq} \cdot a_{T,eff}} \quad [5.16]$$

$$r_{eq} = \frac{r_{D0} \cdot r_{T0}}{r_{D0} + r_{T0}} \quad [5.17]$$

Como puede observarse la modelización de la longitud de contacto es similar a la de la longitud de contacto de un proceso de rectificado cilíndrico.

El ratio de arranque de material  $Q$  consiste en el ratio de arranque de la herramienta de reperfilado  $Q_T$  y en el de arranque de la muela de diamante  $Q_D$ . Por lo tanto, se puede expresar también mediante la suma de ambas.

$$Q = Q_T + Q_D \quad [5.18]$$

Donde el ratio de arranque de la herramienta de reperfilado  $Q_T$  y el ratio de arranque de la muela de diamante  $Q_D$  siguen las expresiones [ 5.19 ] y [ 5.20 ], respectivamente.

$$Q_T = b_T \cdot \int_0^{l_c} \bar{v}(s) \cdot \bar{n}_T(s) \cdot ds = b_T \cdot V_T \cdot a_{T,eff} \quad [5.19]$$

$$Q_D = b_T \cdot \int_0^{l_c} \bar{v}(s) \cdot \Delta\bar{n}(s) \cdot ds = b_T \cdot |V_T - V_D| \cdot \Delta r_D \quad [5.20]$$

$\Delta r_D$  se trata de la reducción del radio de la muela de diamante  $r_D$  durante el contacto y se puede ver representado en la Figura 5.7.

Otro de los parámetros fundamentales del proceso es el ratio de reperfilado. Se trata de la relación del volumen consumido de muela de diamante  $\Delta Vol_D$  y el volumen consumido de moleta de reperfilado  $\Delta Vol_T$ .

$$G_T = \frac{\Delta Vol_D}{\Delta Vol_T} \quad [5.21]$$

Que al mismo tiempo se puede definir mediante los ratios de arranque de material de ambas herramientas. Teniendo en cuenta las expresiones [ 5.19 ], [ 5.20 ] y [ 5.6 ] se deduce que:

$$G_T = \frac{Q_D}{Q_T} = \frac{|1 - q_T| \cdot \Delta r_D}{a_{T,eff}} \quad [5.22]$$

El ratio de reperfilado estima para un mismo desgaste de moleta de reperfilado, cuanta cantidad de volumen de muela se ha conseguido consumir. Cuanto mayor sea el valor de  $G_T$ , más eficiente es el proceso de reperfilado. Existe una relación entre el ratio de reperfilado y la velocidad de deslizamiento [3]. Dicha relación se puede extrapolar de la Figura 5.8, obtenida mediante el desarrollo de unos ensayos [3] con unas condiciones que se pueden ver en la Tabla 5.3. Se aprecia que mientras la diferencia de velocidades sea similar el ratio de reperfilado no se ve apenas alterado en función de cual sea la herramienta que mayor velocidad tiene. Esta tendencia se aprecia en la figura comparando las condiciones de  $Tr1$  y  $Tr2$ . Además, se observa que el ratio de reperfilado es mayor a medida que la velocidad de deslizamiento disminuye, y por lo tanto, más eficiente es el proceso.

Como se ha comentado con anterioridad el valor del ratio de velocidades  $q_T$  esta entre 0 y 1 en el reperfilado uni-direccional y es menor que 0 en el reperfilado contra-direccional. En cuanto a la relación entre el ratio de reperfilado  $G_T$  y el de velocidades  $q_T$ , se concluye que no tiene influencia notable. Esto se ve comparando  $Tr3$  y  $Tr4$ , que ambos procesos emplean el mismo ratio de velocidades y en cambio, consiguen un ratio de reperfilado muy diferente. Esto se debe a que a medida que se varia  $q_T$  de -1 a 1, la velocidad de deslizamiento  $\Delta V$  se reduce y el proceso se vuelve más destructivo ("Crushing effect") y por consecuencia, la estructura de la muela se abre. Que el proceso sea más destructivo es una de las razones por las que el volumen de muela arrancado  $\Delta Vol_D$  aumente con la reducción de la velocidad de deslizamiento y causa un aumento en las fuerzas que se ejercen en cada grano [16]. De la misma manera, el número de colisiones que reciben los granos de la muela de diamante se reduce a medida que la velocidad de deslizamiento decrece, pero como se ha comentado, la fuerza de cada colisión aumenta y con ello la probabilidad de que el grano se desprenda.

Por el contrario, aumentar la velocidad de deslizamiento, reduce dicha fuerza y la probabilidad de desprendimiento de grano se reduce. Por lo tanto, en la mayor medida simplemente se elimina aglomerante. Entonces, cuanto mayor sea  $\Delta V$  menos eficiente es el proceso en términos de eliminar granos de diamante pero, se consigue una estructura de la muela más abierta con los granos sobresalientes de la superficie. En este caso, se consigue también un efecto de reavivado de la superficie. En cambio, con  $\Delta V$  bajos mientras que aumenta la eficiencia del proceso, el reavivado es indispensable debido a que la estructura de la muela es considerablemente cerrada.

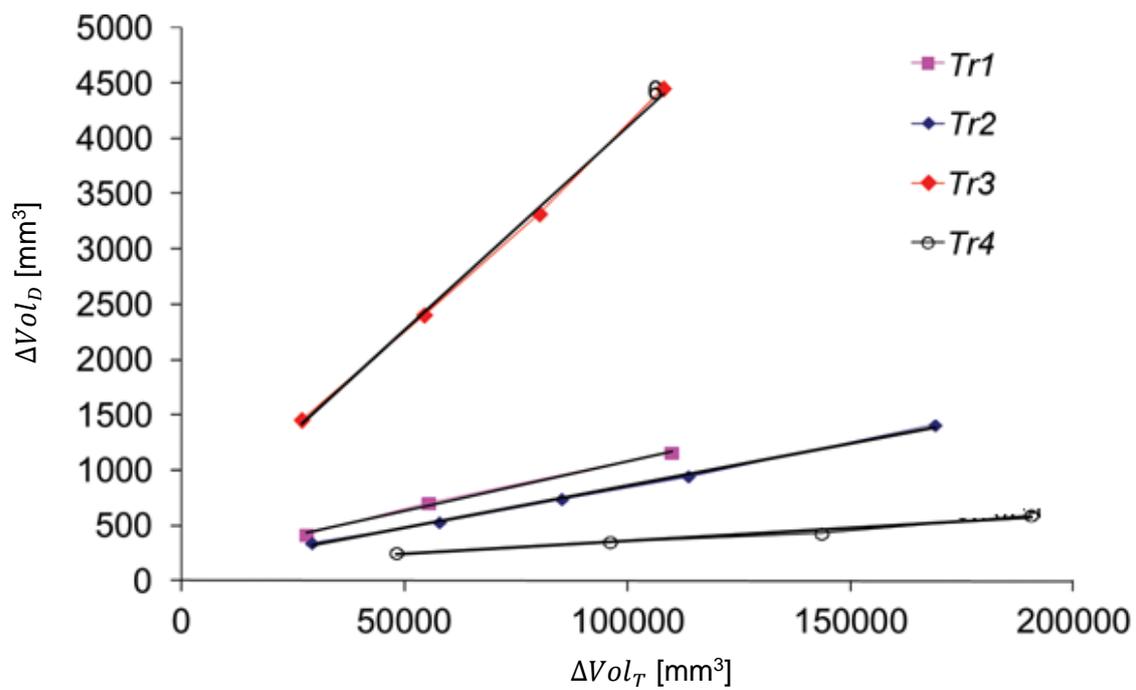


Figura 5.8: Relación del ratio de reperfilado y velocidad de deslizamiento. Fuente: [3]

Tabla 5.3: Condiciones empleadas para la Figura 5.8. Fuente: [3]

	<b>Tr1</b>	<b>Tr2</b>	<b>Tr3</b>	<b>Tr4</b>
$V_T$ [m/s]	28	7	-7	-28
$V_D$ [m/s]	3	28	7	28
$\Delta V$ [m/s]	-25	21	14	56
$q_T$ [-]	9,3	0,25	-1	-1
$G_T$ [-]	0,009	0,0077	0,037	0,0023

Otra variable que influye en el ratio de reperfilado  $G_T$  es el tamaño de grano de la herramienta de reperfilado o moleta. En la Figura 5.9 se muestra el valor de  $G_T$  obtenido en unos ensayos [15] para varios ratios de velocidad  $q_T$  con herramientas de diferente tamaño de grano. Como se ha comentado recientemente, el ratio de velocidad apenas tiene influencia, por lo tanto, es correcto adjudicar la variación de  $G_T$  al tamaño de grano de la herramienta de reperfilado. Cuanto mayor sea el tamaño de grano de la herramienta se consigue eliminar mayor volumen de muela para el mismo desgaste de herramienta, y por consecuencia, mayores ratios de reperfilado.

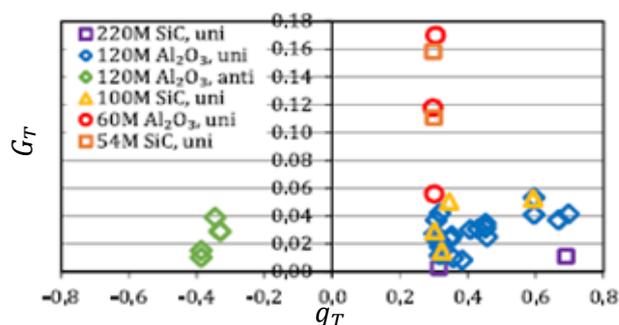


Figura 5.9: Ratios de reperfilado con diferentes ratios de velocidad y tamaños de grano. Fuente: [15]

El parámetro que da información sobre la mecánica del proceso es la eficiencia del reperfilado  $n_T$ , empleando un punto de vista geométrico del contacto se tiene que:

$$n_T = \frac{\Delta r_D}{a_{T,eff}} = \frac{G_T}{|1 - q_T|} \quad [5.23]$$

Teniendo en cuenta la expresión [ 5.22 ] se puede expresar este último parámetro en función de los ratios de reperfilado y velocidad.

La eficiencia del reperfilado está a su vez asociado a otro parámetro representativo como lo es la agresividad del reperfilado  $Aggr$ . La agresividad está definida como la relación entre las componentes normales y tangenciales del vector de velocidad relativa en el contacto (representados en la Figura 5.7) y es adimensional.

$$Aggr = \frac{10^6}{l_c} \int_0^{l_c} \frac{\bar{v}(s) \cdot \bar{n}(s)}{\sqrt{\bar{v}(s) \cdot \bar{v}(s) - (\bar{v}(s) - \bar{n}(s))^2}} ds = \frac{10^6}{|1 - q_T|} \cdot \sqrt{\frac{a_{T,eff}}{2r_{eq}}} \quad [5.24]$$

Es proporcional a la penetración radial del grano de diamante en la herramienta de reperfilado. Es un parámetro empleado en el rectificado y que ha sido implementado para el proceso de diamantado [15]. Como se ha comentado, la eficiencia de reperfilado  $n_T$  y la agresividad  $Aggr$  están relacionados. Además, son sensibles al tamaño de grano de la herramienta con la que se realiza el reperfilado. Esta relación se puede ver en la Figura 5.10a. Procesos con mayor Agresividad y herramientas con tamaños de grano mayores, conllevan a mayor eficiencia. Se entiende que el despredimiento de grano de la muela de diamante se facilita a medida que la herramienta de reperfilado dispone de un tamaño mayor de grano.

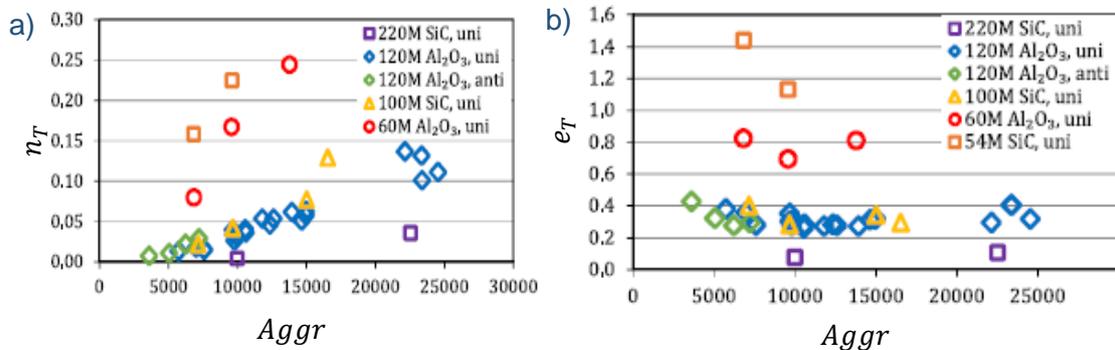


Figura 5.10: a) Eficiencia del reperfilado en función de la agresividad y el tamaño de grano. b) La energía específica del reperfilado en función de la agresividad y el tamaño de grano. Fuente: [15]

Como se ha visto, el aumento de la Agresividad  $Aggr$  del proceso está asociado con una mayor penetración del grano de diamante (muela). Esto causa que una mayor área del grano de la moleta se fracture por cizalladura y un aumento de la eficiencia del proceso. Entonces, se puede asumir que un mayor tamaño de grano de la muela de diamante  $d_{g,D}$  reduce la eficiencia del proceso, de la misma manera que un mayor tamaño en la herramienta de reperfilado  $d_{g,T}$  la aumenta. Esto se basa en el concepto de que cuanto más grande sea el grano mayor superficie se encuentra sujetándolo. En esta línea se define un nuevo parámetro conocido como el grado de cumplimiento del reperfilado  $T_T$ .

$$T_T = \left( \frac{d_{g,T}}{d_{g,D}} \right)^2 \cdot Aggr \quad [ 5.25 ]$$

Existe una relación lineal entre este parámetro y la eficiencia de reperfilado tal como se puede ver en la Figura 5.11b.

Con lo anterior se puede dar por definido la cinemática y la geometría del proceso [15]. A continuación, se analiza desde un punto de vista energético. En esta línea, el mecanismo de arranque del reperfilado está basado en el análisis de potencia. La potencia está relacionada con la fuerza tangencial del reperfilado  $F_T$  y la diferencia entre las velocidades de la herramienta de reperfilado y la muela de diamante.

$$P_T = F_T \cdot |V_T - V_D| \quad [ 5.26 ]$$

Desde el punto de vista energético el parámetro representativo del proceso y que se obtiene de la potencia del reperfilado, es la energía específica  $e_T$ , que estima la energía requerida para eliminar una unidad de volumen de moleta. Además, es un parámetro que determina el mecanismo de arranque del material de la muela. Es la relación de la potencia respecto al ratio de arranque de material de la herramienta de reperfilado. Analíticamente viene definido por la siguiente expresión:

$$e_T = \frac{P_T}{Q_T} = \frac{F_T \cdot |1 - q_T| \cdot \sqrt{\frac{2r_{eq}}{a_{T,eff}}}}{b_c \cdot l_c} \quad [ 5.27 ]$$

Según la expresión [ 5.27 ] se entiende que únicamente influye en la energía específica el ratio de arranque de material de la herramienta de reperfilado  $Q_T$ . Sin embargo, se trata de una simplificación ya que el ratio de arranque de material de la muela  $Q_D$  también tiene influencia, pero se trata de un efecto considerablemente menor que el efecto de  $Q_T$ . Además de estos parámetros, el tamaño de grano de la moleta también tiene influencia en la energía específica. En la Figura 5.10b se puede ver que cuanto mayor sea el tamaño de grano de la herramienta mayor será la energía específica de la operación. Asimismo, la energía específica y la Agresividad del proceso son independientes entre sí.

Sin embargo, combinando la energía específica [ 5.27 ] y la Agresividad [ 5.24 ], se puede caracterizar la mecánica del proceso de reperfilado mediante un parámetro definido como el promedio de cizalladura del reperfilado  $\tau_T$ . Analíticamente se expresa según la siguiente expresión.

$$\tau_T = \frac{F_T}{b_c \cdot l_c} = \frac{e_T \cdot Aggr}{10^6} \quad [ 5.28 ]$$

En el reperfilado, el arranque de los granos de diamante se realiza mediante cizalladura. Por lo tanto, este parámetro tiene efecto directo en la eficiencia como se puede ver en la Figura 5.11a. Cuanto mayor sea el promedio de cizalladura del proceso de reperfilado, mayor es también la eficiencia del mismo. La relación es aproximadamente lineal. En cuanto al tamaño de grano no afecta directamente.

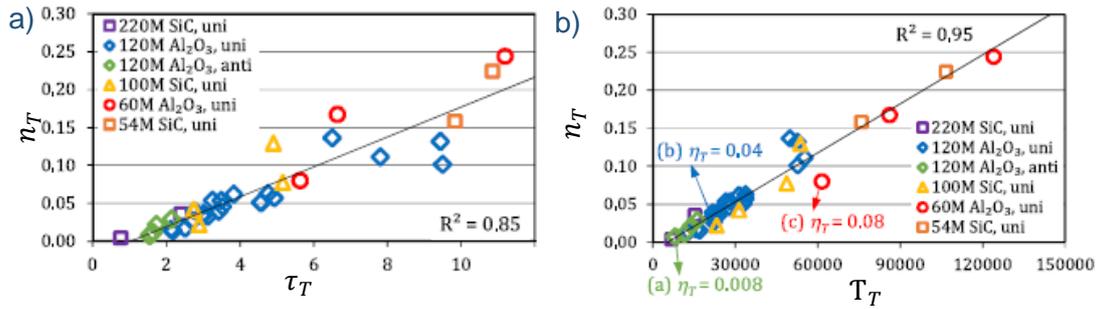


Figura 5.11: Influencia sobre la eficiencia de reperfilado: a) del promedio de cizalladura, b) grado de cumplimiento. Fuente: [15]

En cuanto a la aplicación industrial del proceso, la mayor desventaja es que tiene un coste de tiempo alto. La limitación principal para conseguir tiempos cortos es la fuerza del reperfilado, que genera efectos de vibraciones auto excitadas como el “chatter”. Entonces, se introduce un último parámetro, la tasa de arranque de material de la muela por unidad de fuerza  $\Delta_D$ .

$$\Delta_D = \frac{Q_D}{F_T} \quad [5.29]$$

Valores de  $\Delta_D$  altos, logran un arranque de muela más rápido para una misma fuerza y por lo tanto, el tiempo consumido es menor (ver

Figura 5.12). Valores altos de la tasa se consiguen con fuerzas de reperfilado bajas con un ratio de velocidad  $q_T$  negativo o contra-direccional y profundidades de pasada efectivas altas  $a_{T,eff}$ . Una forma de conseguir  $a_{T,eff}$  altas es aumentando la profundidad de pasa  $a_T$  o bien el ratio de solapamiento  $U_T$  del proceso. Otra manera de conseguir valores altos de  $\Delta_D$  se dan cuando la relación de los tamaños de grano de la herramienta de reperfilado entre la muela ( $d_{g,T}/d_{g,D}$ ) de 1,5.

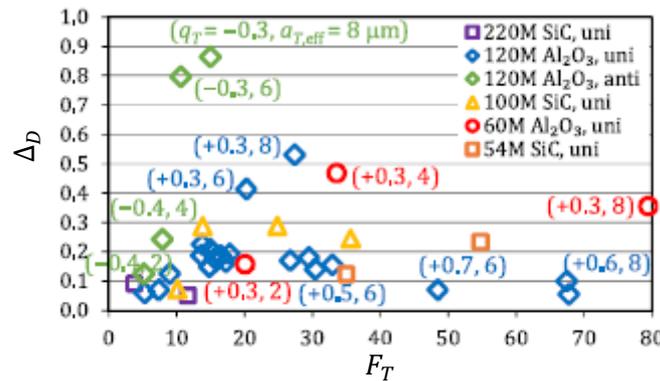


Figura 5.12: Diferentes tasas de arranque de material por unidad de fuerza en función de la fuerza del proceso. Fuente: [15]

Sin embargo, este proceso de reperfilado deja la muela con estructura cerrada sin apenas poros. Con muelas de aglomerante tipo resina, es necesario dejar que los granos sobresalgan de la superficie y el espacio suficiente entre ellos de manera que la distribución de filos de corte sea la óptima para conseguir el acabado y arranque de material requeridos, reducir el desgaste de la muela y posibilitar la formación de la viruta. Esto hace que el proceso de reavivado de la muela sea fundamental.

### 5.2.2. Reavivado

Como se ha visto en el apartado anterior, el proceso de reavivado en las muelas con aglomerante de resina es fundamental para conseguir las condiciones de corte óptimas. El reperfilado deja la muela con una estructura cerrada y los granos abrasivos no sobresalen lo suficiente. Con el reavivado se consigue remover el aglomerante sin causar ningún tipo de efecto en los granos. De esta manera se consiguen las condiciones de corte óptimas que aseguran la adecuada formación de viruta y arranque de material. Además, facilita la entrada del fluido de corte con lo que reduce la posibilidad de quemados durante el rectificado.

Es posible realizar el reavivado con diferentes herramientas. Generalmente, se emplean “stick”-s o moletas/discos de abrasivo convencional (Alúmina). Sin embargo, los materiales empleados para el reavivado no están limitados a abrasivos convencionales. “Stick”-s de aceros con bajo porcentaje de carbono y molibdeno son comunes para el reavivado de muelas de diamante con aglomerante de resina. Algunos fabricantes como “Diacut-Thinwheel” emplean una aleación de alto rendimiento como el tantalio.

La cinemática y geometría del reavivado mediante disco de abrasivo convencional se puede extrapolar de la del proceso de reperfilado detallada en el apartado anterior.

En cuanto al reavivado con “stick” es un proceso del que existe poca información documentada. Consiste en poner en contacto el punto más alto del “stick” con la muela mientras esta gira a una velocidad  $V_D$  y penetra la herramienta con una velocidad de avance  $V_{fr,D}$ . La herramienta de reavivado en este caso no realiza ningún tipo de movimiento y el esquema del proceso se puede ver en la Figura 5.13.

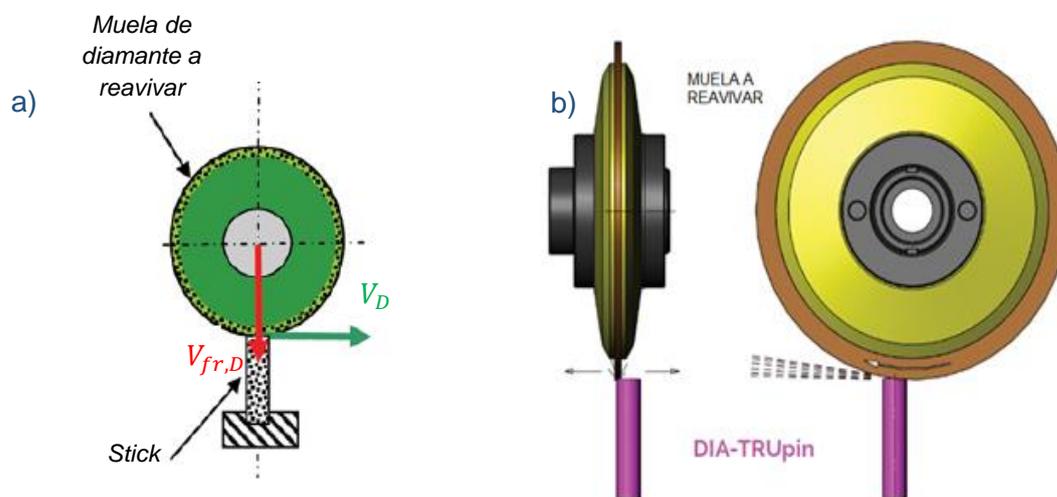


Figura 5.13: a) Esquema general del proceso. b) Esquema del fabricante “Diacut-Thinwheel”. Fuente: a) [3]. b) Diacut-Thinwheel

Es un proceso que se realiza dentro de la misma máquina de trabajo. La profundidad de pasada  $a_{ed}$  tiene una gran influencia en la superficie final de la muela. Una manera de optimizar el valor de la profundidad de pasada consiste en la monitorización de las fuerzas del proceso y en caso de que esto no sea posible, monitorizar la potencia en el cabezal de la muela es una alternativa. Por otro lado, el fabricante “Diacut-Thinwheel” recomienda empezar con una pasada de  $101,6 \mu\text{m}$  e ir reduciendo progresivamente a

---

medida que se realizan pasadas a los siguientes valores de  $76,2 \mu\text{m}$  /  $50,8 \mu\text{m}$  /  $25,4 \mu\text{m}$  /  $12,7 \mu\text{m}$ .

Como los granos abrasivos de la muela son de mayor dureza que los del “stick”, los granos de este último se desprenden del aglomerante cuando colisionan con un grano de la muela. Generalmente, los granos del “stick” se rompen en pedazos, lo que causa que rellenen sus propios poros. Por consiguiente, se crean varios filos de corte finos que ayudan en el corte del aglomerante de la muela. A medida que avanza el reavivado, los granos de la muela comienzan a sobresalir de la superficie. Una distancia óptima equivale a la mitad del diámetro del grano. A partir de ahí, continuar con el reavivado conlleva a desprendimientos de granos ya que el volumen de grano sumergido en el aglomerante no es suficiente para mantener el grano. En la parte posterior del grano se generan unos puentes de aglomerante ya que el material de la herramienta no es capaz de cortar el aglomerante en dichas zonas.

Que el “stick” esté húmedo es un aspecto importante a la hora de remover el aglomerante de la muela. Es necesario que esté empapado de refrigerante durante o antes del proceso de reavivado. Si bien en el reperfilado no era necesario, el empleo de refrigerante en el reavivado es fundamental.

El proceso de reavivado mediante “stick” se distingue por una cinemática más simple y el parámetro más influyente y que requiere de control es la profundidad de pasada  $a_{er}$ . Existen dos formas de controlar el avance, una es controlando la velocidad de avance  $V_{fr,D}$  y otra controlando que la fuerza generada sea constante.

Otro de los aspectos importantes del proceso es el análisis de las fuerzas del proceso. Como norma general, la fuerza que actúa en el reavivado tiene dos componentes; tangencial  $F_t$  y normal  $F_n$ . En la Figura 5.14 se puede ver la comparación entre dos procesos de reavivado con la diferencia del valor de la profundidad de pasada  $a_{er}$  (ver Tabla 5.4). Con una mayor profundidad de pasada en el reavivado ambas fuerzas tangencial y normal son mayores, generalmente.

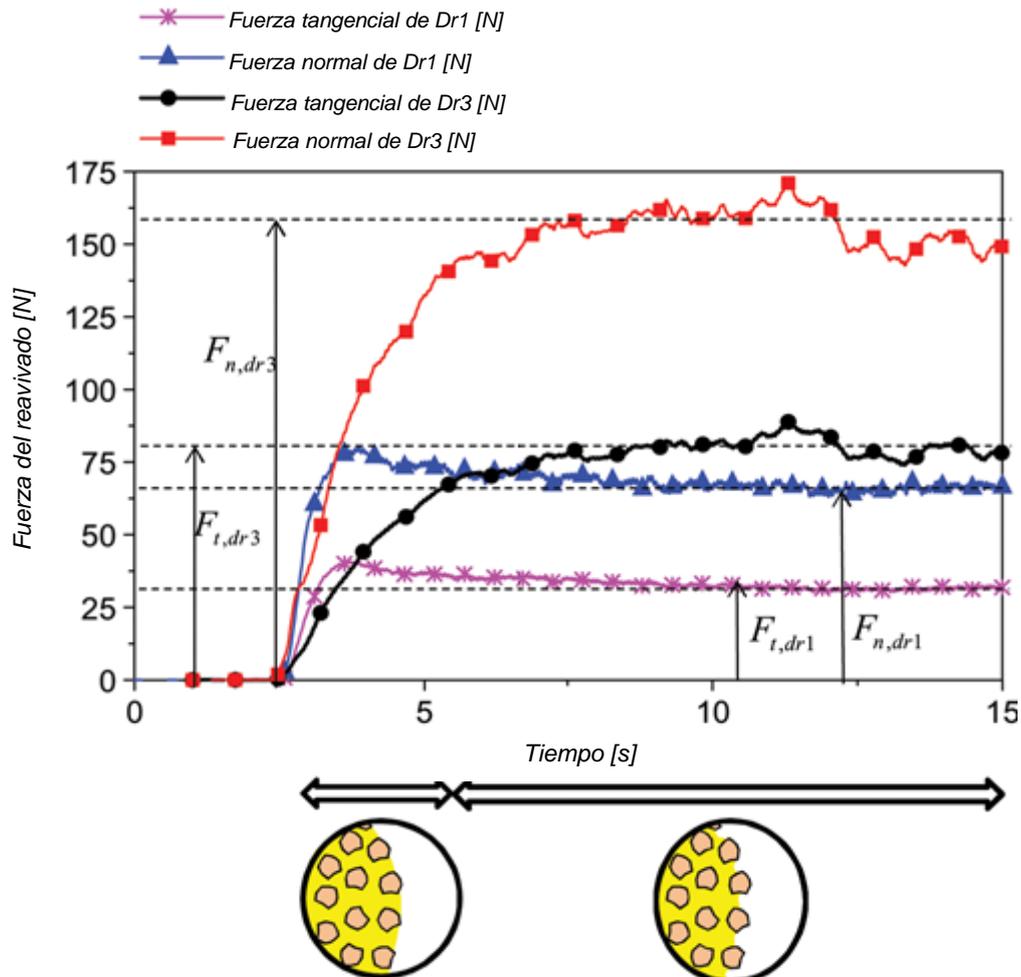


Figura 5.14: Evolución de las fuerzas del reavivado. Fuente: [3]

Al igual que en el proceso de reperfilado, la energía específica del reavivado es un parámetro representativo del proceso con un enfoque energético. Analíticamente se define de la siguiente manera:

$$e_d = \frac{F_t \cdot V_D}{h_s \cdot b_s \cdot V_{fr,D}} \quad [5.30]$$

Donde  $h_s$  y  $b_s$  corresponden a la altura y anchura de la herramienta de reavivado, respectivamente. Uno de los parámetros que más influyen en la energía específica es el tamaño de grano de la herramienta de reavivado. Se puede ver como un grano más fino conlleva a mayor energía específica y mayores fuerzas de reavivado (ver Tabla 5.4).

Tabla 5.4: Condiciones de reavivado. Fuente: [3]

	Dr1	Dr2	Dr3
$V_{fr,D}$ [mm/min]	60	180	60
$a_{ed}$ [mm]	30	30	15
$F_t$ [N]	32	100	79
$F_n$ [N]	67	174	153
$e_d$ [J/mm <sup>3</sup> ]	0,89	0,93	2,21
Tamaño de grano herramienta	150	150	320

### 5.2.3. Análisis topográfico

Para el análisis topográfico es necesario definir tres parámetros que sirven para caracterizar la topografía de una muela abrasiva. Son parámetros de rugosidad 3D. En primer lugar, la diferencia en altura entre el pico más alto y el plano medio se expresa mediante  $S_p$ . En segundo lugar, la diferencia en altura entre el pico más alto y el valle más profundo corresponde a  $S_z$ . Y por último, se encuentra  $S_v$ , que muestra la diferencia en altura entre el plano medio y el valle más profundo.

Existen trabajos [3] que demuestran que la topografía de la muela abrasiva (en concreto de diamante) varía en función de los procesos de reperfilado y reavivado. Por lo tanto, esta variación se ve reflejada en las diferencias entre los valores de los tres parámetros previamente definidos en este apartado.

Volviendo a los resultados mostrados en la Figura 5.8 correspondientes a las condiciones expuestas en la Tabla 5.3, se recuerda que la condición *Tr3* deja una muela con estructura cerrada y los granos poco sobresalientes de la superficie. En cambio, con la condición *Tr4* sucedía lo opuesto, los granos sobresalen suficientemente de la superficie de una muela con estructura más abierta (ver apartado 5.2.1. *Reperfilado* para mayor detalle). Esto se puede apreciar en la Figura 5.15, como los granos en las condiciones de *Tr4* sobresalen más de la superficie.

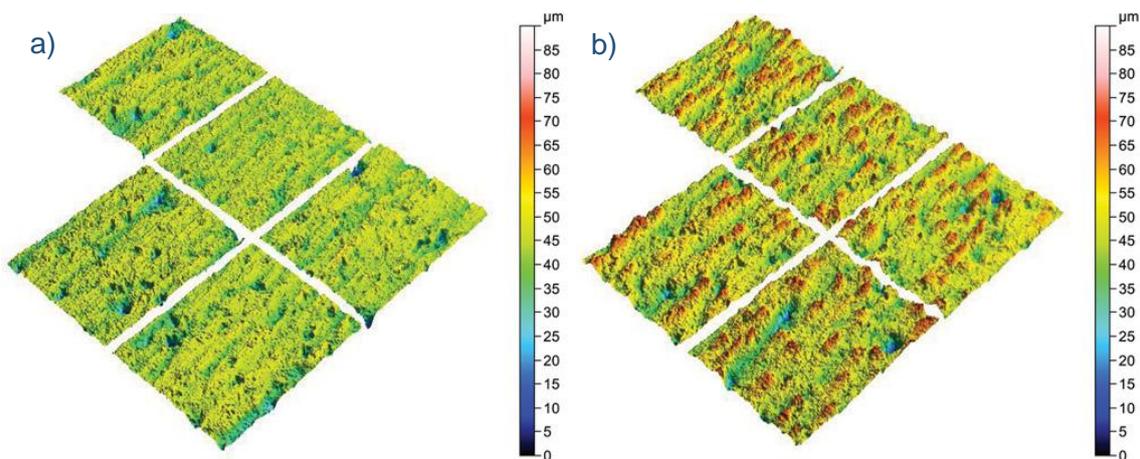


Figura 5.15: a) Topografía 3D con las condiciones *Tr3*. b) Topografía 3D con las condiciones *Tr4*. Fuente: [3]

Después de aplicar dichos procesos de reperfilado los valores que se obtienen de los parámetros para caracterizar la topografía ( $S_p$ ,  $S_z$ ,  $S_v$ ) se recogen en la Figura 5.16. Se puede ver como el reperfilado con mayor velocidad de deslizamiento (*Tr4*) resulta en un  $S_p$  mayor, lo que confirma que los granos sobresalen más que con un reperfilado con menor velocidad de deslizamiento (*Tr3*). En la figura también se recogen los datos tras reavivar la muela después del reperfilado *Tr3*. Se distinguen dos condiciones de reavivado *Dr1* y *Dr2* (ver Tabla 5.4). Se observa que el reavivado aumenta el valor de  $S_p$  en un rango de 20-30  $\mu\text{m}$ . El valor del parámetro  $S_p$  es un valor que se debe controlar, ya que algunos autores [17] recomiendan que el grano no sobresalga de la superficie un 30% de su longitud total. Es decir, el valor de  $S_p$  se debe mantener dentro de ese límite para evitar desprendimientos de granos prematuros.

Por otro lado, se aprecia que un aumento de la velocidad de avance radial de la muela en el reavivado conlleva a un aumento tanto de  $S_v$  como de  $S_z$ . En el caso analizado se obtiene un aumento de 15  $\mu\text{m}$ .

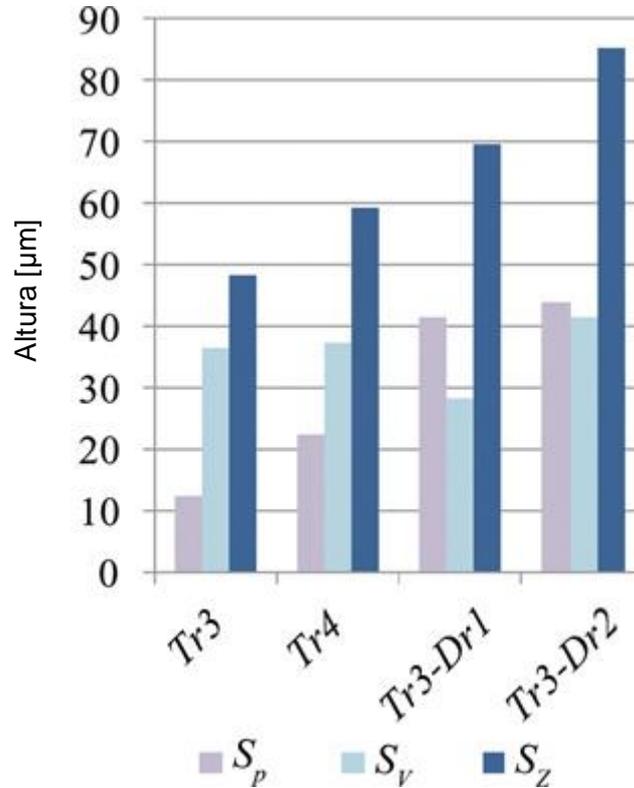


Figura 5.16: Valores de los parámetros para caracterizar la topografía. Fuente: [3]

#### 5.2.4. Mecanismo de arranque

En este apartado se estudia el mecanismo de arranque predominante del método. El estudio se realiza a tanto a nivel macroscópico como microscópico. Por lo tanto, de manera que se facilite el análisis de los granos de la muela se definen tres fases generales en la vida útil de un grano de diamante (ver Figura 5.17).

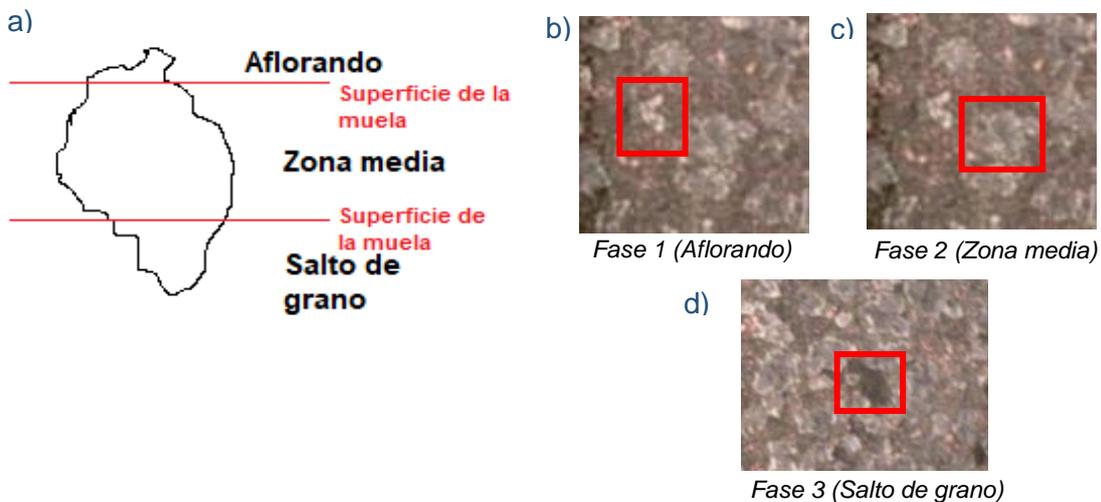


Figura 5.17: a) Fases de los granos. b) Fase 1. c) Fase 2. d) Fase 3

Las Figura 5.17b, Figura 5.17c y Figura 5.17d se han obtenido mediante un microscopio Dino-Lite (ver 6.1.2. Descripción de equipos) como parte de este trabajo. En la Figura 5.17b se puede ver un grano en su primera fase. En dicha fase la punta del grano previamente enterrado en el aglomerante comienza a aparecer. Al comienzo de esta fase se aprecia una pequeña superficie blanca que va aumentando el tamaño a medida que el diamantado progresa. Esto sucede debido a que cada vez mayor volumen de grano asoma en la superficie y continua así hasta alcanzar la siguiente fase. En la Figura 5.17c se puede ver un grano en la fase 2. Es la zona de trabajo del grano y la fase más larga. En esta fase el grano muestra un color más oscuro y opaco en la imagen tomada por el microscopio. La mayor parte del volumen del grano continúa apareciendo a media que avanza el diamantado. Es la fase previa al salto de grano que se puede ver en la Figura 5.17d. Esta es la tercera y última fase del grano. El volumen que aún queda dentro del aglomerante de la muela no es suficiente para mantener el grano cuando este está sometido a las fuerzas del diamantado. Entonces, el grano salta dejando un hueco vacío en la superficie.

Una vez definido lo anterior, se procede a estudiar el mecanismo de arranque durante el proceso. La Figura 5.18 se obtiene en un análisis mediante SEM (“Scanning Electron Microscope”) [15] donde se estudia la viruta generada en el proceso. Además, mediante un material magnético se separan de la viruta gran proporción de los diamantes.

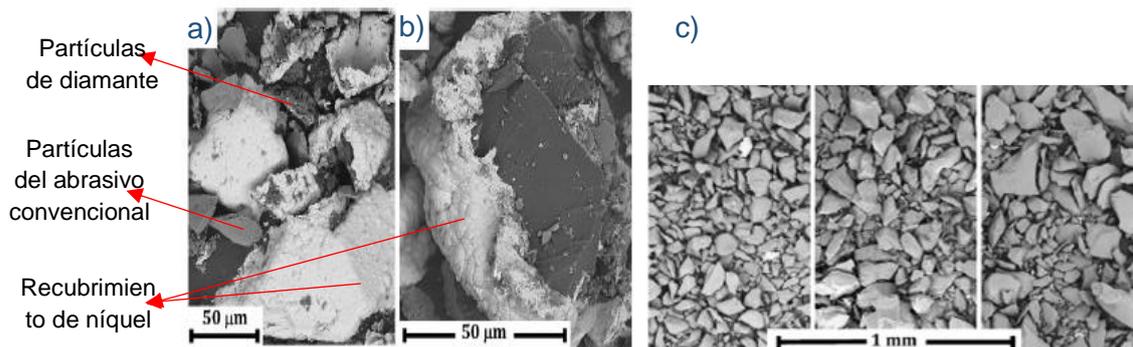


Figura 5.18: a) Viruta del proceso. b) Diamante individual. c) Viruta de abrasivo convencional generada en el proceso. Fuente: [15]

Aunque en la viruta se encuentre pequeñas partículas de diamante, el autor [15] defiende que la gran mayoría de los diamantes desprendidos mantienen su tamaño original. Por lo tanto, el mecanismo de arranque predominante es el salto de grano, es decir, los granos de diamante alcanzan la fase 3 sin variar apenas el tamaño debido a la abrasión del aglomerante generada en el proceso.

En cuanto al mecanismo de arranque predominante de los granos de la herramienta de reperfilado es la fractura de grano [15] ya que observando la viruta formada en el proceso (Figura 5.18c) se puede ver como en su totalidad se tratan de partículas pequeñas de grano.

En este trabajo se va estudiar el mecanismo de arranque de los granos de diamante en la muela. Se van a diferenciar dos mecanismos: Salto de grano y fractura de grano. Para detectar ambos el trabajo se basa en el área del grano visible en la superficie de la muela. A medida que se realizan pasadas tanto de reperfilado como de reavivado el área del grano que se aprecia en la superficie varía. Si no se detecta ninguna reducción

en el porcentaje de área antes de que el grano haya dejado la superficie se considera que el mecanismo de arranque es por salto de grano. En cambio, si se detecta que el área del grano comienza aumentando con las pasadas para posteriormente ir reduciéndose, se considera que se consigue fracturar el grano, de lo contrario se apreciaría siempre el grano en su mayor tamaño.

### 5.2.5. Influencia en el rectificado

En este apartado se estudian los efectos que puede tener en el rectificado el diamantar la muela con la combinación de reperfilado y reavivado. Para ello, existen trabajos [3] que se basan en el espesor de viruta equivalente  $h_{eq}$  del proceso definido [17] mediante la expresión [ 5.31 ].

$$h_{eq} = \frac{Q'_w}{V_D} \quad [ 5.31 ]$$

Donde  $Q'_w$  es el caudal específico de viruta del rectificado que estima el volumen de material rectificado por cada mm de anchura de la muela abrasiva. La rugosidad de la pieza se puede expresar en función de este parámetro. En la Figura 5.19 se muestra la rugosidad obtenida después de rectificar una probeta cilíndrica WC-Co-Cr 86/10/4 con recubrimiento duro mediante HVOF. En la figura se muestran los resultados obtenidos de rugosidad al instante posterior al reavivado y después de rectificado la probeta 75 cm<sup>3</sup>. Las condiciones con las que se reperfila y reaviva la muela se pueden ver en las la Tabla 5.3 y Tabla 5.4 respectivamente.

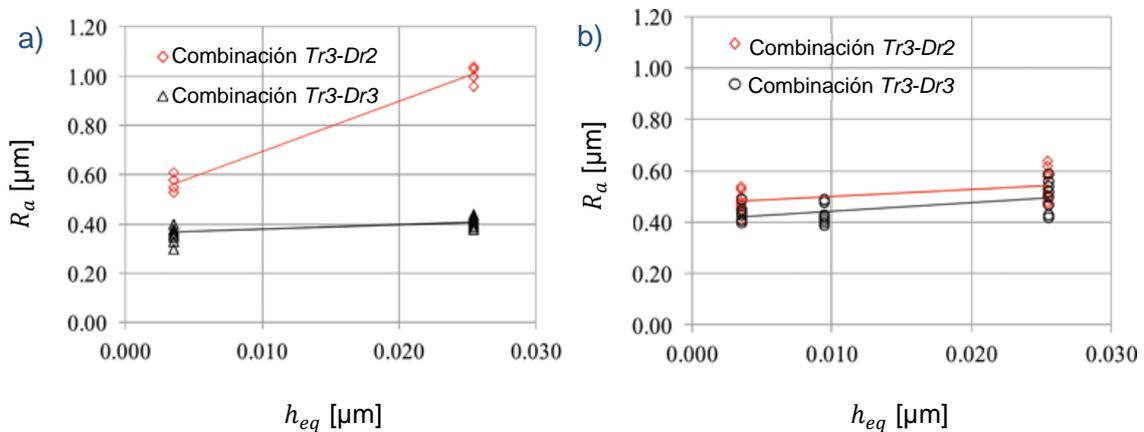


Figura 5.19: Rugosidad en la pieza: a) Instante después de reavivar. b) Después de rectificar 75 cm<sup>3</sup> de probeta. Fuente: [3]

Se observa que con un reavivado con menor velocidad de avance radial  $V_{fr,D}$ , menor profundidad de pasada  $a_{ed}$  y con un tamaño de grano más fino deja mejor rugosidad en la pieza rectificada. Esto se relaciona con una mejor distribución de los granos y concentración de granos en la herramienta de reavivado, lo cual aumenta el número de filos de corte. Además, la rugosidad obtenida es menos sensible al espesor de viruta equivalente  $h_{eq}$ , y por lo tanto, a las condiciones del rectificado.

Para estudiar la influencia que tiene el desgaste de la muela en la rugosidad se estudia la misma después de rectificar 75 cm<sup>3</sup> de la probeta. Se observa que tras un reavivado

con un tamaño de grano más fino y con menor profundidad de pasada y velocidad de avance, la rugosidad de la pieza es menos sensible al desgaste de la herramienta.

---

## 6. Banco de ensayos experimental

### 6.1. Descripción de fases, protocolo de ensayos y equipos

En este apartado se trata la parte experimental del trabajo donde se detallan los ensayos realizados. Entre otros aspectos se explican las fases del trabajo, así como el protocolo de ensayos y los procedimientos llevados a cabo.

#### 6.1.1. Descripción de fases y metodología

Partiendo del objetivo principal del trabajo, que es estudiar el proceso completo de diamantado (reperfilado y reavivado) de muelas de diamante con aglomerante de resina, el trabajo se divide en tres grandes fases. Las dos fases principales engloban lo que sería el proceso completo de diamantado, diferenciadas en reperfilado y reavivado. Ambas fases vienen precedidas por una fase previa donde se realiza el montaje y la puesta a punto del banco de ensayos.

Entonces, la **fase 0** trata de la elección del sistema de accionamiento para las herramientas de reperfilado y reavivado, realizar el montaje necesario en la máquina de ensayos y el acondicionamiento de las herramientas.

La **fase 1** del trabajo consiste en estudiar el proceso de reperfilado. Como herramienta se estudian dos tipos diferentes; moletas o discos rotativos de Carburo de Silicio (SiC) y una herramienta estática de tantalio. En esta fase de reperfilado se busca conseguir eliminar la capa de la muela que en la práctica habría perdido la capacidad abrasiva, es decir, una capa con granos planos y material embotado entre otros mecanismos de desgaste. Además, busca al mismo tiempo recuperar la forma geométrica de la muela con precisión. Sin embargo, el reperfilado se divide a su vez en dos fases ya que es de esperar que eliminar la capa de la muela conlleve a una pérdida mayor de la geometría. En primer lugar, con el objetivo de eliminar la capa desgastada y recuperar la capacidad abrasiva de la muela se realiza el reperfilado paso 1 (fase 1.1). Entonces, se procede a otro proceso de reperfilado con el que recuperar dicha geometría (reperfilado paso 2 o fase 1.2).

Como se ha argumentado en el apartado 5. *Estado del arte* el reperfilado de muelas con aglomerante de resina deja la muela con estructura cerrada y los granos apenas sobresalen de la superficie. De esta manera no es posible conseguir el acabado ni el arranque de material requerido para el rectificado ni la adecuada formación de la viruta. Además, dificulta la entrada del fluido de corte. Es por eso que la **fase 2** consiste en reavivar la muela para conseguir las condiciones de corte óptimas. El objetivo es conseguir abrir la estructura de la muela y dejar los granos de diamante sobresalientes de la superficie.

En la Figura 6.1 se recogen las fases del trabajo. Como puede verse en la figura, el reperfilado paso 1 (fase 1.1) y el reavivado (fase 2.1) se estudian mediante el método de evaluación de la superficie, ya que ambas están relacionadas con el estado de la superficie de la muela abrasiva. Por otro lado, el reperfilado paso 2 está asociado con el estado del perfil o geometría de la muela, por lo que se estudia con el método de evaluación de la geometría. Ambos métodos están dentro del método de evaluación de la superficie de muelas abrasivas desarrollado como parte de este trabajo. Se dejan los detalles de los métodos de evaluación para el apartado 7. *Desarrollo de un método de evaluación del estado general de la muela abrasiva* y este apartado se centra exclusivamente en el aspecto de los ensayos experimentales.



Figura 6.1: Fases del trabajo

Una vez definidas las fases del trabajo en la Figura 6.2 se puede ver la secuencia de los pasos que habría que tomar para un proceso completo de diamantado. Es decir, un esquema de la metodología para el estudio del reperfilado y reavivado de muelas de diamante con aglomerante de resina. El primer paso consiste en el reperfilado paso 1 con unas condiciones iniciales establecidas. Para saber si se ha logrado, se evalúa la superficie de la muela mediante el método de evaluación de superficie. Este paso se realiza hasta cinco veces. En caso de conseguirlo, se procede a la recuperación de la geometría, sino se vuelve al paso uno con una moleta más dura y en caso de ser esta la más dura se cambian los parámetros a unos más agresivos. En caso negativo, se retrocede al primer paso de reperfilado con las siguientes variantes:

- Se cambia la herramienta de reperfilado por la siguiente más dura. En caso de haber empleado la SiC H, se realiza el mismo proceso, pero con la moleta SiC J.
- Si la moleta empleada es la más dura, es decir, SiC L, se vuelve a la moleta SiC H y se cambian los parámetros de reperfilado.

En caso positivo se procede al reperfilado paso 2 hasta conseguir el perfil necesario en la muela. La manera de conocer el estado del perfil es mediante el método de evaluación de geometría. Una vez recuperado se completa el proceso de reperfilado y se procede al reavivado de la muela. La forma de estudiar el reavivado es mediante el método de evaluación de superficie. De esta manera se da por terminado el estudio de proceso completo.

Cabe destacar que debido a la complejidad del reperfilado, el estudio específico centrado en el reavivado se deja para posteriores trabajos y este trabajo se centra en el reperfilado y en la evaluación del estado de la muela. Se ensaya el proceso de reperfilado con hasta tres herramientas diferentes y tres condiciones diferentes detalladas más adelante en el apartado 6.2. *Desarrollo de procedimientos.*

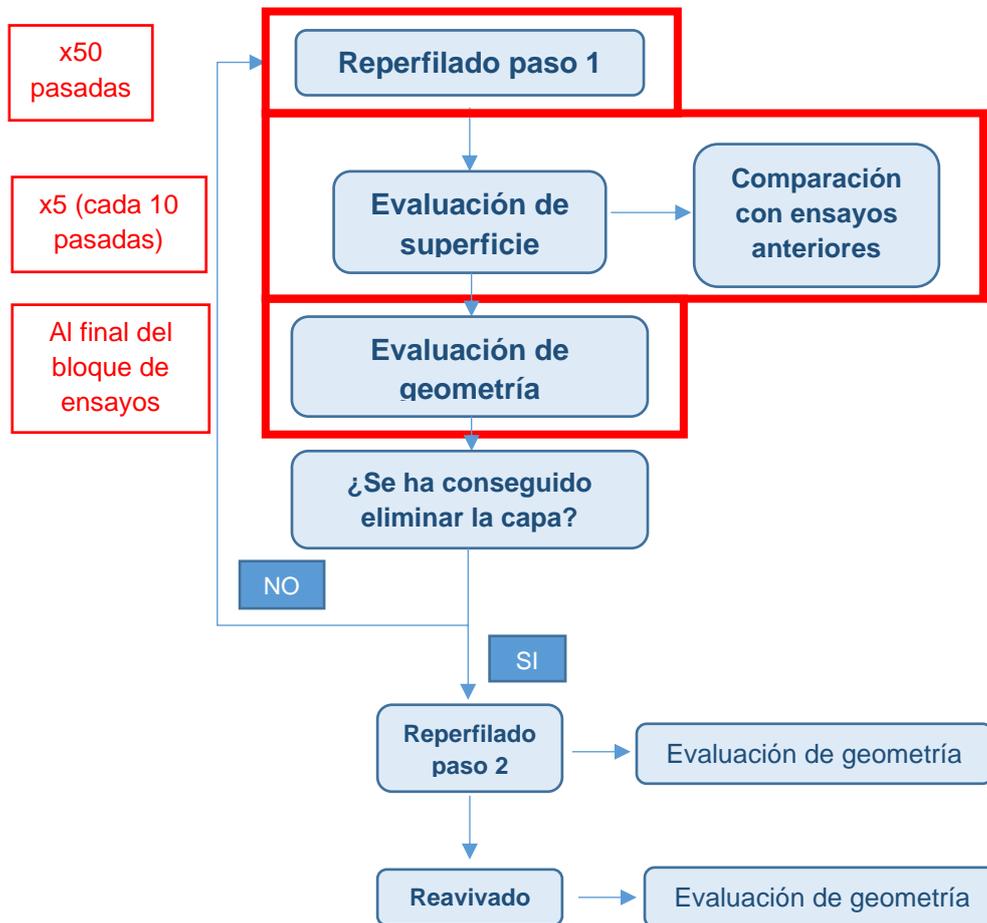


Figura 6.2: Esquema de la metodología para el estudio del diamantado de muelas con el método seleccionado.

En el apartado 6.2. *Desarrollo de procedimientos* se profundiza en las diferentes fases realizadas en el trabajo. Aunque en el trabajo no se analizan todas las fases debido a la complejidad de la fase 1 de reperfilado, se desarrolla la metodología y las herramientas con las que poder estudiar el proceso completo.

### 6.1.2. Descripción de equipos

En este apartado se detallan los equipos empleados para el desarrollo del estudio.

#### 6.1.2.1. Muela abrasiva, Diamantadores rotativos / Moletas y Stick de Tantalio

##### ➤ Diamantadores rotativos / Moletas

En primer lugar, con el fin de facilitar la identificación de la herramienta empleada, a cada una de ellas se le asigna una denominación. De aquí en adelante, para referirse a las moletas se emplea el nombre asignado en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1: Descripción de las herramientas del reperfilado

Denominación /Dimensiones	Tipo de abrasivo	Tamaño de grano	Dureza	Estructura	Aglomerante
<b>SiC H /</b> 125x25x14	Carburo de Silicio	70 (fino)	H	7	Vitrificado
<b>SiC J /</b> 125x25x14	Carburo de Silicio	70 (fino)	J	7	Vitrificado

Las moletas empleadas en el trabajo son de SiC y se dividen principalmente en función de la dureza: dureza H y J. Siendo SiC H la más blanda y SiC J la de mayor dureza. Las herramientas han sido facilitadas por Abrasivos UNESA S.L.



Figura 6.3: Moleta de SiC.

➤ **Muela RD D252R100BG10**

La muela abrasiva ha sido facilitada por Abrasivos UNESA S.L. y en la Tabla 6.2 se recogen las características de la misma.

Tabla 6.2: Características de la muela

<b>Tipo de abrasivo</b>	Diamante
<b>Tamaño de grano</b>	252
<b>Dureza</b>	R (duro)
<b>Concentración de grano</b>	100 (alta)
<b>Tipo de aglomerante</b>	B (resina fenólica)

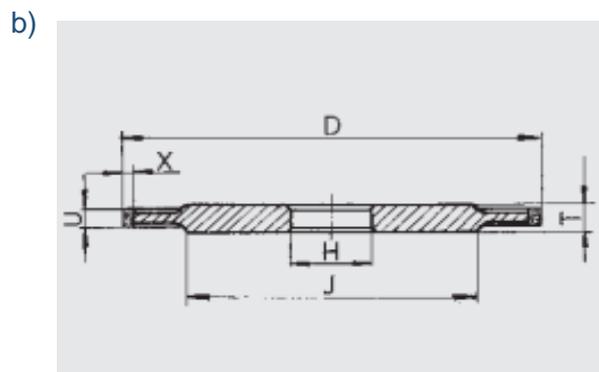


Figura 6.4: a) Muela del trabajo. b) Referencia 14 A1 FEPA. Fuente: Comola REFayma

En cuanto a dimensiones la muela sigue la referencia 14 A1 de la norma FEPA. A continuación, se muestra la referencia y las dimensiones de la muela del trabajo.

Tabla 6.3: Dimensiones de la muela según FEPA

D [mm]	400
T [mm]	12
U [mm]	6,25
X [mm]	6
H [mm]	160

➤ **Stick / Bloque de Tantalio**

El bloque de tantalio es un cilindro de diámetro 9,55 mm y longitud 27,94 mm. También conocido como “Stick” de tantalio y es empleado como herramienta de reperfilado. Se puede ver en la siguiente Figura.

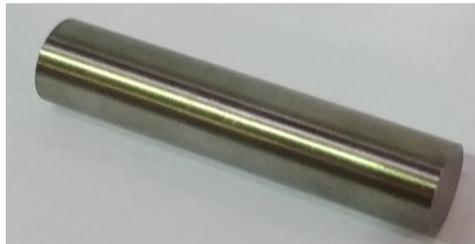


Figura 6.5: Bloque de tantalio

**6.1.2.2. Herramientas auxiliares: Bloque de grafito y Moleta de corindón blanco**

El bloque de grafito se trata de un bloque de dimensiones 60 mm x 18 mm x 15 mm. Se emplea en el método de evaluación de geometría y se puede ver en la Figura 6.6a.

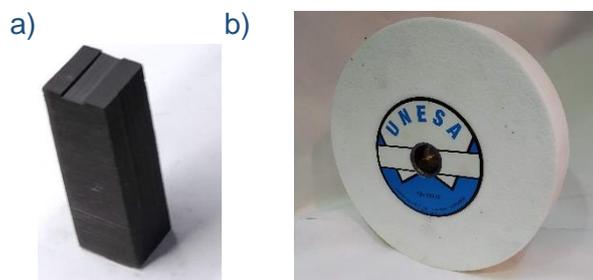


Figura 6.6: a) Bloque de grafito. b) Moleta de corindón

El disco de  $Al_2O_3$  se emplea previo al comienzo de los ensayos con el objetivo de condicionar la superficie de la muela. En la siguiente tabla se pueden ver sus características generales y se muestra en la Figura 6.6b.

Tabla 6.4: Características de la herramienta de corindón blanco

Denominación /Dimensiones	Tipo de abrasivo	Tamaño de grano	Dureza	Estructura	Aglomerante
1º CBL / 125x25x14	Corindón (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	60 (medio)	H	6	Vitrificado

### 6.1.2.3. Rectificadora cilíndrica FG600S de DANOBAT

Se trata de una rectificadora para el rectificado exterior de cilindros fabricada por DANOBAT. Es una máquina de tres ejes (X, Z, C) que tiene capacidad de realizar proceso de diamantado de diferentes geometrías y rectificado. Los ensayos llevados a cabo en este trabajo se han realizado en esta máquina ubicada en la Escuela de Ingeniería de Bilbao.



Figura 6.7: Rectificadora cilíndrica DANOBAT FG600S

Tiene capacidad para trabajar con muelas de hasta 450 mm de diámetro a una velocidad de corte máxima de 120 m/s. El ancho de máximo permitido es de 26 mm. Tiene una potencia máxima en el cabezal de la herramienta de 15 kW.

### 6.1.2.4. Sistema de refrigeración

Para el condicionamiento de las herramientas se emplea refrigerante. En este trabajo se emplea taladrina con una concentración del 3,2 %. El fluido sale de la boquilla a 1 bar. Es posible regular esta presión mediante 3 válvulas que contiene el depósito del refrigerante.



Figura 6.8: Sistema de refrigeración

#### 6.1.2.5. Microscopio Digital Dino-Lite AM7515MZTL EDGE

Es un microscopio digital del fabricante Dino-Lite empleado para el análisis del estado de la muela.



Figura 6.9: Microscopio Digital Dino-Lite

En la siguiente tabla se agrupan las características técnicas del instrumento.

Tabla 6.5: Características técnicas del microscopio Dino-Lite

<b>Material de la óptica</b>	Vidrio
<b>Aumentos</b>	10x-140x
<b>Enfoque</b>	Manual
<b>Material de la carcasa</b>	Aluminio
<b>Iluminación</b>	8 LED blancos
<b>Ajuste de brillo</b>	Si
<b>Alimentación</b>	Mediante cable USB
<b>Filtro</b>	Filtro polarizador ajustable
<b>Refresco</b>	30 fps
<b>Software</b>	DinoCapture 2.0
<b>Conexión</b>	USB 2.0
<b>Formato de imagen</b>	BMP, GIF, PNG, JPF, TIF, RAS, PNM,
<b>Dimensiones</b>	10,5 cm x 3,2 cm
<b>Peso</b>	125 gr

### 6.1.2.6. Motor 1,5 kW ER11 220V / Variador de frecuencia Huanyang

El accionamiento empleado en los ensayos y su variador de frecuencia con el que controlar la velocidad se muestran en la Figura 6.10.



Figura 6.10: a) Motor 1,5 kW ER11 220V. b) Variador de frecuencia Huanyang

En la Tabla 6.6 y Tabla 6.7 se agrupan las características técnicas del accionamiento y el variador de frecuencia, respectivamente.

Tabla 6.6: Características técnicas del accionamiento

Características técnicas	
Material	Acero inoxidable
Tamaño (Diámetro x Longitud)	65mm x 208 mm
Potencia [kW]	1,5
Voltaje [V]	220
Intensidad [A]	6
Frecuencia [Hz]	0-400
Velocidad [rpm]	0-24000
Refrigeración	Aire frio
Lubricación de lo rodamientos	Grasa
Rodamientos	4, Contacto angular, C7002
Peso neto [kg]	3

Tabla 6.7: Características técnicas del variador de frecuencia

Características técnicas	
Voltaje de entrada [V]	220
Voltaje de salida [V]	0-220
Frecuencia de entrada [Hz]	48-63
Frecuencia de salida [Hz]	0-400 Hz
Fase de entrada	1/3
Fase de salida	3
Intensidad [A]	7
Potencia [Kw]	1,5

### **6.1.2.7. Acoplamiento del eje motor y platillo de seguridad**

Se fabrica un acoplamiento con el objetivo de que sea posible colocar las herramientas de reperfilado y reavivado en el accionamiento. Se fabrica con acero común F-114. El acoplamiento se muestra en la Figura 6.11a.



*Figura 6.11: a) Acoplamiento del eje motor. b) Platillo de seguridad.*

Para mayor sujeción y protección de las herramientas se coloca un platillo de seguridad ambos lados de las mismas en el eje del motor. Se muestra en la Figura 6.11b. Es un disco de diámetro 75 mm y 8 mm de ancho. El agujero central es de 14 mm.

## **6.2. Desarrollo de procedimientos**

En este apartado se detallaran las distintas fases del trabajo definidas en 6.1.1. *Descripción de fases y metodología.* Como se comenta anteriormente, el trabajo centra los ensayos experimentales en el proceso de reperfilado debido a su complejidad y la necesidad de estudiar a fondo dicho proceso. Por esta razón se deja la fase 2 para futuros estudios.

### **6.2.1. Puesta a punto del banco de ensayos (Fase 0)**

Como paso previo a realizar los ensayos es indispensable preparar y acondicionar todos los equipos necesarios para el desarrollo. En este apartado se detallan los pasos tomados en este sentido en el trabajo, desde la elección del tipo de accionamiento hasta el último paso de acondicionamiento de las herramientas de reperfilado y reavivado.

#### **6.2.1.1. Elección del accionamiento**

Tanto las herramientas de reperfilado y reavivado como la muela de diamante han sido suministradas por Abrasivos UNESA S.L. Para el caso de la muela, no existen ningún inconveniente a la hora instalarla en la máquina, ya que las dimensiones están dentro de los límites permitidos por la máquina. Sin embargo, con las moletas no sucede lo mismo. Estas disponen de un diámetro interior de 14 mm, y el husillo para diamantadores rotativos de la máquina tiene un eje de 40 mm de diámetro. Además, al comienzo del trabajo se desconoce el comportamiento tanto de la muela como de las moletas en las condiciones de los ensayos. Por lo tanto, a fin de evitar cualquier daño costoso de reparar en la máquina se opta por realizar el montaje de un husillo para

diamantar externo a la máquina. Otra de las razones por las que se toma esta decisión es la posibilidad de utilizar dicho husillo en otras rectificadoras de la escuela.

El primer paso es buscar un motor adecuado para accionar las moletas. Después de estudiar el mercado, el tipo de accionamiento óptimo, los electrohusillos de diamantado, se descartan debido a la inviabilidad de su presupuesto. Por lo tanto, se comienza a buscar motores trifásicos con las características técnicas suficientes como para soportar los esfuerzos del proceso. Es conocido que las fuerzas que se generan en un reperfilado con diamantadores rotativos son bajas en comparación con las que se generan con diamantadores estáticos y, en consecuencia, la potencia consumida por un husillo de diamantado es relativamente baja ( $<0,2$  kW) [11]. Teniendo en cuenta esto, para los ensayos del trabajo, al reperfilar una muela de diamante se trata de un proceso de mayor agresividad y, por lo tanto, optando por un enfoque conservador se escoge un motor de 1,5 kW.

Otro de los factores que se tienen en cuenta para escoger el motor son las dimensiones y la velocidad de giro permitida. En cuanto a la velocidad de giro permitida, los ensayos están pensados para trabajar con una velocidad entre 3000-5000 *rpm*. Por lo tanto, el motor debe ser capaz de alcanzar dicha velocidad con carga. Las demás características del motor se recogen en el apartado 6.1.2. *Descripción de equipos*.

Sin embargo, el aspecto más crítico a la hora de elegir el motor es la longitud del eje del motor. Es necesaria una longitud suficiente como para colocar la moleta con los dos platillos de seguridad a cada lado de 8 mm de ancho. La moleta dispone de una anchura de 25 mm. Por lo tanto, es necesaria una longitud del eje de al menos 41 mm. Ningún motor disponía de tal longitud, por lo que, se opta por fabricar un acoplamiento para el eje. El eje del motor se puede ver en la Figura 6.12a. Una vez elegido el motor, se diseña y fabrica el acoplamiento.



Figura 6.12: a) Eje del motor tipo ER11. b) Acoplamiento del eje motor

Teniendo en cuenta que el eje dispone de una rosca M15 con un paso de fabricación compleja se opta por dos tornillos pasantes que al hacer presión sobre las ranuras del eje del motor sujetan el acoplamiento. El acoplamiento se puede ver en la Figura 6.12b.

El motor trifásico elegido para el accionamiento se puede ver en el apartado 6.1.2. *Descripción de equipos*.

### 6.2.1.2. Montaje en máquina

Una vez elegido el accionamiento, se procede a su montaje en la rectificadora. Esta máquina dispone de tres grados de libertad o ejes; dos traslaciones en dirección X y Z y una rotación respecto del eje de la pieza a rectificar (C). Ver Figura 6.13.

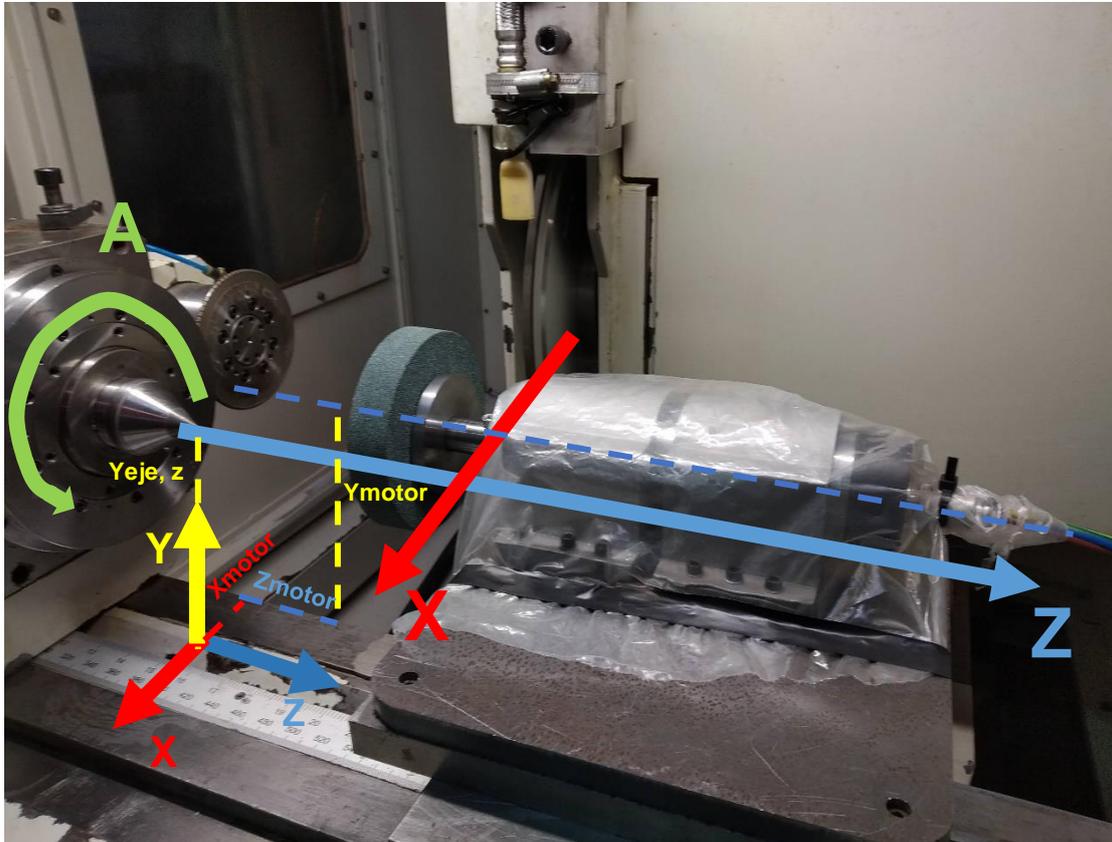


Figura 6.13: Ejes de la máquina

Por razones obvias de precisión, los ejes del montaje externo deben estar alineados respecto a los ejes de la máquina. Es decir, el eje de la moleta o el del motor externo, debe de estar a la misma altura que el eje de la muela además de ser paralelos entre sí. Por lo tanto, para que el montaje sea preciso, el eje del motor debe cumplir las siguientes restricciones:

- Debe de estar a la misma altura que la intersección entre los ejes X y Z ( $Y_{motor} = Y_{eje,Z}$ ).
- Ser paralelo al eje Z de la máquina (perpendicular al eje X).

Con el fin de cumplir con la primera restricción,  $Y_{motor}$  debe ser igual a  $Y_{eje,Z}$ . En primer lugar, se consulta el valor de  $Y_{eje,Z}$  en los planos de la rectificadora. Dicha distancia mide 148 mm. El motor se eleva mediante dos placas atornilladas entre sí (placa superior y placa inferior) que al mismo tiempo están atornilladas a un utillaje que se coloca en la misma guía de la máquina que el punto y contrapunto. Dicho utillaje dispone de la geometría que permite la traslación sobre la guía. El modo de sujeción del motor consiste en dos abrazaderas atornilladas a la placa superior. Por lo tanto, la altura del motor es igual a la suma de las alturas del utillaje en la guía de la máquina  $Y_{utillaje}$ , las dos placas (inferior  $Y_{PI}$  y superior  $Y_{PS}$ ) y la distancia desde la cara inferior de las

abrazaderas hasta el eje del motor (igual a la altura de la abrazadera  $Y_{Abrazadera}$  menos su radio  $r_{Abrazadera}$ ). Entonces, se debe cumplir la siguiente expresión.

$$Y_{motor} = Y_{Utillaje} + Y_{PI} + Y_{PS} + (Y_{Abrazadera} - r_{Abrazadera}) \quad [6.1]$$

El utillaje montado sobre la guía de la máquina y la placa superior están disponibles en el taller mecánico de la Escuela de Ingeniería de Bilbao y las abrazaderas vienen incluidas con el pedido del motor. Por lo tanto, las alturas de estos elementos se toman como fijas y la única variable es la de la placa inferior. Partiendo de una placa cualquiera del taller, se mecaniza hasta conseguir la altura necesaria. El valor de dicha altura se obtiene de la expresión [ 6.1 ].

$$148mm = 60mm + Y_{PI} + 10mm + (44,5mm) \longrightarrow Y_{PI} = 33,5 mm$$

Una vez cumplida la primera restricción se procede a cumplir con la segunda. Para ello, los ejes del motor y de la muela deben ser paralelos. De la orientación en la que se atornillan las abrazaderas a la placa superior depende dicho paralelismo. Por lo tanto, el mecanizado de estos agujeros se toma como un aspecto crítico. Para conocer la posición precisa de estos agujeros, se coloca el motor encima de la placa superior dentro de las abrazaderas. A continuación, se acerca la muela al motor y se orienta el eje del motor de manera que sean exactamente paralelos. Este paso se realiza con la ayuda de un reloj comparador milesimal. En la siguiente figura se puede ver una fotografía del proceso.



Figura 6.14: Paralelismo motor - muela

Una vez se acepta el paralelismo, se marcan en la placa superior la posición de los agujeros (las abrazaderas disponen de los agujeros previamente). Se procede al mecanizado de los agujeros marcados y seguido, se atornillan las abrazaderas a la placa superior de manera que el eje de estas (coincidente con el eje del motor), queda paralelo a al eje de la muela.

El siguiente paso es conectar el motor (una vez dentro de la máquina, con el montaje realizado) con el variador de frecuencia. El variador dispone de tres fases con las que recibe la entrada de corriente alterna; R, S, T. De la misma manera, contiene otras tres fases de salida que son las que se conectan con el motor; W, V, U. En la Figura 6.15 se muestran las conexiones del variador.



Figura 6.15: Conexiones del variador de frecuencia. Fuente: ebay.es

En cuanto a las entradas del variador, se conectan las entradas R y T mediante un adaptador a un enchufe cercano a la máquina. En cuanto a las conexiones de salida, el motor dispone de cuatro pines, los cuales vienen numerados. Las conexiones a realizar son las siguientes:

- La salida W se conecta con el pin 2 del motor
- La salida V se conecta con el pin 1 del motor
- La salida U se conecta con el pin 3 del motor

Por último, cabe mencionar como medida de seguridad, que el cableado se introduce en la máquina por el conducto que dispone la misma hasta una posición lo más cercana posible del motor.

### 6.2.1.3. Acondicionamiento de las moletas

Es el último paso previo al comienzo de los ensayos. Consiste en quitar el salto radial que pueden tener las herramientas de reperfilado y reavivado. Este salto radial se mide con un reloj comparador milesimal. Como valor medio, las moletas vienen con un salto de 700  $\mu\text{m}$ . Para eliminar dicho error, se les realiza un proceso de diamantado. Para ello, como herramienta se emplea una muela de CBN 170N100V montada previamente en la máquina. Para estos diamantados se coloca la moleta en el motor, de manera que este paso sirve también para ajustar el funcionamiento del motor dentro de la máquina. Las condiciones de diamantado se recogen en la Tabla 6.8.

Tabla 6.8: Condiciones para eliminar el salto radial

Parámetros para corregir el salto radial de las moletas	
Velocidad periférica de la muela ( $V_s$ ) [m/s]	50
Velocidad moleta ( $n_{sT}$ ) [rpm]	3000
Profundidad de diamantado ( $a_{ed}$ ) [mm]	0,020
Velocidad axial de la moleta ( $V_{fa,D}$ ) [mm/min]	100

Se realizan tantas pasadas como son necesarias para cada moleta. A continuación, se desmonta la muela CBN 170N100V y se monta la muela correspondiente a los ensayos, la muela RD D252R100BG10.

### 6.2.2. El proceso de reperfilado (Fase 1)

Una vez realizado todo lo relacionado con el montaje del banco de ensayos se da comienzo a los ensayos. La primera fase de los ensayos es el reperfilado de la muela. Recordando, con el reperfilado se busca conseguir eliminar la capa de muela que ha perdido la capacidad abrasiva, es decir, una capa con granos planos y material embotado, entre otros mecanismos de desgaste y generando nuevos filos de corte. Además, al mismo tiempo, busca recuperar la forma geométrica específica de la muela con precisión.

Los ensayos experimentales que contiene el trabajo se centran en este proceso. Se trata de estudiar el proceso de reperfilado mediante un total de seis bloques de ensayos. Los bloques se diferencian en función de la herramienta y condiciones empleadas. En total se emplean tres tipos de herramientas denominadas de la siguiente manera:

- SiC H
- SiC J
- Tantalio

SiC H y SiC J son diamantadores rotativos de disco o moletas y en sus características se pueden ver en Tabla 6.9.

*Tabla 6.9: Características de las herramientas de SiC de los ensayos*

Denominación /Dimensiones	Tipo de abrasivo	Tamaño de grano	Dureza	Estructura	Aglomerante
<b>SiC H / 125x25x14</b>	Carburo de Silicio	70 (fino)	H	7	Vitrificado
<b>SiC J / 125x25x14</b>	Carburo de Silicio	70 (fino)	J	7	Vitrificado

La herramienta Tantalio es un bloque o “stick” compuesto de tantalio que actúa de manera similar a los diamantadores estáticos. Tiene forma de cilindro con un diámetro de 9,55 mm y una longitud de 27,94 mm.

El otro aspecto que particulariza los bloques de ensayos son las condiciones del proceso. En total se emplean hasta tres condiciones diferentes que se denominan de la manera que se puede ver a continuación:

- 1º Condiciones (con una variante para la herramienta de tantalio ya que esta no dispone de velocidad de giro)
- 2º Condiciones
- Condiciones DIACUT

En la Tabla 6.10 se pueden ver las primeras y segundas condiciones. Cabe destacar que como la herramienta de tantalio no dispone de velocidad de giro la tabla tiene una tercera columna con una variante de las primeras condiciones orientada a esta herramienta. La diferencia entre las primeras y las segundas condiciones consiste en el ratio de velocidades, ambos con mismo valor, pero diferente signo. La diferencia reside en el sentido de giro de la herramienta de reperfilado. El valor positivo se da cuando moleta y muela giran en sentidos opuesto y el vector de velocidad se tiene la misma dirección en el punto de contacto. El valor negativo es el caso opuesto.

Tabla 6.10: 1º y 2º condiciones de los reperfilados

	1º Condiciones	2º Condiciones	1º Condiciones Tantalio
Velocidad de muela $V_D$ [m/s]	30	30	30
Velocidad de avance axial $V_{fa,T}$ [mm/min]	80	80	80
Profundidad de pasada $a_T$ [mm]	0,100	0,100	0,100
Velocidad de moleta $n_{sT}$ [rpm]	3000	3000	-
Ratio de velocidades [-]	+0,628	-0,628	-
Ratio de reperfilado $U_T$ [-]	122	122	60

En cuanto a las condiciones DIACUT, son los parámetros recomendados por el fabricante de herramientas DIACUT-Thinwheel. Estas condiciones son diferentes a las demás en el sentido que un ciclo completo conlleva a varias pasadas con profundidades de pasadas diferentes (ver Tabla 6.11).

Tabla 6.11: Condiciones DIACUT

Condiciones DIACUT					
Velocidad de muela $V_D$ [m/s]	30	30	30	30	30
Velocidad de avance axial $V_{fa,T}$ [mm/min]	80	80	80	80	80
Profundidad de pasada $a_T$ [mm]	0,1	0,075	0,05	0,025	0,012
Numero de pasadas	5	1	1	1	1
Ratio de reperfilado $U_T$ [-]	60	60	60	60	60



Una vez definidos las herramientas y las condiciones del proceso, se procede a los diferentes bloques de ensayos realizados. En primer lugar, para facilitar la comprensión se estable una nomenclatura. Esta nomenclatura consiste en diferenciar dos términos por un guion. En la parte izquierda del guion se coloca el tipo de herramienta empleada en el ensayo mientras que en la parte derecha se encuentran las condiciones empleadas en el proceso.

En la Tabla 6.12 se pueden ver todos los bloques de ensayos además del número de pasadas o ciclos que conllevan y cada cuanto se realiza la evaluación de superficie y geometría.

Tabla 6.12: Bloques de ensayos

	<b>Bloques de ensayos (tipo de herramienta – Condiciones)</b>					
	SiC H – 1º	SiC J – 1º	Tantalio – 1º	Tantalio - DIACUT	SiC H – 2º	SiC J – 2º
<b>Nº pasadas /ciclos (DIACUT)</b>	50	50	50	20 ciclos	50	50
<b>Evaluación superficie</b>	Cada 10 pasadas	Cada 10 pasadas	Cada 10 pasadas	Cada 5 ciclos	Cada 10 pasadas	Cada 10 pasadas
<b>Evaluación geometría</b>	Después de las 50 pasadas	Después de las 50 pasadas	Después de las 50 pasadas	Después de los 20 ciclos	Después de las 50 pasadas	Después de las 50 pasadas
<b>Volumen teórico total reperfilado</b>	14432 mm <sup>3</sup>	14432 mm <sup>3</sup>	358 mm <sup>3</sup>	948 mm <sup>3</sup>	14432 mm <sup>3</sup>	14432 mm <sup>3</sup>

Cabe destacar que en el bloque de ensayos Tantalio – DIACUT no se habla de pasadas sino de ciclos completados. Esto se debe a que las condiciones DIACUT conllevan a reducir progresivamente la pasada y un ciclo completo contiene hasta cinco profundidades de pasadas diferentes.

Un aspecto importante en los bloques con Carburo de Silicio (SiC) es que debido a problemas de rigidez del acoplamiento del eje del motor (debido a la excesiva longitud necesaria) y la complejidad de incidir en una muela de diamante con un material de menor dureza, es probable que el volumen perdido en el extremo inicial de la moleta sea mayor que el perdido en el extremo final. Tal y como se muestra de una manera mayorada en la Figura 6.16.

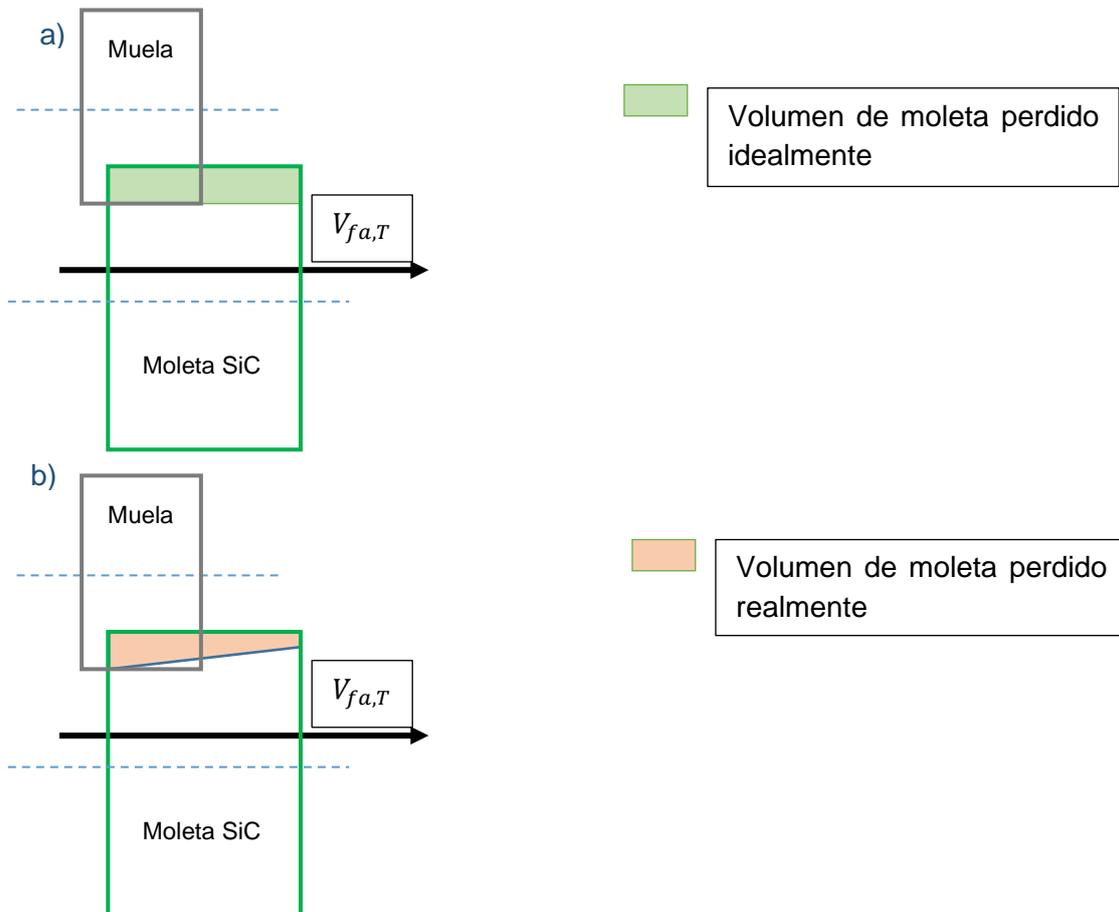


Figura 6.16: Volumen de moleta perdido: a) idealmente b) realmente

Por lo tanto, el volumen en el extremo final de la moleta se acumula a medida que se realizan pasadas hasta tal punto que el motor no dispone de suficiente potencia para continuar con el proceso y se detiene. Es por eso que se toma la decisión de que la pasada de reperfilado no sea hasta el final de la moleta (25mm) sino hasta un total de 15 mm desde el extremo inicial con el que se inicia el proceso.

Como se ha visto anteriormente se quiere estudiar a fondo el proceso, para analizar el reperfilado paso 1 (fase 1.1) se desarrolla el método de evaluación de superficie y para el reperfilado paso 2 (fase 1.2) el método de evaluación de geometría. Para conocer en detalle ambos métodos ver los apartados 7.1. *Evaluación de la superficie* y 7.2. *Evaluación de la geometría*.

## 7. Desarrollo de un método de evaluación del estado general de la muela abrasiva

En este apartado se detalla el método de evaluación del estado tanto de la superficie como de la geometría de la muela. El método se desarrolla como parte del trabajo y se divide en dos partes. En primer lugar, con la evaluación de la superficie se puede conocer el estado actual de la superficie de la muela analizando diferentes parámetros. En segundo lugar, con la evaluación de la geometría se puede conocer el estado del perfil de la muela abrasiva.

### 7.1. Evaluación de la superficie

Como parte de este trabajo se desarrolla un método para evaluar el estado de la superficie de las muelas abrasivas, concretamente, este trabajo se centra en muelas de diamante con aglomerante de resina. En el trabajo este método se emplea cada 10 pasadas de reperfilado o cada 5 ciclos para el caso del bloque Tantalio - DIACUT.

El primer paso del método consiste en obtener una instantánea de la superficie de la muela abrasiva mediante el microscopio Dino-Lite. El proceso de la obtención de la instantánea se puede ver en la Figura 7.1a.

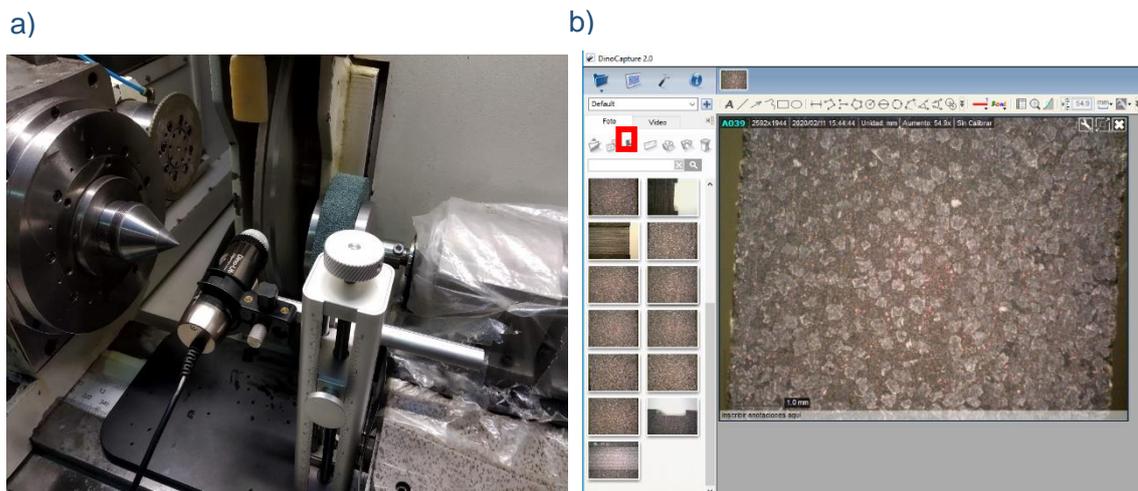


Figura 7.1: a) Microscopio Dino-Lite en la máquina de ensayos. b) Interfaz del software "DinoCapture2.0"

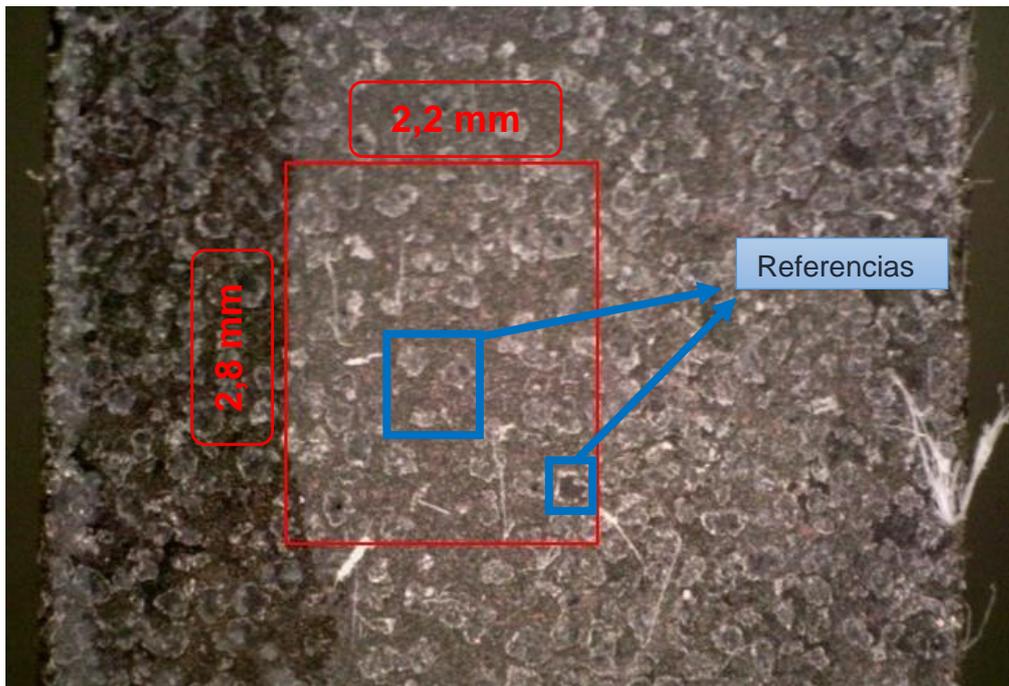
El microscopio se conecta mediante USB a un ordenador y se acciona mediante el software que trae el propio microscopio, se trata del "DinoCapture2.0". En la Figura 7.1b se puede ver la interfaz del mismo. En el método de evaluación de superficie el software se emplea para accionar la instantánea del microscopio (rectángulo rojo de la figura) y guarda la imagen. Como nomenclatura para las instantáneas se opta por lo siguiente:

*Nº de pasadas realizadas con la moleta hasta el momento – Bloque de ensayos*

Por ejemplo, la instantánea obtenida después de 10 pasadas con el bloque de ensayos SiC H – 1º, se conoce como 10 – SiC H – 1º.

Con el fin de simplificar y facilitar los resultados, se analiza un sector concreto de toda superficie de la muela de 2,2 x 2,8 mm<sup>2</sup>. El primer paso es elegir el sector deseado o identificarlo. Dicho sector es exactamente el mismo dentro de cada bloque de ensayos correspondiente a la misma moleta. Es decir, para el bloque de ensayos SiC H – 1º, el sector analizado es el mismo para las instantáneas 0 – SiC H – 1º, 10 – SiC H – 1º, 20 – SiC H – 1º, 30 – SiC H – 1º, 40 – SiC H – 1º y 50 – SiC H – 1º. Además, para los demás bloques, si bien es posible que el sector no sea exactamente el mismo, es uno muy próximo. Esto se debe a que, al variar la herramienta, la superficie de la muela cambia considerablemente y localizar el mismo sector exacto es complejo.

El primer paso para detectar la zona aproximada del sector, es realizar una marca superficial muy localizada al cuerpo metálico de la muela. Esta marca sirve para conocer la orientación de la muela a la hora de colocar el microscopio Dino-Lite para la instantánea. Para localizar el sector exacto se emplean unos granos característicos como referencia. Una vez localizados los granos de referencia, es sencillo relacionar cada grano con su estado anterior y así definir el sector. Por último, se crea una imagen recortada del sector. En la Figura 7.2 se puede ver tanto el sector concreto y como los granos de referencia para un caso.



*Figura 7.2: Sector analizado y granos de referencia para un caso*

El método de evaluación consiste en estudiar el estado de la superficie de la muela dentro del sector. Para ello permite:

- Estimar la concentración de granos
- Cuantificar los saltos de grano
- Evaluar el comportamiento de varios granos concretos

La herramienta que permite realizar dichos análisis se desarrolla como parte de este trabajo.

Esta herramienta consiste en un programa desarrollado con el software Spyder, que se trata de un Entorno de Desarrollo Integrado de uso libre. Usa un lenguaje de programación de código abierto conocido como Python.

El programa toma el nombre de “Wheel Surface Analysis” (WSA) y dispone de tres módulos; “Diamond Grain Percentage”, “Grain Pull Out” y “Grain size”. En la Figura 7.3 se puede ver la interfaz del programa.

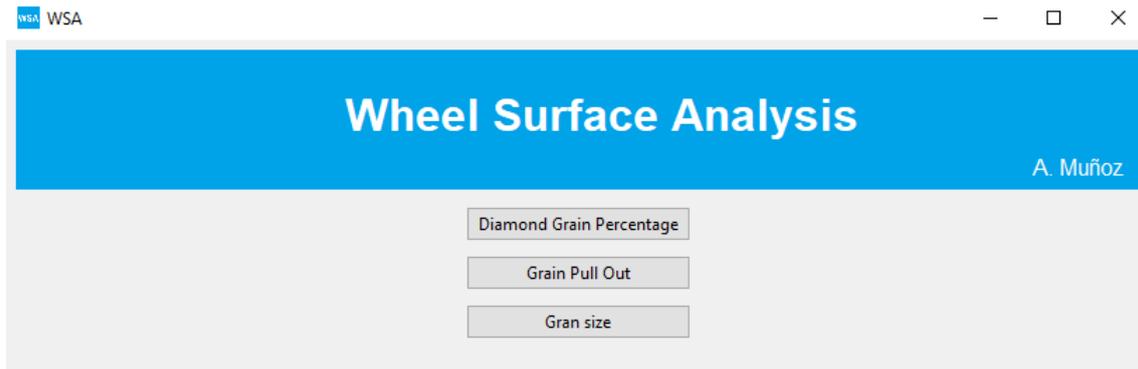


Figura 7.3: Interfaz del programa WSA

Por un lado, el módulo “Diamond Grain Percentage” se emplea para estudiar la concentración de grano. Por otro lado, el módulo “Grain Pull Out” contabiliza los saltos de grano. Por último, el módulo “Grain size” permite conocer el porcentaje de aumento o reducción del tamaño de un grano elegido por el usuario. En los próximos apartados se profundiza en el funcionamiento de dichos módulos.

### 7.1.1. Variación de la concentración de grano

Uno de los pasos del método de evaluación de la superficie de muelas abrasivas es estudiar la variación de la concentración de granos. Para ello se debe cuantificar la concentración de granos del estado en cada intervalo de pasadas o ciclos. Cada estado se compara con el estado anterior, por ejemplo, el estado correspondiente a la instantánea  $10 - \text{SiC H} - 1^\circ$  se compara con el correspondiente a  $0 - \text{SiC} - 1^\circ$  y así sucesivamente. Para este estudio se emplea el módulo de WSA “Diamond Grain Percentage”. En la Figura 7.4 se puede ver la interfaz del módulo.

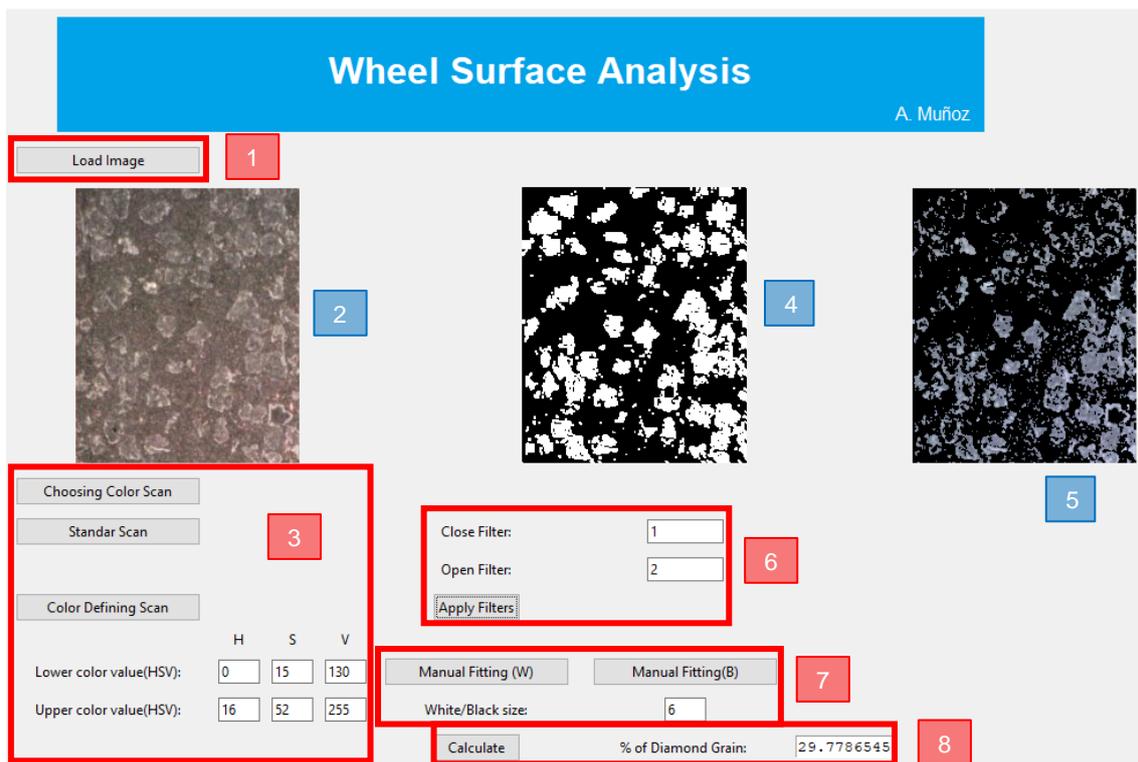


Figura 7.4: Interfaz del módulo "Diamond Grain Percentage"

El módulo consiste en cargar el sector de la muela que se desea analizar, realizar un escaneo con el que diferenciar granos del aglomerante y calcular el porcentaje de superficie que corresponde a los granos de diamante.

El primer paso, es cargar el sector mediante "{1} Load Image", según se acciona se abre el explorador de archivos que permite localizar la instantánea del sector que el usuario desea analizar y la muestra {2}.

El segundo paso, consiste en el escaneo de la instantánea. Los escaneos se basan en la diferencia de color entre el aglomerante y los granos de la muela. Para entender adecuadamente el funcionamiento de los escaneos se debe comentar que el programa trabaja con un modelo de colores HSV (ver Figura 7.5). Es decir, los colores se diferencian por sus valores H (Matiz), S (Saturación) y V (Brillo). A cada color le corresponden unos valores. El valor H (Matiz), representa el color con valores de 0 a 255, por ejemplo, el 60 corresponde al color verde, el 120 al azul, el 0 al rojo etc. El valor S (Saturación), representa la "pureza" del color con valores de 0 a 255, es decir, cuanto menor es el valor, mayor tonalidad grisácea hay. Por último, el valor V (Brillo), representa el brillo del color con valores de 0 a 255, por lo tanto, un valor 0 siempre será negro y un 255 dependiendo del valor S podría ser blanco.

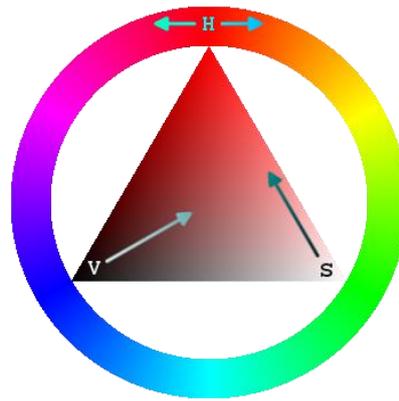


Figura 7.5: Modelo HSV. Fuente: Wikipedia.org

Los escaneos consisten en detectar el color de los granos de la muela y realizar un barrido con el que obtener una imagen de blancos y negros, donde la parte blanca corresponde a los granos de diamante. El programa dispone de tres opciones de escaneo {3}:

- **“Choosing Color Scan”**: Esta opción consiste en hacer “click” con el ratón sobre el grano de la muela. El programa detecta el color y realiza el barrido. Para el tipo de muelas analizadas en este trabajo este escaneo no resulta el más efectivo por el parecido existente entre el color del aglomerante y grano.
- **“Standar Scan”**: Este escaneo tiene un valor predeterminado del color de los granos y a partir de él realiza el barrido. Dicho valor se ha obtenido de manera experimental, se ha realizado una media aritmética con los valores H S V obtenidos del aglomerante en diferentes zonas. Los valores están integrados al código del programa.
- **“Color Defining Scan”**: En este caso el programa te permite introducir los valores límites de los colores con los que realiza el barrido. Es decir, analizada los colores de la imagen, si el color correspondiente al pixel, está dentro de los límites establecidos, en la imagen procesada aparecerá como un pixel blanco. De esta manera se consigue un escaneo general para cualquier tipo de muela una vez se ajusten los valores de los límites experimentalmente.

Una vez realizado el escaneo correcto, se obtiene la imagen {4}. Se trata de la imagen {2} después del escaneo y barrido. La parte negra corresponde al aglomerante y la parte blanca a los granos de la muela. Al mismo tiempo el programa genera la imagen {5}. Esta imagen se utiliza de manera auxiliar como ayuda para diferenciar mejor los contornos de los granos. Sin embargo, la cantidad de luz que llega del microscopio es diferente según la zona del sector. Esto complica más el escaneo y es posible que de primeras la imagen {4} no sea la definitiva. Por ello en los siguientes pasos se trata de optimizar la imagen {4}.

Dentro de las herramientas de optimización, están el filtrado y el ajuste manual. El primer paso, es aplicar filtros a la imagen {4}. El programa dispone de dos filtros {6} que se complementan. Por un lado, el filtro “Close Filter” tiene la función de rellenar contornos cerrados o casi cerrados, en este caso granos de diamante. En la Figura 7.6a se puede ver el efecto de este filtro con un valor de 4.

Un mayor valor del filtro conlleva a un relleno más brusco. Es necesario utilizar el filtro con medida, ya que mientras favorece una zona del sector puede perjudicar otra zona. Por otro lado, el filtro "Open Filter" sirve para eliminar pixeles aislados. En este caso detecta los grupos de pixeles blancos que no son lo suficiente grande como para tratarse de un grano y los elimina. En la Figura 7.6b se puede ver el efecto del filtro con un valor de 7.

Cuanto mayor es el valor, mayor es el tamaño del grupo de pixeles a partir del cual comienza a realizar su función. Es necesario aplicarlo con medida, ya que un uso inadecuado conllevaría a perder granos que en realidad se encuentran en la superficie. Una combinación adecuada de estos dos puede llevar a una imagen de precisión alta. Cada imagen tiene su combinación óptima propia que se obtiene a base de prueba y error a criterio del usuario.



Figura 7.6: a) Efecto del "Close Filter". b) Efecto del "Open Filter"

El segundo y último paso para la optimización es el ajuste manual {7}. Esta herramienta permite realizar las funciones de los filtros de manera manual, pudiendo elegir el lugar y la proporción. La opción "Manual fitting (W)" permite rellenar (similar al filtro "Close filter") los granos de los cuales se aprecia el contorno, pero el escaneo no ha sido capaz de rellenar completamente. Consiste en generar pixeles blancos (grano) en el lugar donde se hace "click" con el ratón. Al mismo tiempo, es posible elegir el tamaño de relleno en la opción "White/Black size". El funcionamiento "Manual fitting (B)" es el mismo, pero con la función inversa, ya que se trata de borrar los puntos que han sido tomados como granos cuando en realidad no lo son. Por eso, en este caso se generan grupos de pixeles negros (aglomerante) del tamaño elegido.

Combinando las herramientas de optimización de imagen se consiguen barridos muy precisos y se puede comprobar al analizar el parecido de la imagen real con la procesada.

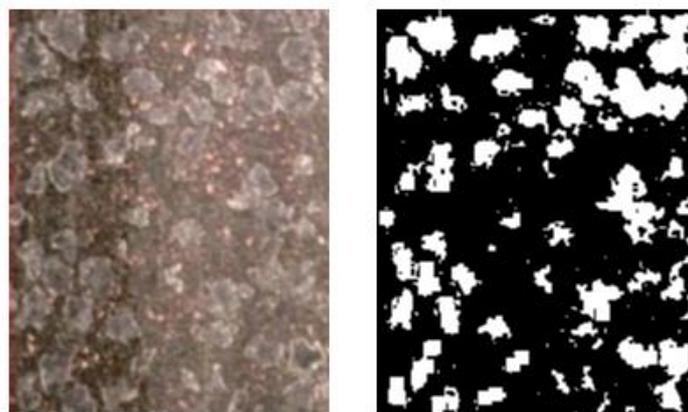


Figura 7.7: Sector 20 - SiC H - 1°

Por último, con el botón “Calculate” {8} el programa analiza la imagen y calcula el porcentaje de grano del sector.

### 7.1.2. Salto de grano

Otro indicador del efecto del reperfilado que se analiza es el número de saltos de grano. Es decir, se compara un estado de la superficie con el estado previo y se cuantifican el número de granos que han alcanzado la última fase de desprendimiento de grano. La herramienta dispone del módulo “Grain Pull Out” para ello. En la siguiente figura se puede ver la interfaz del módulo.

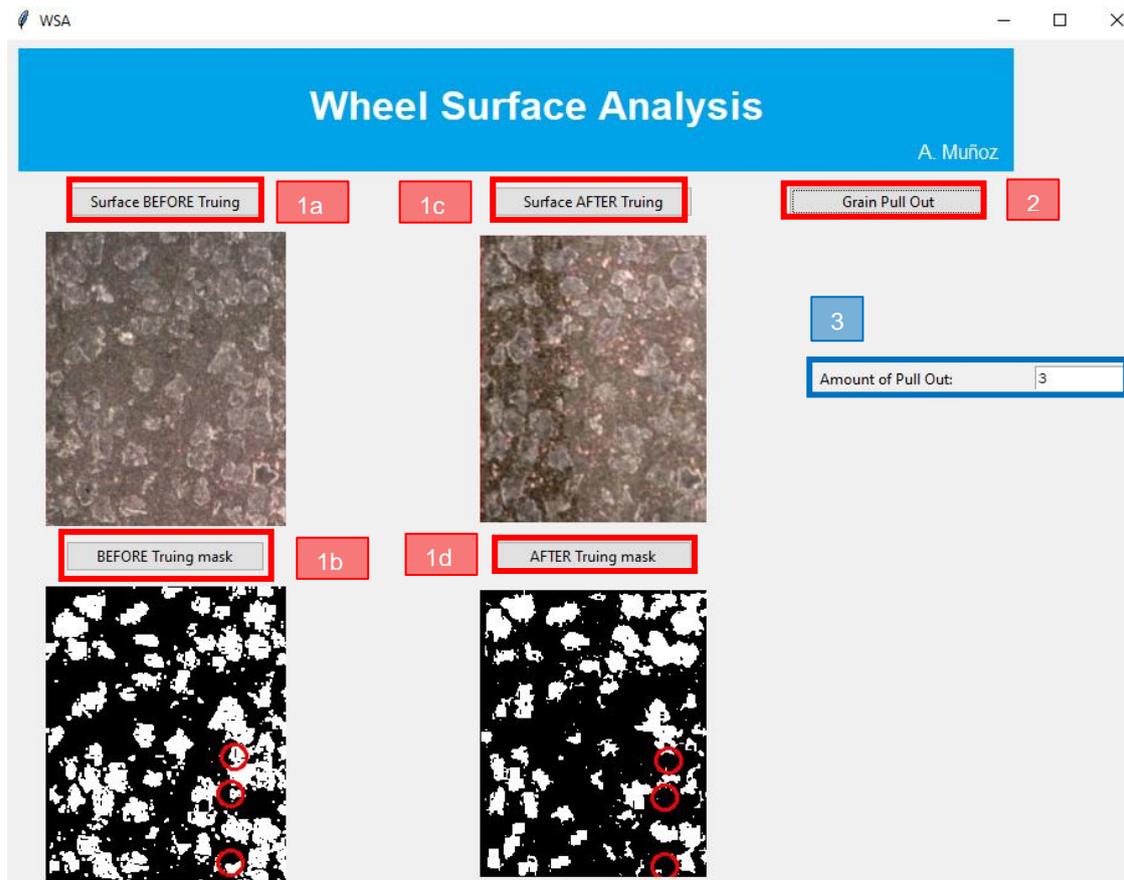


Figura 7.8: Interfaz del módulo "Grain Pull Out"

El módulo consiste en cargar los sectores de los estados que se quieren comparar y sus imágenes procesadas y comparándolas cuantificar el número de granos que se han desprendido.

El primer paso es cargar el sector del estado que se quiere analizar y al mismo tiempo, el del estado previo. Este paso se realiza mediante los botones {1a} “Sufarce BEFORE Truing”, {1b} “BEFORE Truing mask”, {1c} “Sufarce AFTER Truing” y {1d} “AFTER Truing mask”. El botón {1a} carga el estado previo al intervalo de pasadas, el {1b} carga la imagen procesada de este estado, {1c} carga el estado posterior al intervalo de pasadas y, por último, {1d} carga la imagen procesada de este estado. El orden de introducción de imágenes es indiferente. A continuación, mediante “Grain Pull Out” [2] se detectan los saltos de grano y se rodea la zona donde se encontraba el grano con una

circunferencia roja. El número de saltos de grano viene dado en “Amount of Pull Out” {3}.

### 7.1.3. Seguimiento de grano

Con el fin de analizar la superficie de la muela a medida que se realizan los reperfilados, se estudia la evolución de granos particulares. Los cambios que sufren los granos detectables con la herramienta desarrollada, son los cambios de color y la variación de tamaño. Los cambios de color están relacionados directamente con la inclinación de los planos del grano. Por lo tanto, que el grano de diamante sufra un cambio de color notable quiere decir que los planos han cambiado su inclinación y, por tanto, el grano a entrado en contacto con la moleta. La razón de esto reside en el modo en que los rayos de luz emitidos por el microscopio rebotan en direcciones diferentes en función de la inclinación del plano en el que incide el rayo.

En la Figura 7.9a se puede ver el comportamiento de los rayos de luz incidiendo sobre una superficie plana. En este caso, los rayos retornan al microscopio de la misma manera que salen, por lo tanto, en la imagen que genera el microscopio se aprecia una superficie blanca donde los rayos retornan de manera perpendicular. En cambio, en la Figura 7.9b la superficie en la que incide el microscopio no es plana. En función de la inclinación del punto sobre el que el rayo contacte, este saldrá rebotado en una dirección o en otra. Hay rayos, que no vuelven al microscopio por lo tanto en la imagen generada por el microscopio esas zonas saldrán oscuras. Ambos casos se pueden aplicar a granos abrasivos con superficies planas e inclinadas.

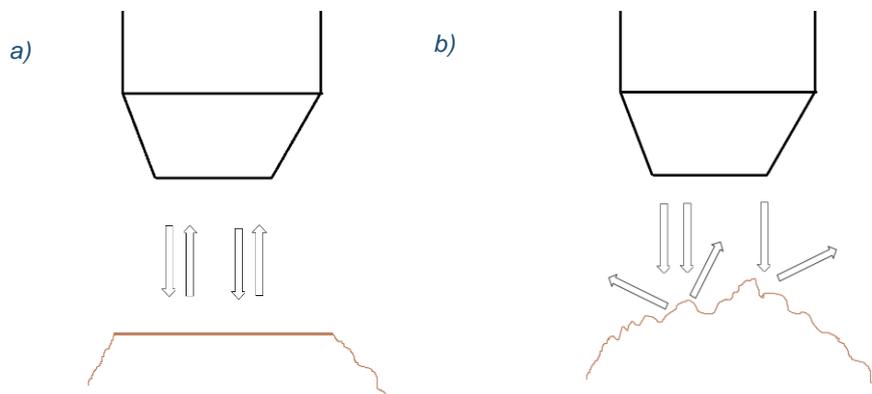


Figura 7.9: a) Rayos de luz en superficies planas. b) Rayos de luz en superficie inclinada

En cuanto a la variación en el tamaño del grano, es un indicador sobre la evolución del grano, indica si el grano progresa en las fases de su vida útil en la superficie de la muela. En este trabajo el seguimiento del tamaño del grano se realiza mediante la herramienta desarrollada para el análisis de superficie de muelas abrasivas WSA. Se realiza dentro del módulo “Grain Size”. En la siguiente figura se puede ver la interfaz de dicho módulo.

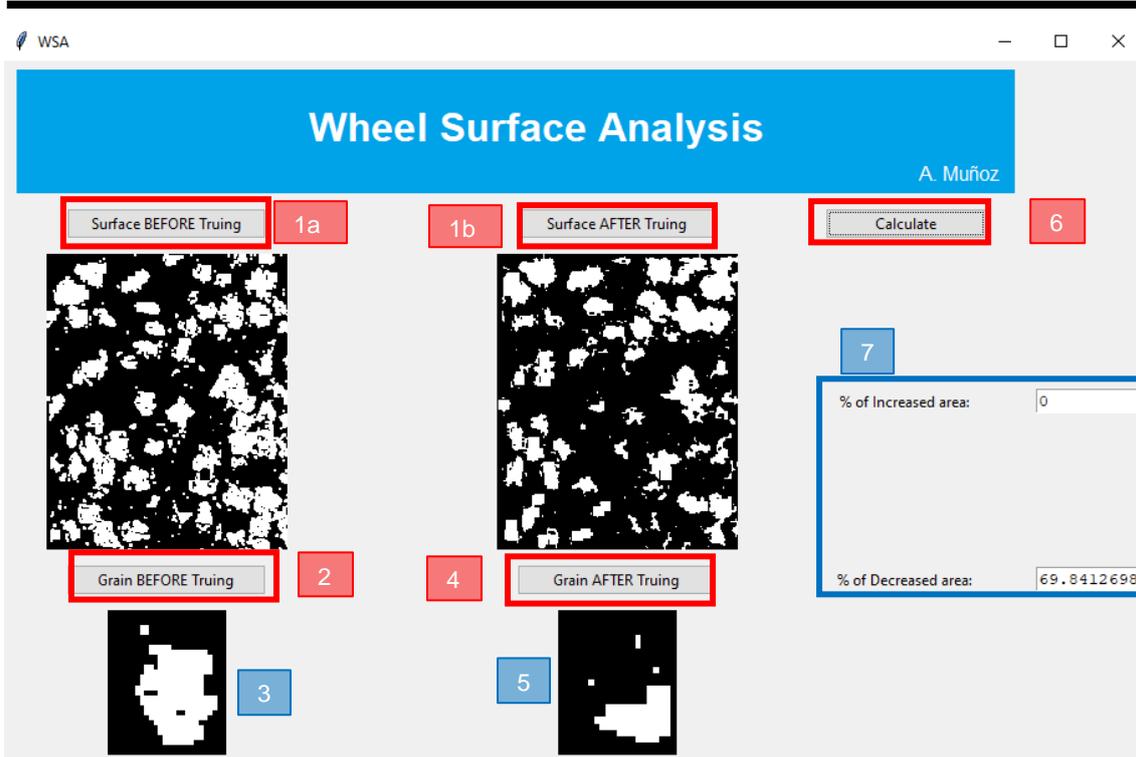


Figura 7.10: Interfaz del módulo "Grain size"

El módulo consiste en introducir directamente las imágenes procesadas del estado que se quiere analizar y del estado anterior, seleccionar el grano que se quiere estudiar y el programa estima la variación de tamaño.

El primer caso consiste en cargar las imágenes procesadas. La imagen del estado previo se carga mediante "Surface BEFORE Truing" {1a} y la del estado posterior mediante "Surface AFTER Truing" {1b}. El siguiente paso se trata de elegir el grano que se quiere analizar en el estado previo. Para ello pulsando en "Grain BEFORE Truing" {2} se abre la imagen procesada del estado previo y el programa da opción de elegir el grano deseado mediante el ratón. En la Figura 7.11 se puede ver el procedimiento de selección del grano deseado.

El procedimiento de selección consiste en generar un rectángulo que cubra el grano mediante dos puntos. Una vez elegido el grano genera la imagen {3}. A continuación, con "Grain BEFORE Truing" {4} se abre la imagen procesada del estado posterior y con un procedimiento análogo al anterior se elige el mismo grano que se quiere analizar. El programa lo detecta y muestra la imagen del grano {5}. Entonces, una vez estén generadas todas las imágenes, con el botón "Calculate" {6}, el programa procede a calcular la diferencia de tamaño del grano entre ambos estados. En caso de que el grano haya aumentado su tamaño, muestra el porcentaje de aumento en "% of Increased area" {7}. En cambio, si el grano ha disminuido, muestra el porcentaje de disminución en "% of Decreased area" {7}.

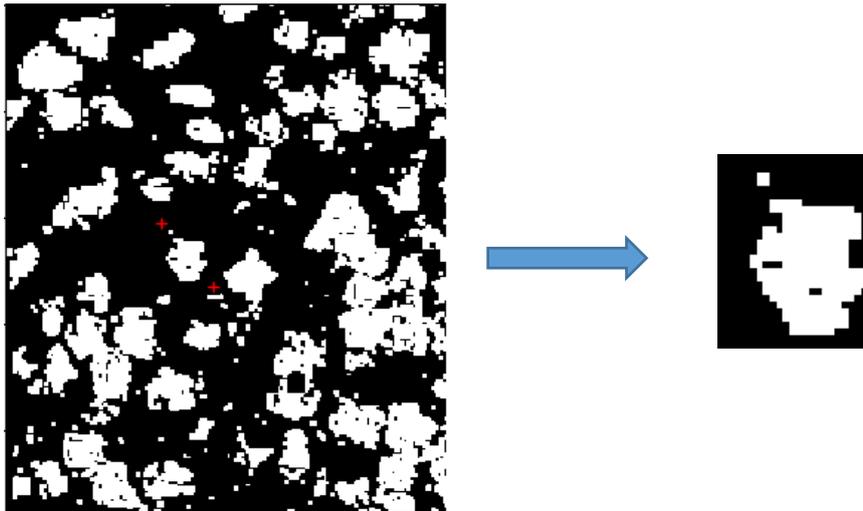


Figura 7.11: Procedimiento de selección de grano

## 7.2. Evaluación de la geometría

Para conocer de manera general el estado de la muela, además de evaluar la superficie es necesario conocer el estado del perfil. Como se comenta anteriormente el proceso de reperfilado paso 1 consta de condiciones muy agresivas necesarias debido a la diferencia de dureza entre la muela y la moleta. En consecuencia, la muela perderá su geometría inicial. El rectificando es un proceso que requiere de alta precisión, por lo que conocer esta diferencia es un aspecto importante. Un indicador de esto, en este caso, son los ángulos de las aristas de la muela. La muela de diamante empleada en este trabajo sigue la referencia 14 A1 de la norma FEPA. Por lo tanto, se trata de una muela recta con ángulos de  $90^\circ$  en las dos aristas.

En este trabajo se procede a medir la variación de los ángulos rectos de la muela durante los ensayos. Se realiza la medición después de realizar los ensayos correspondientes a cada bloque de ensayos. Es decir, una vez terminado el bloque de ensayos se evalúa la geometría y se compara con el estado anterior. En el caso del primer bloque de ensayos, el perfil se compara los ángulos con los ángulos de fábrica, es decir,  $90^\circ$ .

La medición de los ángulos actuales de la muela consiste en primer lugar, en grabar el perfil negativo de la muela en un bloque de grafito. Para ello, mediante el útil que dispone la máquina para colocar diamantadores estáticos, se coloca el bloque de grafito en perpendicular a la muela. En la siguiente figura se puede ver el útil que amarra el bloque y su posición respecto a la muela de diamante.

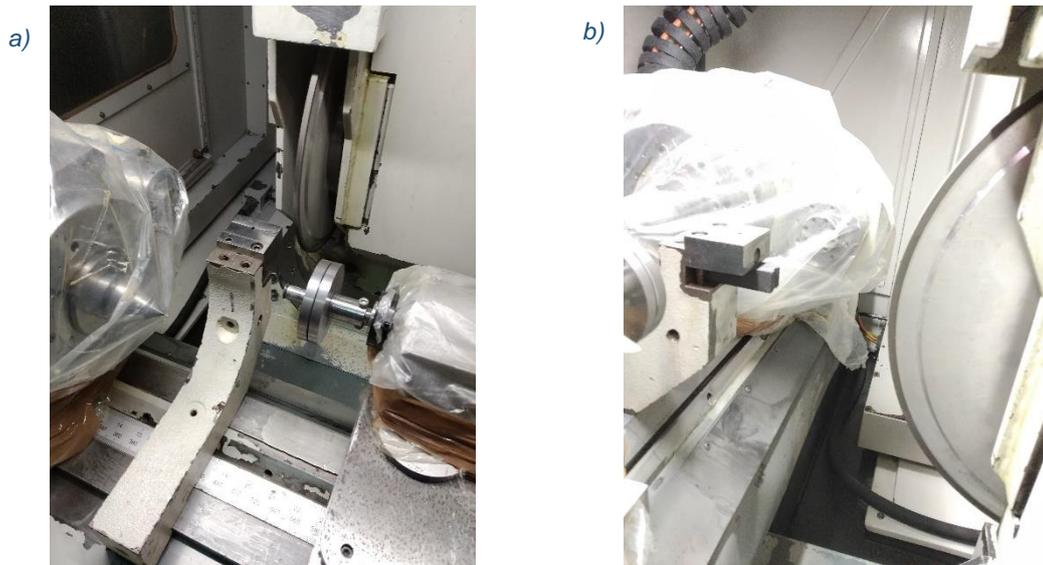


Figura 7.12: a) Útil de amarre del bloque de grafito. b) Posición del grafito respecto a la muela del trabajo

Una vez colocado el bloque de grafito, se procede a la realización de un proceso de rectificado en penetración (Plongee). Se penetra el bloque de grafito 2 mm con una velocidad de corte  $V_s$  de 5 m/s. Entonces, el perfil negativo de la muela queda grabado en el bloque. El bloque se analiza con el microscopio Dino-Lite. En la Figura 7.13a se puede ver una imagen del proceso. Se realiza la instantánea mediante el software del microscopio DinoCapture 2.0. EL software da la opción de medir ángulos mediante las herramientas de “Ángulo de tres puntos” y “Ángulo de cuatro puntos” (rectángulo rojo en Figura 7.13b). En la misma interfaz del programa aparece el valor del ángulo medido para cada caso.

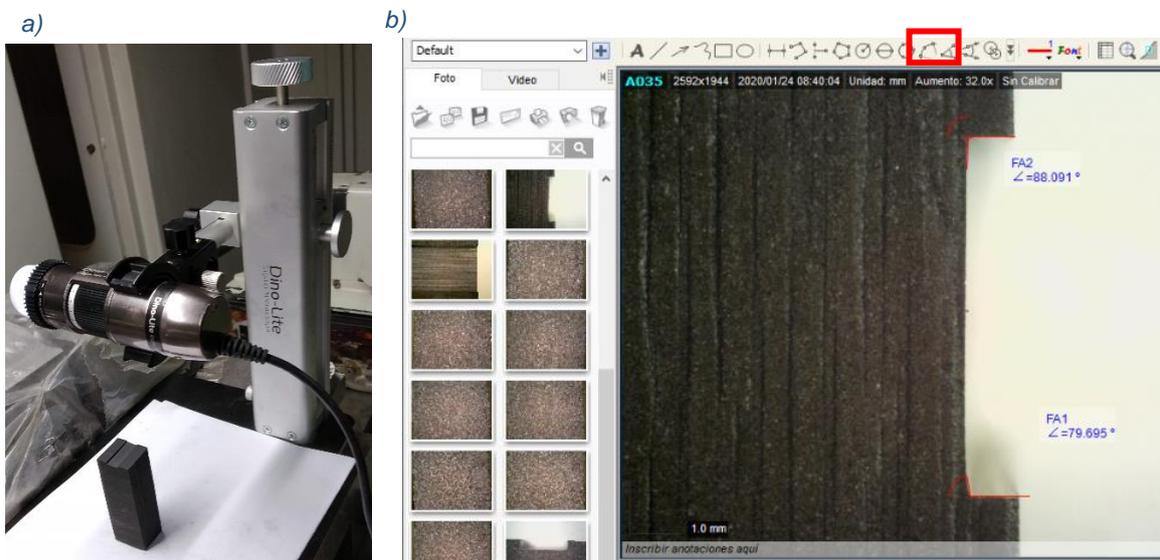


Figura 7.13:a) Análisis del bloque de grafito. b) Herramientas para la medición de ángulos

## 8. Discusión de resultados

En este apartado se muestra los resultados obtenidos durante el desarrollo de los ensayos. Se muestran directamente los resultados graficados. Se muestra el procedimiento de los cálculos numéricos para el bloque de ensayo SiC H – 1º a modo ilustrativo y se dejan los correspondientes a los demás bloques para el apartado de Anexos.

### 8.1. Bloque de ensayos SiC H – 1º

En este apartado se analizan gráficamente los resultados obtenidos en del bloque de ensayos SiC H – 1º. A continuación, se muestra el proceso de cálculo completo. Los procesos de cálculo de los demás bloques se recogen en el apartado *ANEXO II: Cálculo de resultados*.

Un paso previo al comienzo del bloque de ensayos es realizar un total de 4 pasadas en condiciones de reavivado con la moleta 1º CBL con una profundidad de pasada  $a_{er}$  de 10  $\mu\text{m}$ . Para este proceso se aplica el uso de taladrina con una concentración del 3,2% ya que como se ha visto en 5.2.2. Reavivado es beneficiosa. El objetivo de esto es el de dejar la muela condicionada para los ensayos.

A continuación, en la Figura 8.1 se puede ver el estado de la superficie de la muela con la que se da comienzo a los ensayos del bloque SiC H – 1º así como el sector concreto que se analiza.

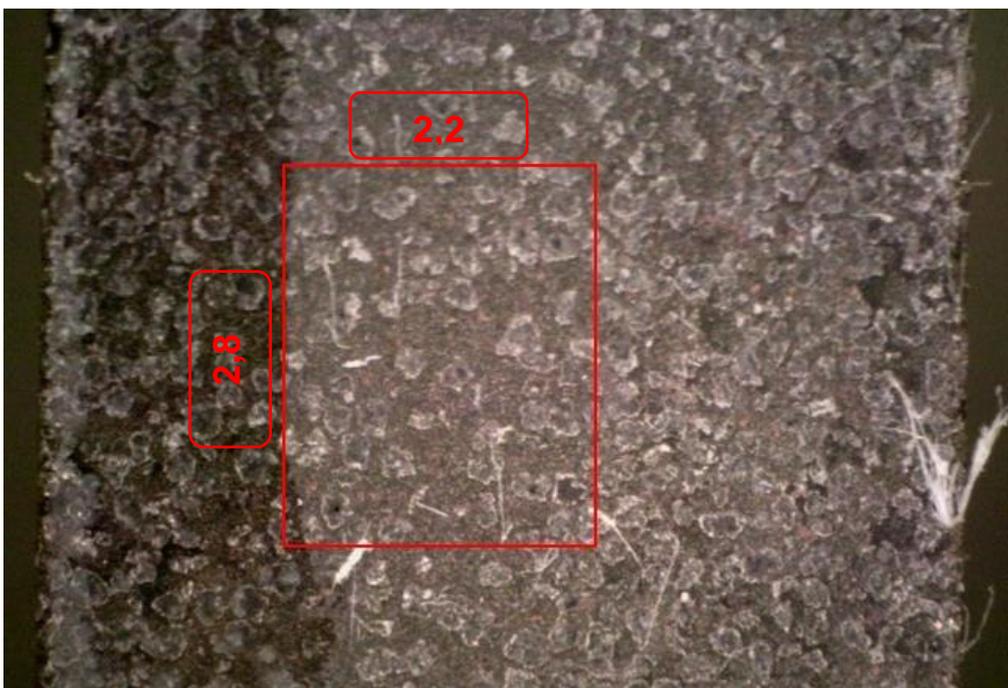


Figura 8.1: Estado de la muela previo a los ensayos

El análisis consiste en el seguimiento de varios granos en concreto, estudiando su evolución durante las diferentes pasadas de reperfilado. Además, se cuantifica la concentración de granos dentro del sector y el número de saltos de grano.

Se parte del estado previo a los ensayos como referencia. En la Figura 8.2 se pueden ver las imágenes del estado de la superficie del que se parte. Respecto a la figura, cabe decir que la imagen de la parte izquierda se corresponde con la imagen real obtenida mediante el microscopio óptico mientras que la de la parte derecha se corresponde con dicha imagen real procesada mediante segmentación binaria. Dicha segmentación binaria se realiza mediante el software “Wheel Surface Analysis” previamente descrito y los píxeles blancos corresponden a granos de diamante mientras que los negros al aglomerante de la muela. A partir de ahora, al mostrar el estado de la muela se mostrará de esta manera, apareciendo siempre ambas imágenes del mismo estado (la real y la procesada).

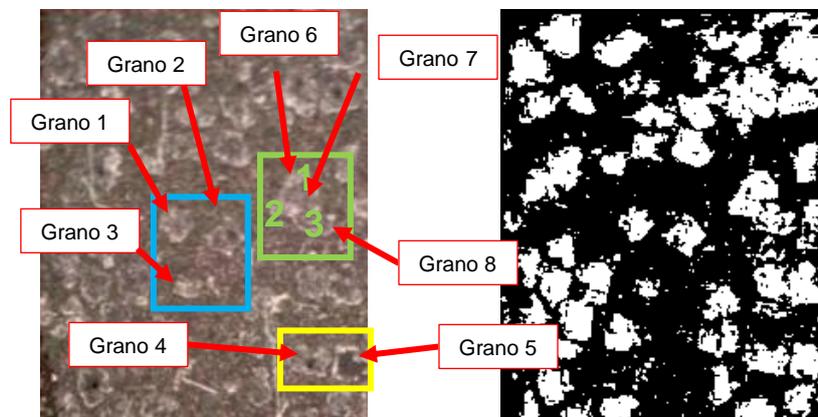


Figura 8.2: Estado de la superficie previo al bloque de ensayos SiC H - 1°

La concentración de grano en este estado de la muela es del 31,69%. Los granos a los que se les realiza el seguimiento vienen marcados en la figura y se distribuyen en tres zonas concretas.

➤ **Zona Azul:**

- Grano 1
- Grano 2
- Grano 3

➤ **Zona Amarilla:**

- Grano 4
- Grano 5

➤ **Zona Verde:**

- Grano 6
- Grano 7
- Grano 8

### 8.1.1. Evaluación de la superficie después de 10 pasadas de SiC H – 1°

En este apartado se compara el estado de la superficie de la muela tras 10 pasadas del primer paso de reperfilado con el estado inicial. En la Figura 8.3 se pueden ver ambos estados agrupados con los granos que se analizan marcados.

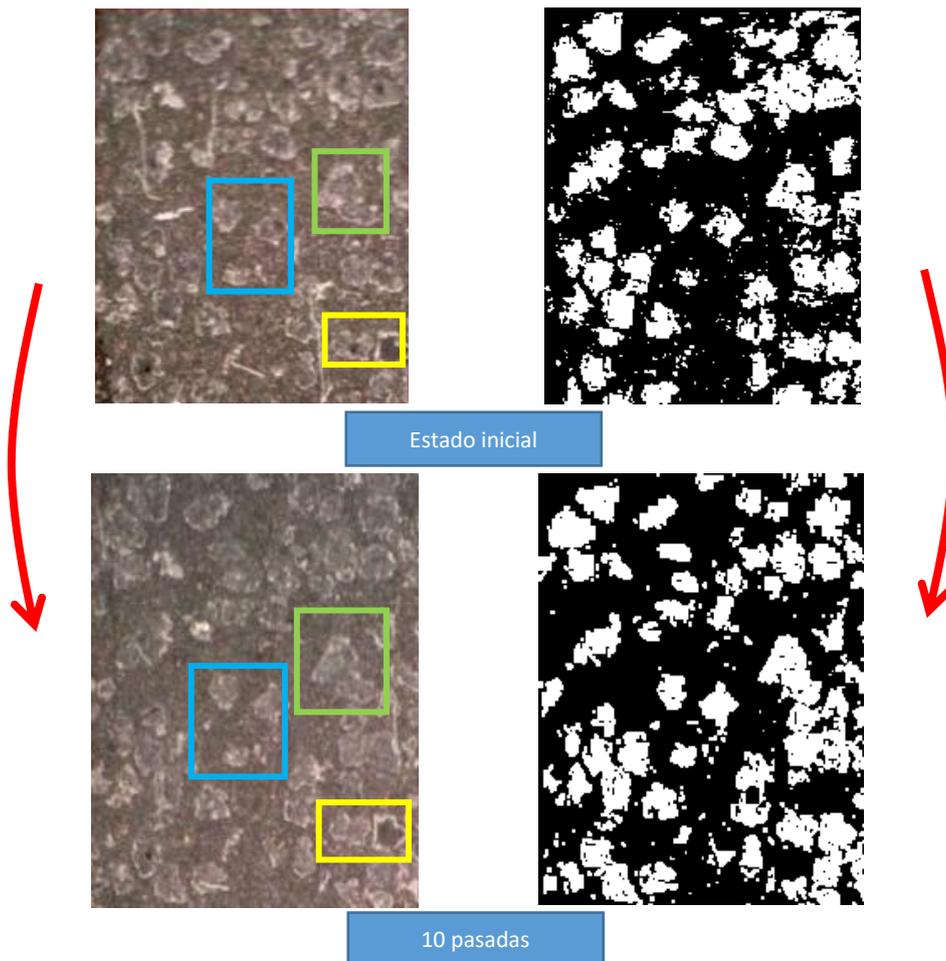


Figura 8.3: Comparativa, estado inicial - 10 pasadas (SiC H - 1º)

La concentración de grano en este estado es del 32,55%. Por lo tanto, ha aumentado 0,86%.

En cuanto a la evaluación de los granos seleccionados, se discute lo siguiente:

- **Zona Azul:**
  - **Grano 1:** Aumenta el tamaño un 6,06%.
  - **Grano 2:** Aumenta el tamaño un 1,56%.
  - **Grano 3:** Aumenta el tamaño un 57,73%.
- **Zona Amarilla:**
  - **Grano 5:** Aumenta el tamaño un 9,26%.
  - **Grano 4:** Aumenta el tamaño un 14,51%.
- **Zona Verde:**
  - **Grano 6 {1}:** Reduce el tamaño un 5,6%.
  - **Grano 7 {2}:** Reduce el tamaño un 22,82%.
  - **Grano 8 {3}:** Aumenta el tamaño un 14,79%.

### 8.1.2. Evaluación de la superficie después de 20 pasadas de SiC H – 1º

En este apartado se compara el estado de la superficie de la muela tras 20 pasadas del primer paso de reperfilado con el estado después de 10. En la Figura 8.4 se pueden ver ambos estados agrupados con los granos que se analizan marcados.

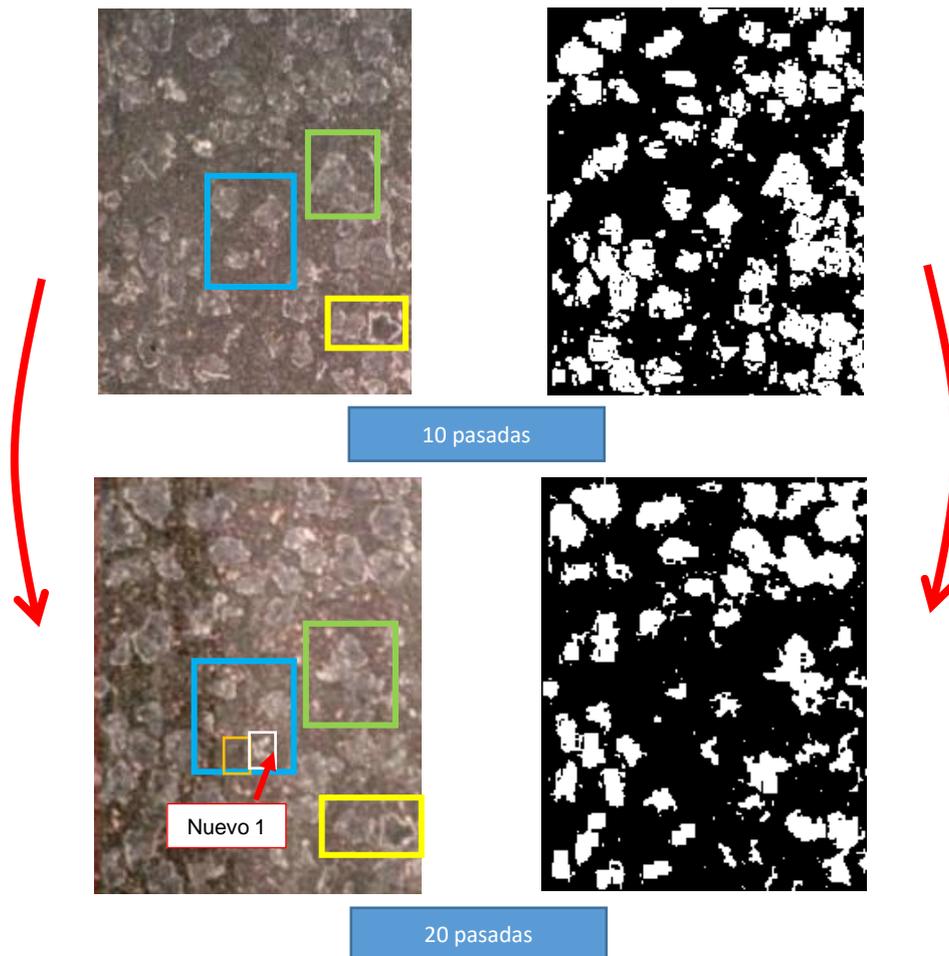


Figura 8.4: Comparativa, 10 pasadas - 20 pasadas (SiC H - 1°)

En este estado la concentración de grano es del 24,95%, es decir, se ha reducido 7,6% respecto al estado anterior y 6,74% respecto al comienzo.

En cuanto a la evaluación de los granos seleccionados, se discute lo siguiente:

- **Zona Azul:**
  - **Grano 1:** Reduce el tamaño un 69,84%.
  - **Grano 2:** Reduce el tamaño un 62,57%.
  - **Grano 3:** Ha saltado dejando un hueco en la superficie, corresponde con el rectángulo naranja de la figura.
  - **Nuevo 1:** Se trata de un grano que ha comenzado su primera fase de afloramiento. Corresponde con el rectángulo blanco de la figura.
- **Zona Amarilla:**
  - **Grano 5:** Reduce el tamaño un 15,58%.
  - **Grano 4:** Reduce el tamaño un 26,4%.
- **Zona Verde:**
  - **Grano 6 {1}:** Reduce el tamaño un 11,92%.
  - **Grano 7 {2}:** Reduce el tamaño un 35,48%. El grano se ha ido aplanando y la frontera con los otros dos granos es más visible.
  - **Grano 8 {3}:** Reduce el tamaño un 32,92%.

### 8.1.3. Evaluación de la superficie después de 30 pasadas de SiC H – 1°

En este apartado se compara el estado de la superficie de la muela tras 30 pasadas del primer paso de reperfilado con el estado después de 20. En la Figura 8.5 se pueden ver ambos estados agrupados con los granos que se analizan marcados.

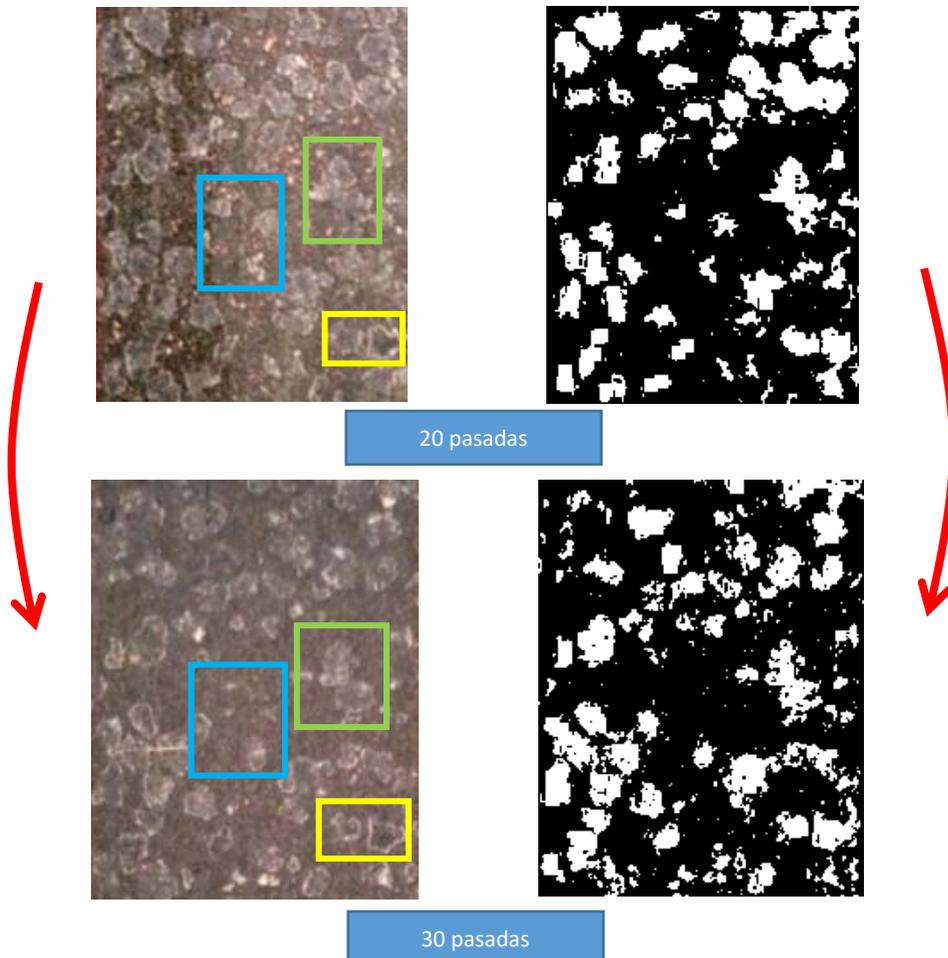


Figura 8.5:Comparativa, 20 pasadas - 30 pasadas (SiC H - 1°)

En este estado la concentración de grano es del 24,45%, es decir, se ha reducido 0,5% respecto al estado anterior y 7,24% respecto al comienzo.

En cuanto a la evaluación de los granos seleccionados, se discute lo siguiente:

- **Zona Azul:**
  - **Grano 1:** Alcanza última fase de salto de grano y deja un hueco en superficie.
  - **Grano 2:** Alcanza última fase de salto de grano y deja un hueco en superficie.
  - **Nuevo 1:** Aumenta el tamaño un 41,17%.
- **Zona Amarilla:**
  - **Grano 5:** Aumenta el tamaño un 5,84%.
  - **Grano 4:** Reduce el tamaño un 20,71%.
- **Zona Verde:**
  - **Grano 6 {1}:** Reduce el tamaño un 30,04%.
  - **Grano 7 {2}:** Reduce el tamaño un 5,92%.

- **Grano 8 {3}**: Reduce el tamaño un 7,57%.

#### 8.1.4. Evaluación de la superficie después de 40 pasadas de SiC H – 1°

En este apartado se compara el estado de la superficie de la muela tras 40 pasadas del primer paso de reperfilado con el estado después de 30. En la Figura 8.6 se pueden ver ambos estados agrupados con los granos que se analizan marcados.

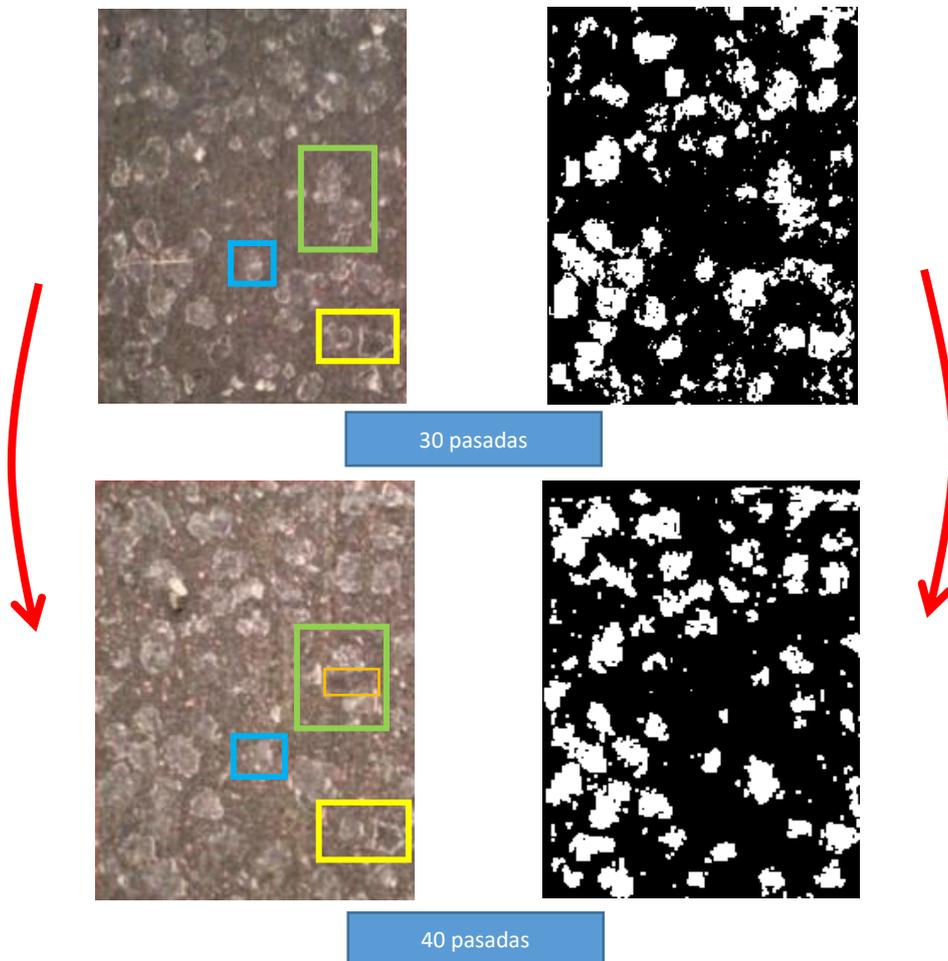


Figura 8.6:Comparativa, 30 pasadas - 40 pasadas (SiC H - 1°)

En este estado la concentración de granos es del 23,3%, es decir, se ha reducido 1,15% respecto al estado anterior y 8,39% respecto al comienzo.

En cuanto a la evaluación de los granos seleccionados, se discute lo siguiente:

- **Zona Azul:**
  - **Nuevo 1:** Aumenta el tamaño un 0,85%.
- **Zona Amarilla:**
  - **Grano 5:** Reduce el tamaño un 29,6%.
  - **Grano 4:** Reduce el tamaño un 44,39%.
- **Zona Verde:**
  - **Grano 6 {1}:** Reduce el tamaño un 28,24%.
  - **Grano 7 {2}:** Alcanza última fase de salto de grano y deja un hueco en superficie que corresponde con el rectángulo naranja de la figura.
  - **Grano 8 {3}:** Reduce el tamaño un 74,65%.

### 8.1.5. Evaluación de la superficie después de 50 pasadas de SiC H – 1°

En este apartado se compara el estado de la superficie de la muela tras 50 pasadas del primer paso de reperfilado con el estado después de 40. En la Figura 8.6 se pueden ver ambos estados agrupados con los granos que se analizan marcados.

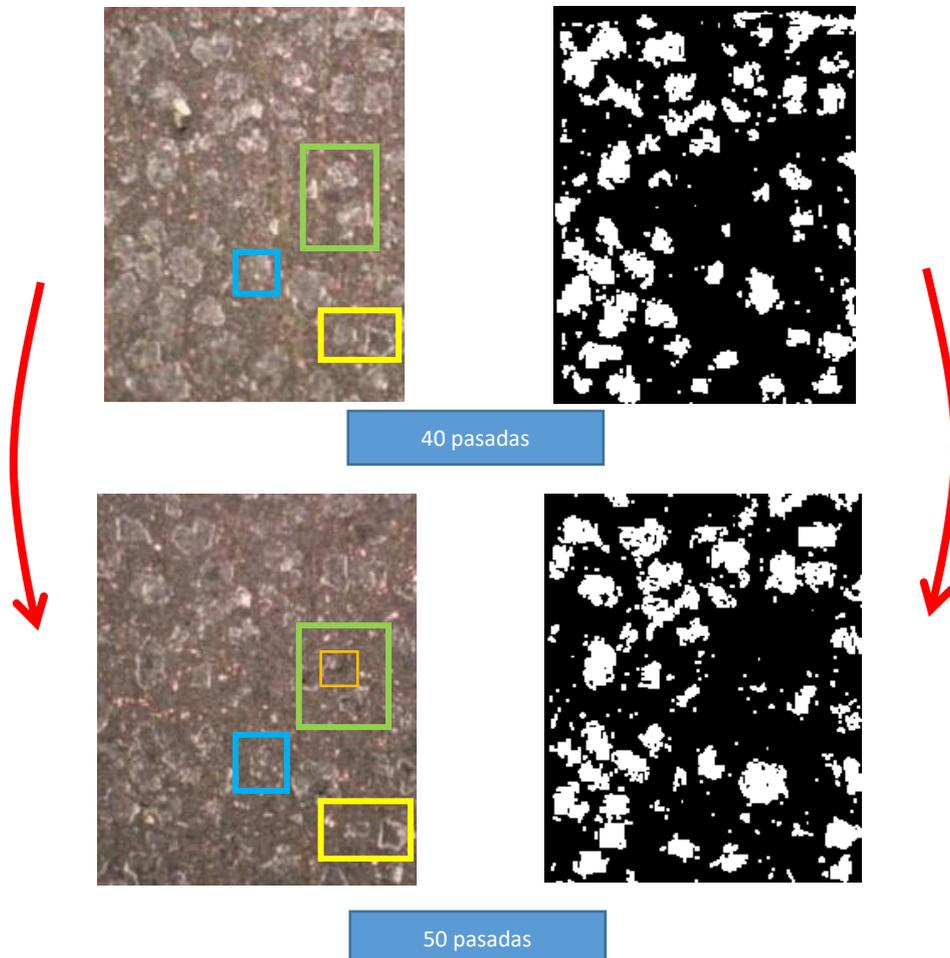


Figura 8.7:Comparativa, 40 pasadas - 50 pasadas (SiC H - 1°)

En este estado la concentración de granos es del 24,05%, es decir, se ha aumentado 0,75% respecto al estado anterior y se ha reducido 7,64% respecto al comienzo.

En cuanto a la evaluación de los granos seleccionados, se discute lo siguiente:

- **Zona Azul:**
  - **Nuevo 1:** Aumenta el tamaño un 80,70%. Varía la inclinación notablemente, se entiende que el grano alcanza la siguiente fase de su vida útil.
- **Zona Amarilla:**
  - **Grano 5:** Aumenta el tamaño un 8,46%.
  - **Grano 4:** Reduce el tamaño un 57,79%.
- **Zona Verde:**
  - **Grano 6 {1}:** Alcanza última fase de salto de grano y deja un hueco en superficie que corresponde con el rectángulo naranja de la figura.
  - **Grano 8 {3}:** Aumenta el tamaño un 45,08%. Varía la inclinación.

### 8.1.6. Análisis de la geometría SiC H – 1°

En este apartado se analiza la geometría del perfil de la muela. Dicho perfil corresponde con la geometría negativa del perfil del grafito.

Para realizar el análisis se estudia la Figura 8.8. El ángulo de  $79,7^\circ$  de la figura corresponde a la arista que antes entra en contacto con el SiC. La muela de fábrica disponía de  $90^\circ$  en ambos lados. Por lo tanto, tras los ensayos, el ángulo de  $90^\circ$  ha pasado a ser de  $100,3^\circ$ , es decir, ha aumentado un 11,4%. En cuanto a la otra arista, el ángulo ha pasado a ser de  $91,9^\circ$ , aumentando un 2,1%. Por lo tanto, la muela ha perdido su geometría inicial. En definitiva, el ángulo de la arista que entra primero en contacto ha aumentado un 5,4 veces más que el de la otra arista.



Figura 8.8: Análisis de la geometría de la muela SiC H – 1°

### 8.1.7. Discusión de resultados SiC H – 1°

En este apartado se estudian los datos numéricos obtenidos en el procedimiento de cálculo anterior. En la Figura 8.9 se pueden ver los estados evaluados de la muela, así como las zonas que contienen a los granos que se estudian.

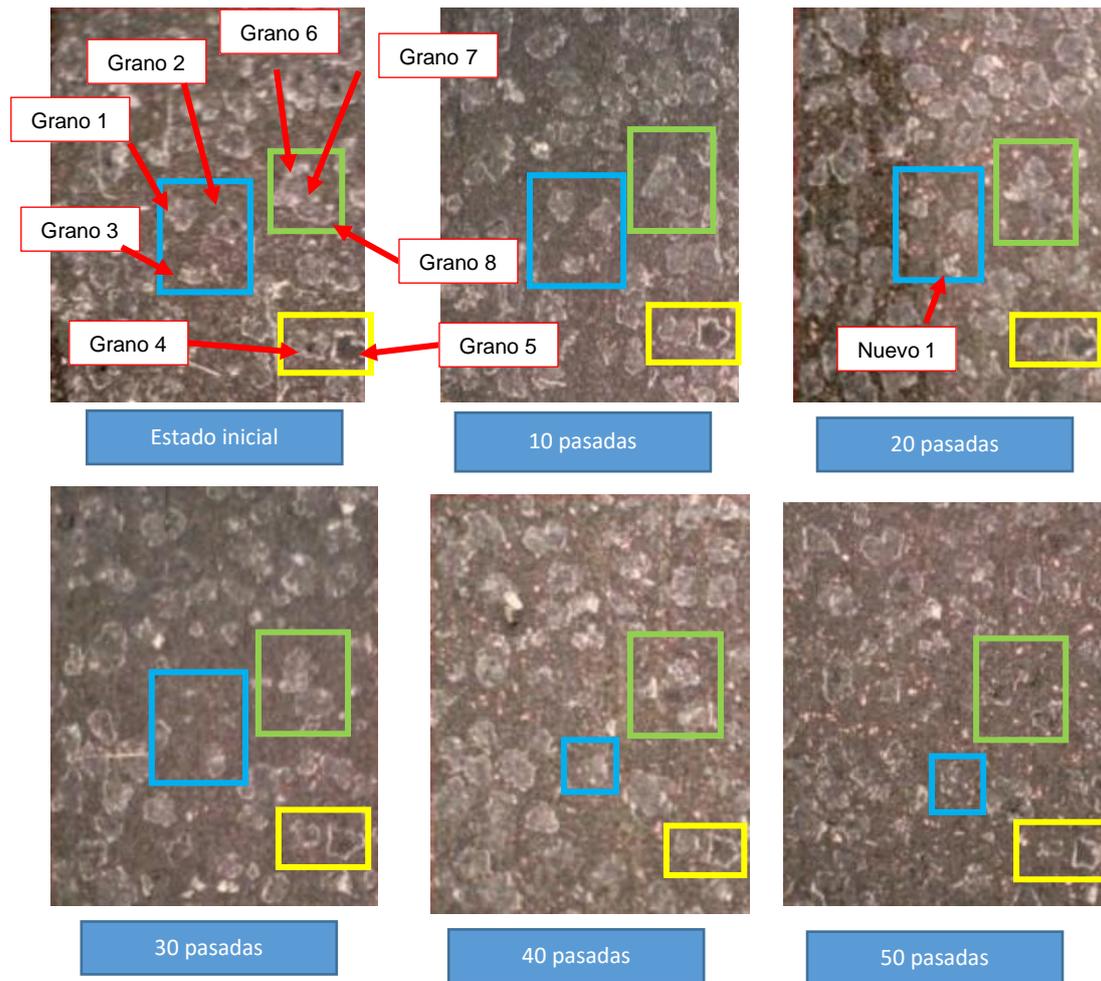


Figura 8.9: Estados de la muela SiC H - 1°

Los granos a los que se les realiza el seguimiento vienen marcados en la figura y se distribuyen en tres zonas concretas.

➤ **Zona Azul:**

- Grano 1
- Grano 2
- Grano 3

➤ **Zona Amarilla:**

- Grano 4
- Grano 5

➤ **Zona Verde:**

- Grano 6
- Grano 7
- Grano 8

En la Figura 8.10 se puede ver la concentración de granos correspondiente a cada uno de los estados de muela evaluados. Se aprecia que a medida que se realiza el proceso la concentración de granos varía. Se entiende que el reperfilado paso 1 en el bloque de ensayos SiC H – 1° es capaz al menos de tener incidencia en la superficie de la muela. Por lo tanto, el siguiente paso es averiguar de qué tipo de incidencia se trata, si arranca únicamente aglomerante haciendo sobresalir a los granos hasta que saltan (efecto de reavivado) o bien arranca tanto aglomerante como fractura partículas de diamante (efecto de reperfilado paso 1).

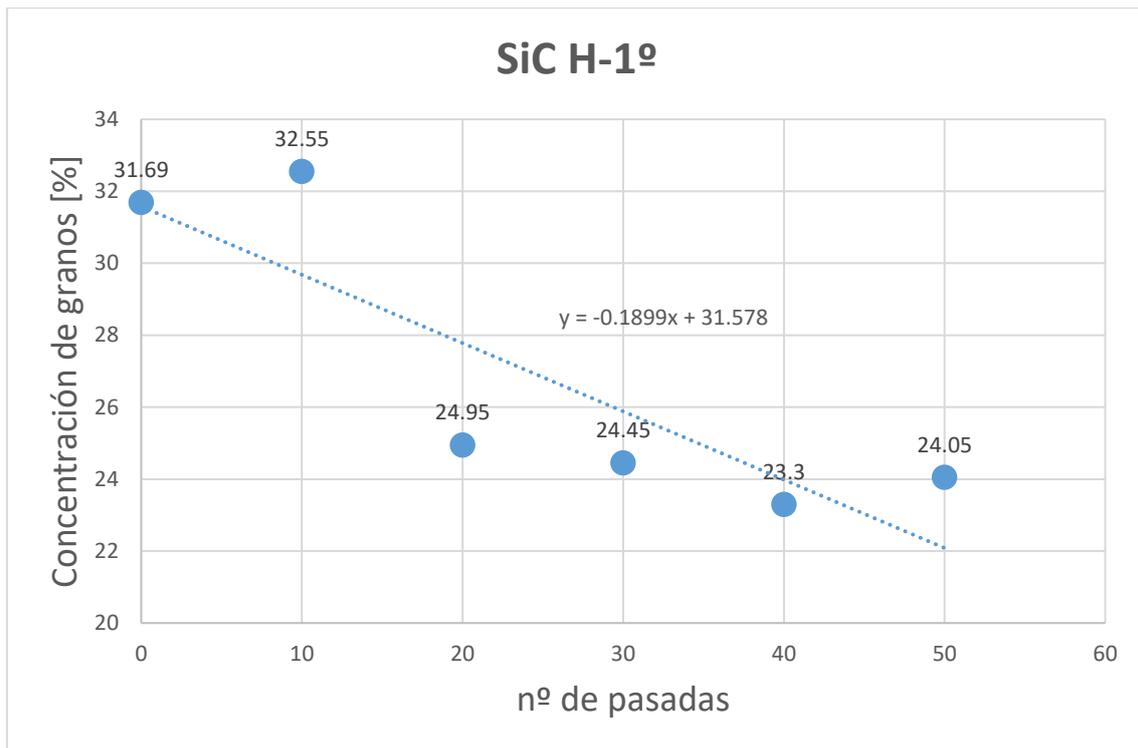


Figura 8.10: Concentración de granos en SiC H – 1º.

Una manera de estudiar el tipo de incidencia es realizando seguimiento a varios granos en concreto y estudiar su comportamiento durante el proceso. A continuación, se estudian varios granos dentro de las zonas que se establecen en apartados anteriores. Se analiza el área del grano en la superficie y se compara con estados anteriores para conocer su aumento o reducción. Con esto es posible estimar el mecanismo de arranque del grano y por tanto del proceso.

Se comienza con la zona azul, la cual al comienzo del bloque de ensayos contiene tres granos. En la Figura 8.11 se ve la evolución de los granos en dicha zona. Se aprecia como el Grano 1 al comienzo del reperfilado paso 1 aumenta el área ligeramente (un 6%), pero luego comienza a reducirse considerablemente (hasta un 70%) antes de desprenderse de la superficie. Se entiende que el grano se ha ido fracturando en el intervalo pasadas 10-20, de lo contrario, la parte superior de grano tapanía la inferior con lo que el área visible sería el mismo y siempre el mayor.

Con el Grano 2 ocurre un fenómeno similar, pero manteniendo el tamaño con un ligero aumento (1,56%) y luego reduciéndose (un 62,57%) antes de desprenderse.

En cambio, el Grano 3 aumenta el área antes de desprenderse. Es probable que el mecanismo de arranque del grano haya sido el salto de grano debido a que el volumen de grano sumergido en la muela no sea suficiente para sostener el grano.

Por último, se aprecia como un grano emerge a la superficie en el intervalo de pasadas 20-30. Se denomina Nuevo 1 y al principio aumenta el área (41,17%) notablemente a medida que avanza en su primera fase de vida. A continuación, mantiene el tamaño con un aumento de apenas 0,85% para luego aumentar notablemente (80,7%) al final de los ensayos cuando el grano comienza su segunda fase de vida. Por lo tanto, analizando el

comportamiento de los granos que se desprenden de la superficie, el mecanismo de arranque predominante en esta zona ha sido la fracturación de grano.

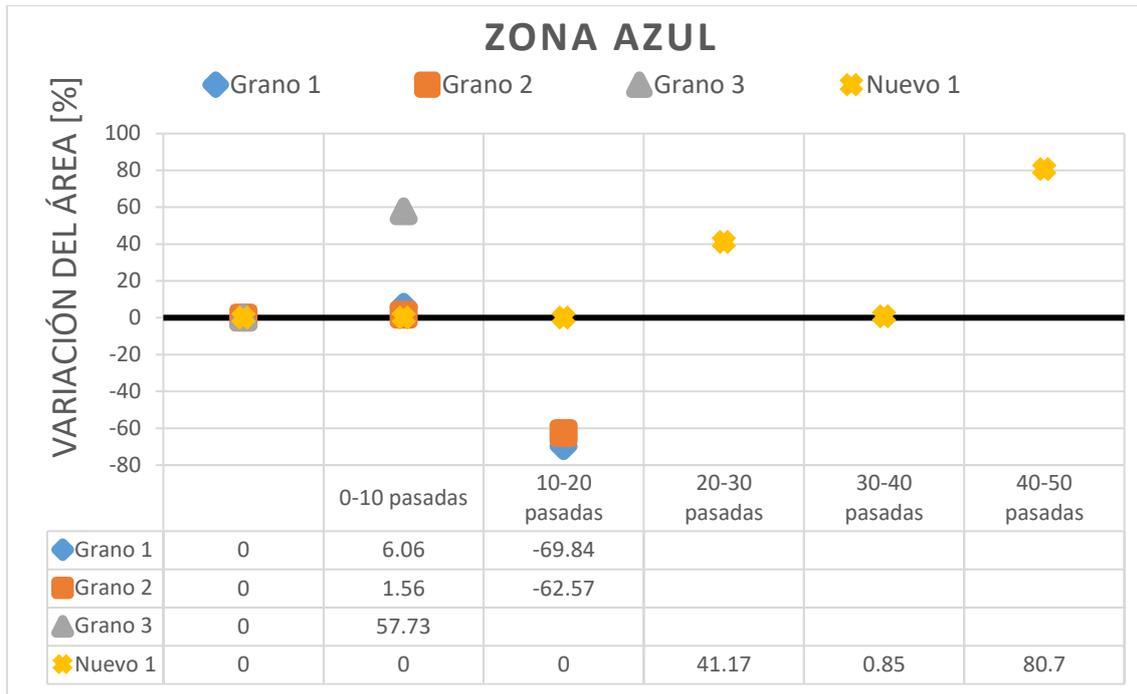


Figura 8.11: Evolución de los granos de la zona azul (SiC H – 1º)

A continuación, se estudian los granos que forman la zona amarilla. Dicha zona comienza el bloque de ensayos con dos granos. En la Figura 8.12 se ve la evolución de los granos. Por un lado, el Grano 5 no sufre variaciones notables al comienzo y la variación está dentro del intervalo de incertidumbre del programa con el que se mide. Es probable que el grano se encuentre en un plano lo suficientemente profundo como para no haber entrado aun en contacto con la herramienta de reperfilado. A partir de la pasada 30 se aprecia una reducción en su tamaño del 29,6%, la muela ha comenzado el contacto con el grano fracturando parte del mismo y el aglomerante de alrededor. Seguido el grano mantiene el tamaño con un aumento ligero del 8,46%.

Por otro lado, el Grano 4 comienza aumentando su área un 14,51% y luego sigue constantes reducciones (hasta un 57,79%). Ha reducido considerablemente su tamaño debido a que la herramienta de reperfilado lo ha ido fracturado. Ninguno de los dos granos de la zona se ha desprendido de la superficie al final del bloque de ensayos. Sin embargo, ambos granos han sufrido reducciones de tamaño notables por lo que si que se detecta tendencia a la fracturación.

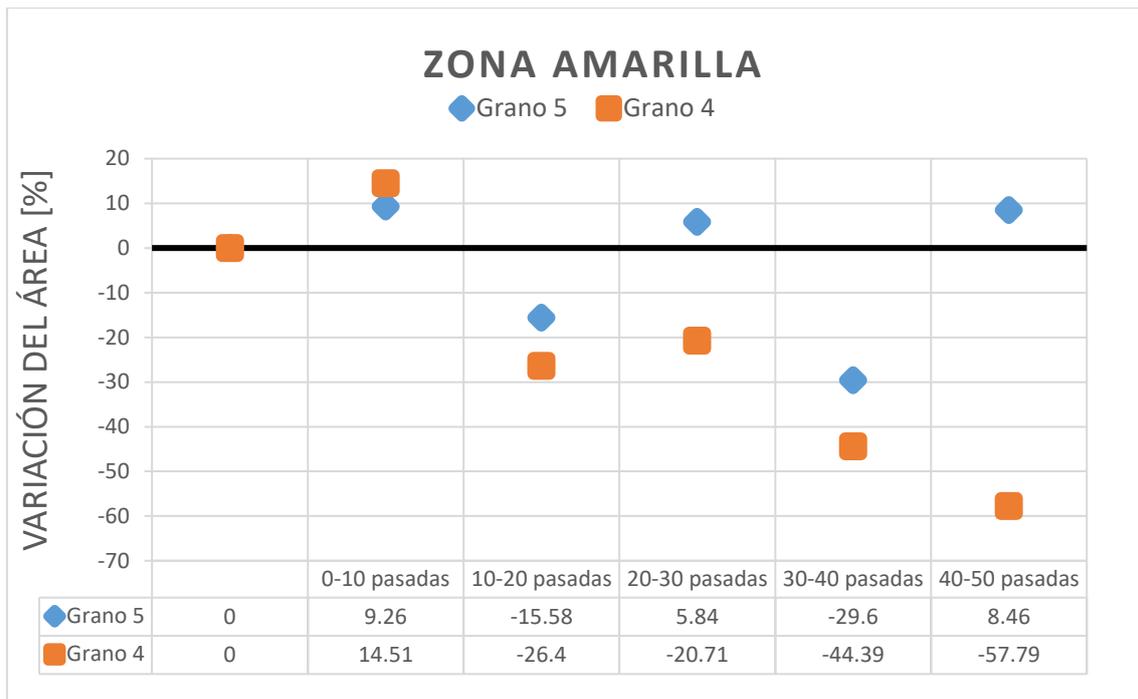


Figura 8.12: Evolución de los granos de la zona amarilla (SiC H – 1°)

Por último, se analizan los granos correspondientes a la zona verde. En esta zona al comienzo de los ensayos, aunque a simple vista parece que contiene un solo grano, en realidad se trata de tres granos diferentes. En la Figura 8.13 se ve la evolución de los mismos. En cuanto al Grano 6, al comienzo del bloque de ensayos se encuentra en su fase de trabajo, con la mayor superficie trabajo. El grano sufre reducciones de su tamaño continuamente (las más notables de 30,04% y de 28,24% antes de desprenderse) hasta que en el intervalo de pasadas 40-50 se desprende completamente. Por lo tanto, el mecanismo de arranque predominante antes de desprenderse es la fractura de grano.

Con el Grano 7 ocurre algo similar con reducciones de hasta un 35,48% antes de desprenderse de la superficie.

Por último, el Grano 8 comienza aumentando el tamaño un 14,79%. Seguido, comienza a reducir su tamaño (hasta un máximo de 61,45%) lo que se entiende como fractura de grano hasta que en las últimas pasadas aumenta un 45,08% ya que el grano avanza en su vida y sobresale cada vez más a la superficie.

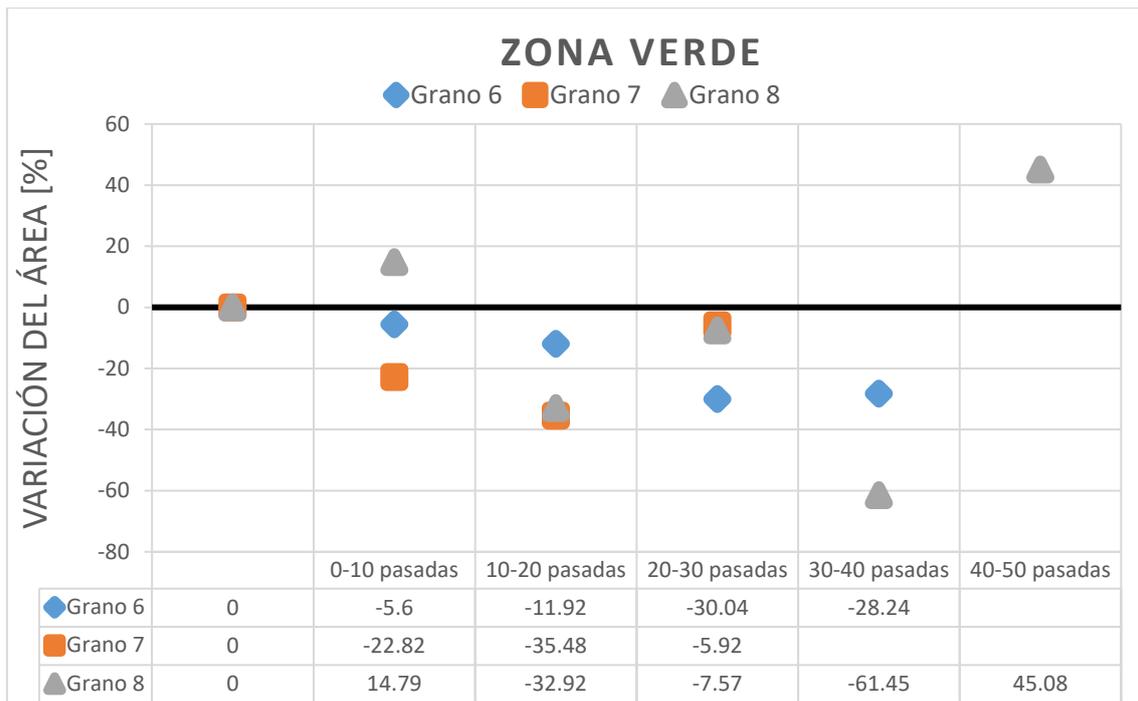


Figura 8.13: Evolución de los granos de la zona verde (SiC H – 1°)

En conclusión, el mecanismo de arranque predominante en las tres zonas es la fractura de grano. Por lo tanto, se ha conseguido incidir tanto en el aglomerante como en los granos de diamante, se ha conseguido cumplir con el reperfilado paso 1. Sin embargo, a medida que se realizan las pasadas se aprecian pocas variaciones en la inclinación de los planos del grano y es probable que el reperfilado paso 1 no haya sido suficiente. El estudio de la inclinación de los planos de los granos se basa en el modo que reflejan los haz luz procedentes del microscopio.

Por último, como se puede ver en el anexo 8.1.6. Análisis de la geometría SiC H – 1°, la desviación del ángulo recto aumenta un 11% en la arista de incidencia. Respecto a la otra arista, aumenta un 2%. Se toman una desviación de partida del 0%, debido a que la muela al comienzo de los ensayos tiene un ángulo recto de 90° de fabricación. En la siguiente figura se grafican estos resultados.

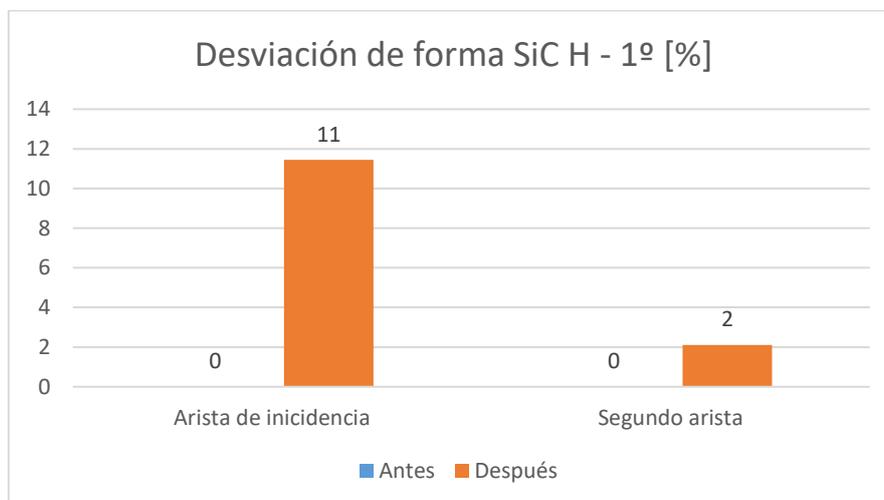


Figura 8.14: Desviación de forma SiC H - 1°

En el gráfico se muestra la desviación de forma en porcentaje respecto al valor nominal de fabricación de 90°. Para los valores angulares reales ver Tabla 8.1.

Tabla 8.1: Desviación de forma SiC H - 1°

Desviación de forma SiC H - 1° [°]			
	Antes	Después	Dif.
<b>Arista de incidencia</b>	90	100,3	10,3
<b>Segunda arista</b>	90	91,9	1,9

## 8.2. Bloque de ensayos SiC J – 1°

En este apartado se analizan gráficamente los resultados obtenidos en el apartado II.1. *Bloque de ensayos SiC J – 1°*. En la Figura 8.15 se pueden ver los estados evaluados de la muela, así como las zonas que contienen a los granos que se estudian.

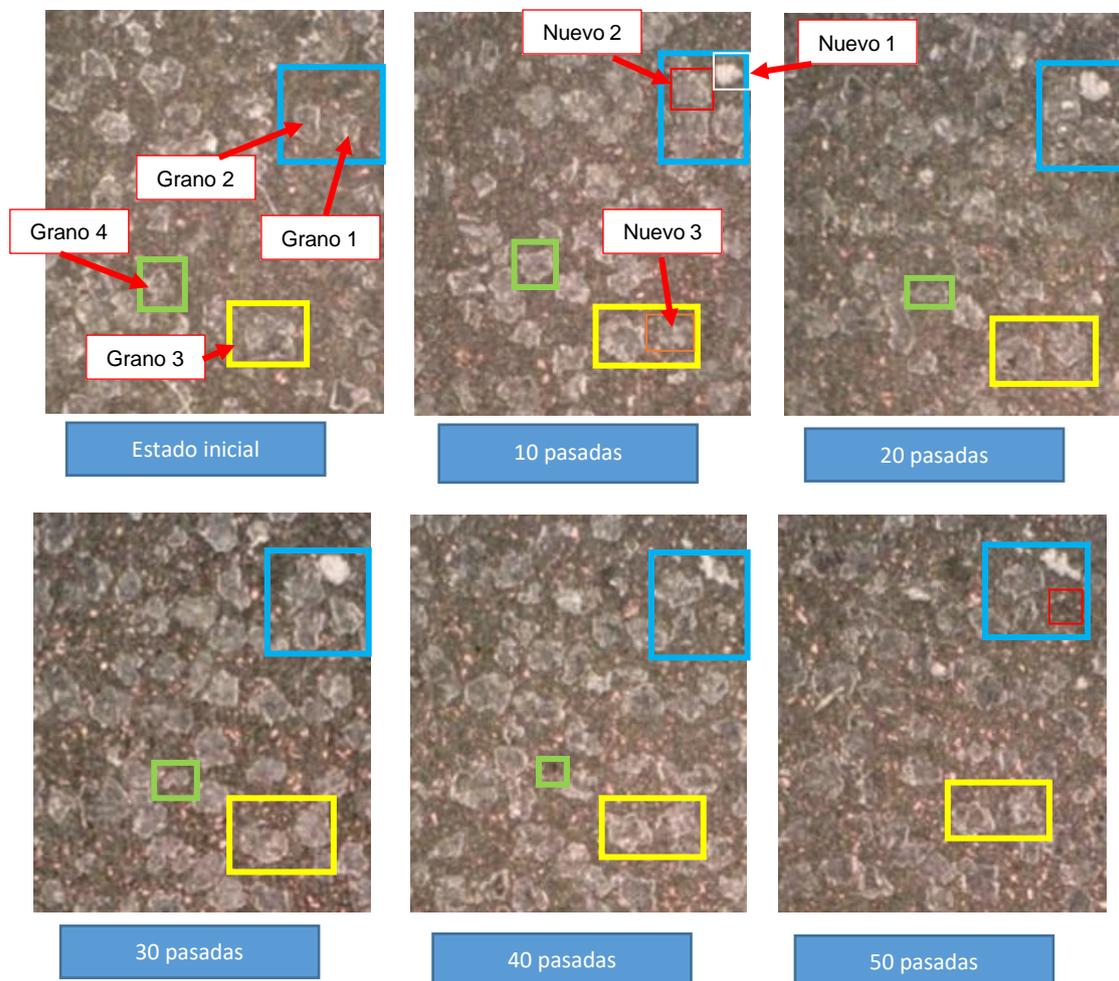


Figura 8.15: Estados de la muela SiC J - 1°

Los granos a los que se les realiza el seguimiento vienen marcados en la figura y se distribuyen en tres zonas concretas.

- **Zona Azul:**

  - Grano 1
  - Grano 2
- **Zona Amarilla:**

  - Grano 3
- **Zona Verde:**

  - Grano 4

En la Figura 8.16 se puede ver la concentración correspondiente a cada uno de los estados de la muela evaluados. Se aprecia que a medida que se realizan pasadas la concentración varía. Se entiende que el reperfilado paso 1 SiC J – 1º es capaz al menos de tener incidencia en la superficie de la muela y es interesante conocer el tipo de incidencia (efecto de reavivado o efecto de reperfilado paso 1). Para ello, se estudian los comportamientos de varios granos durante el proceso.

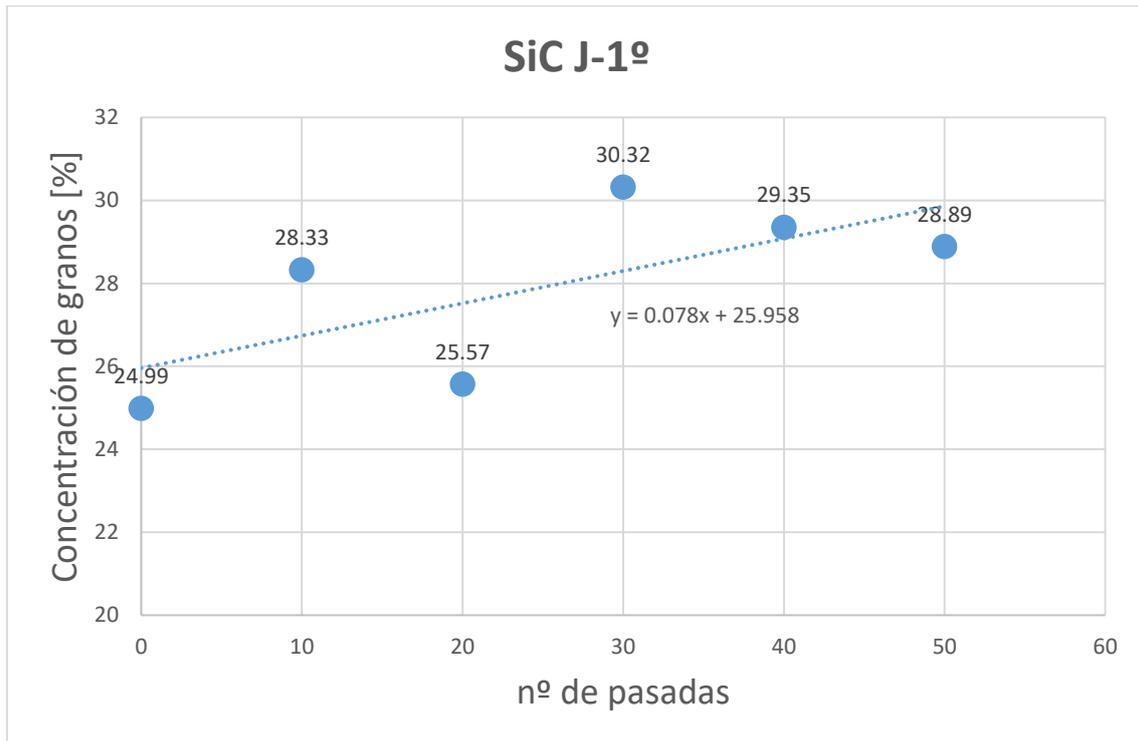


Figura 8.16: Concentración de granos en SiC J - 1º

Se da comienzo con la zona azul, la cual contiene dos granos al comienzo de los ensayos. En la Figura 8.17 se muestra la evolución de los granos en dicha zona. En primer lugar, el Grano 1 comienza aumentando su tamaño un 61%. En las siguientes etapas continúa con su aumento, pero ya menos notable (6,1% y 17,61%, respectivamente). Entonces en el intervalo de pasadas 30-40 el grano se fractura reduce su tamaño un 84,15% y posteriormente se desprende de la superficie.

En segundo lugar, el Grano 2 comienza con un aumento del 102,5%. En las siguientes etapas este grano reduce el tamaño un 29,71%, un 2,7% y un 45,36%. Por último, el grano aumenta un 4,26%.

Al comienzo de este bloque de ensayos la zona azul contaba con dos granos. Sin embargo, en el intervalo de pasadas 0-10 aparece un grano nuevo en la superficie (Nuevo 1). Este grano comienza con un aumento del 54,01% y posteriormente va manteniendo el tamaño con pequeñas variaciones (un aumento del 0,34%, una reducción del 25,75% y un aumento del 5%).

Además, también aparece el Nuevo 2 que tiene un comportamiento similar al grano anterior. Comienza aumentando (un 8%, un 6% y un 17%) y posteriormente mantiene el tamaño con las pasadas reduciendo el tamaño únicamente un 2%.

Con estos dos últimos granos recién salidos a la superficie se entiende que los granos comienzan aumentando el tamaño hasta que alcanzan su tamaño medio y lo mantienen con las pasadas.

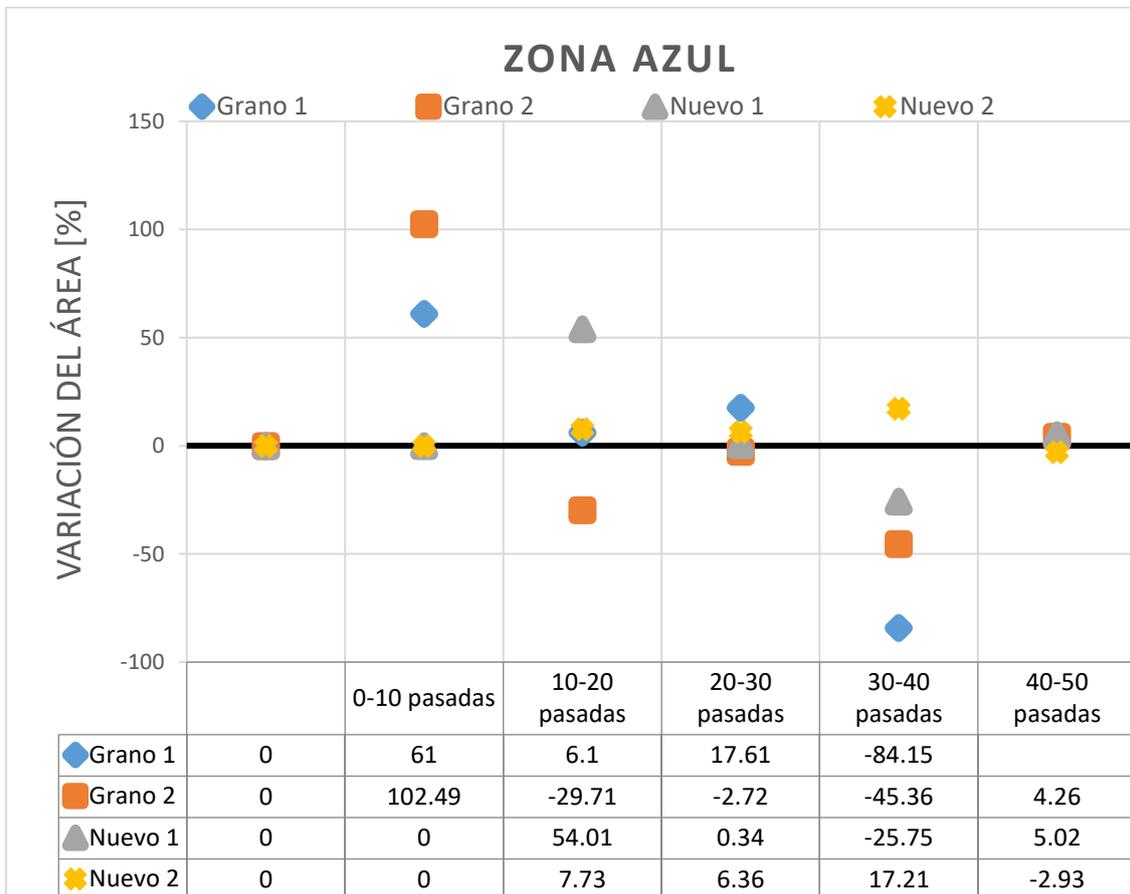


Figura 8.17: Evolución de los granos de la zona azul (SiC J - 1º)

A continuación, se estudian los granos que forman la zona amarilla. Dicha zona contiene un solo grano al comienzo del bloque. En la Figura 8.18 se puede ver a evolución del mismo. El Grano 3 aumenta y reduce su tamaño durante las pasadas sin cambios notables.

Al comienzo del boque de ensayos en esta zona se encuentra solamente el grano Central, pero, en el intervalo de pasadas 0-10 aparece un nuevo grano (el Nuevo 3). Este grano comienza aumentado su tamaño un 90% y un 22% en sus dos primeros intervalos de pasadas y luego mantiene el tamaño con pequeñas reducciones del 3% y 13%. Este grano confirma el comportamiento de los granos recién emergidos a la superficie en la zona azul. Dichos granos también comenzaban con aumentos y luego pequeñas reducciones, pero manteniendo el tamaño.

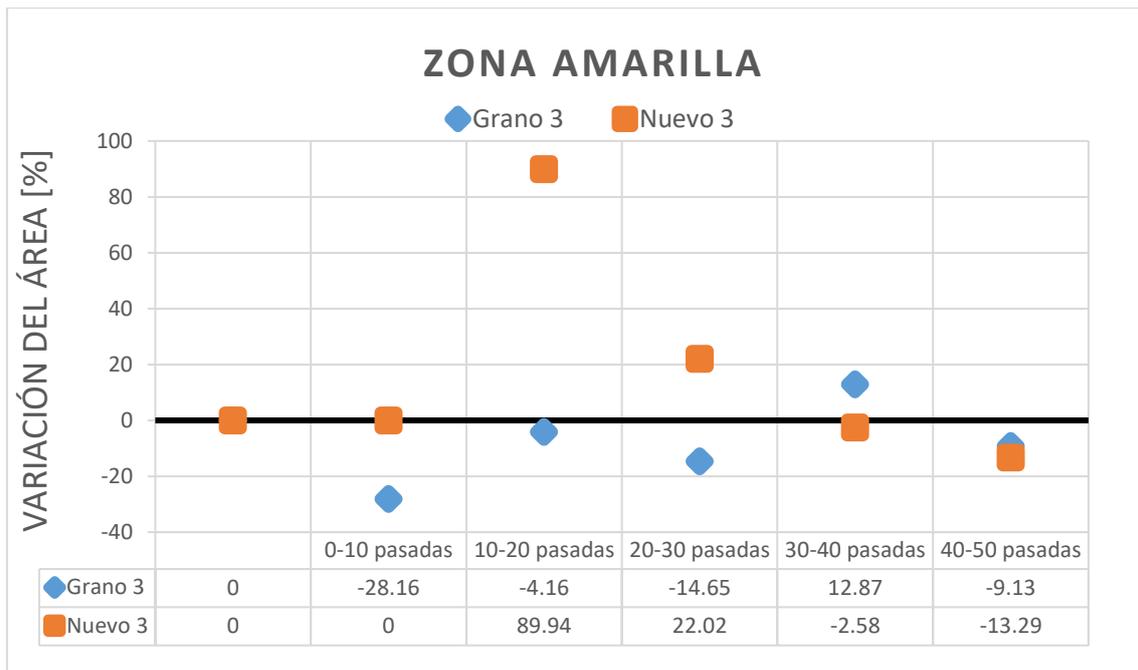


Figura 8.18: Evolución de los granos de la zona amarilla (SiC J - 1º)

Para terminar con el análisis de los granos, se estudia la zona verde que contiene un solo grano. En la Figura 8.19 se puede ver la evolución en este del mismo, denominado Grano 4. Este grano comienza aumentando el tamaño un 25% para seguido reducirse un 69%. En este punto la mayor parte del grano se ha fractura. A continuación, la parte de grano restante mantiene el tamaño con un ligero aumento del 3% antes de desprenderse completamente.

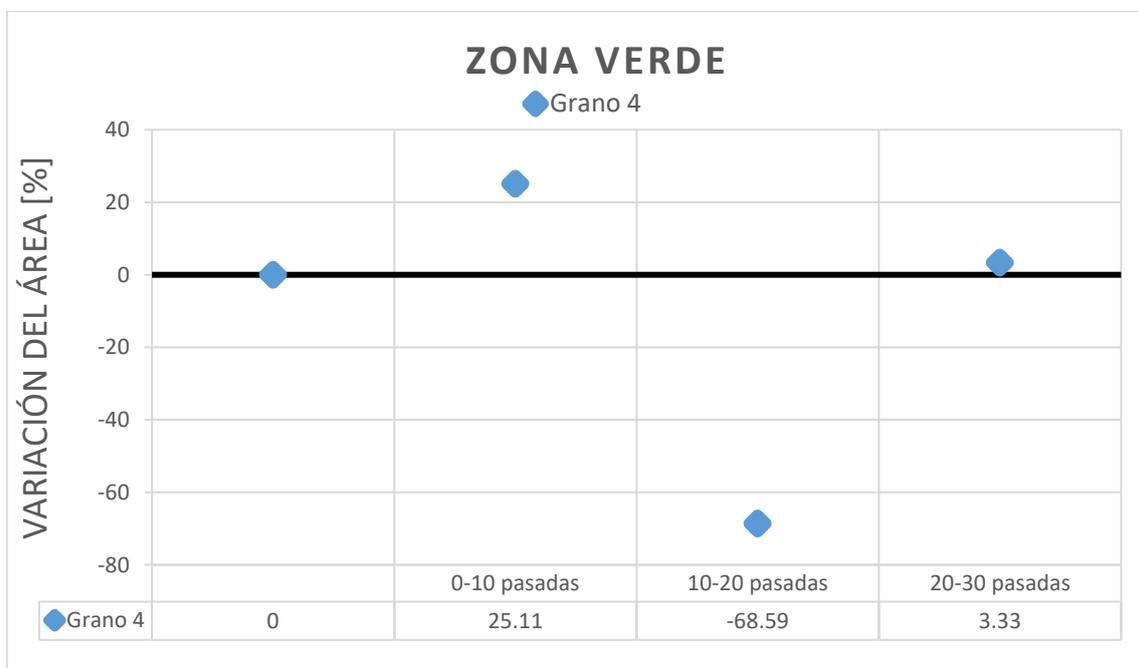


Figura 8.19: Evolución de los granos de la zona verde (SiC J - 1º)

El mecanismo de arranque predominante de nuevo se entiende que es la fractura de grano, ya que los granos que se llegan a desprender lo hacen después de una considerable reducción de tamaño.

Por último, partiendo de la desviación de forma dejado por el bloque de ensayos previo, se puede ver que la desviación en la arista de incidencia aumenta hasta un 46%, mientras que en la otra arista hasta un 4%. Para mayor detalle sobre el análisis geométrico ver el anexo II.1.6. Análisis de la geometría SiC J – 1°. En la siguiente figura se grafican los resultados comentados.

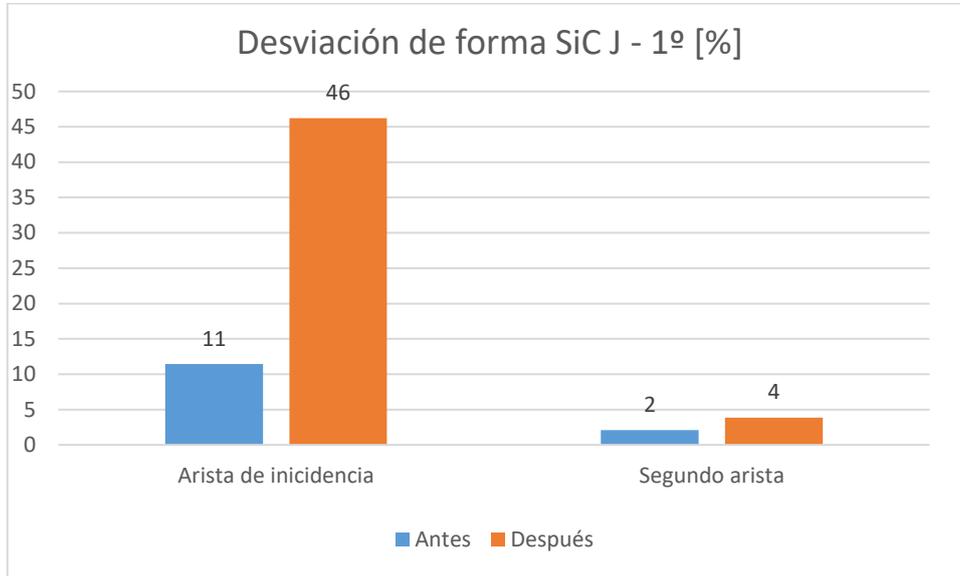


Figura 8.20: Desviación de forma SiC J - 1º

En el gráfico se muestra la desviación de forma en porcentaje respecto al valor nominal de fabricación de 90°. Para los valores angulares reales ver la Tabla 8.2.

Tabla 8.2: Desviación de forma en valores angulares SiC J - 1º

Desviación de forma SiC J - 1º [°]			
	Antes	Después	Dif.
<b>Arista de incidencia</b>	100,3	131,58	31,28
<b>Segunda arista</b>	91,9	93,46	1,56

### 8.3. Bloque de ensayos Tantalio – 1º

En este apartado se analizan gráficamente los resultados obtenidos en el anexo II.2. *Bloque de ensayos Tantalio - 1º*. En la Figura 8.21 se pueden ver los estados evaluados de la muela, así como las zonas que contienen a los granos que se estudian.

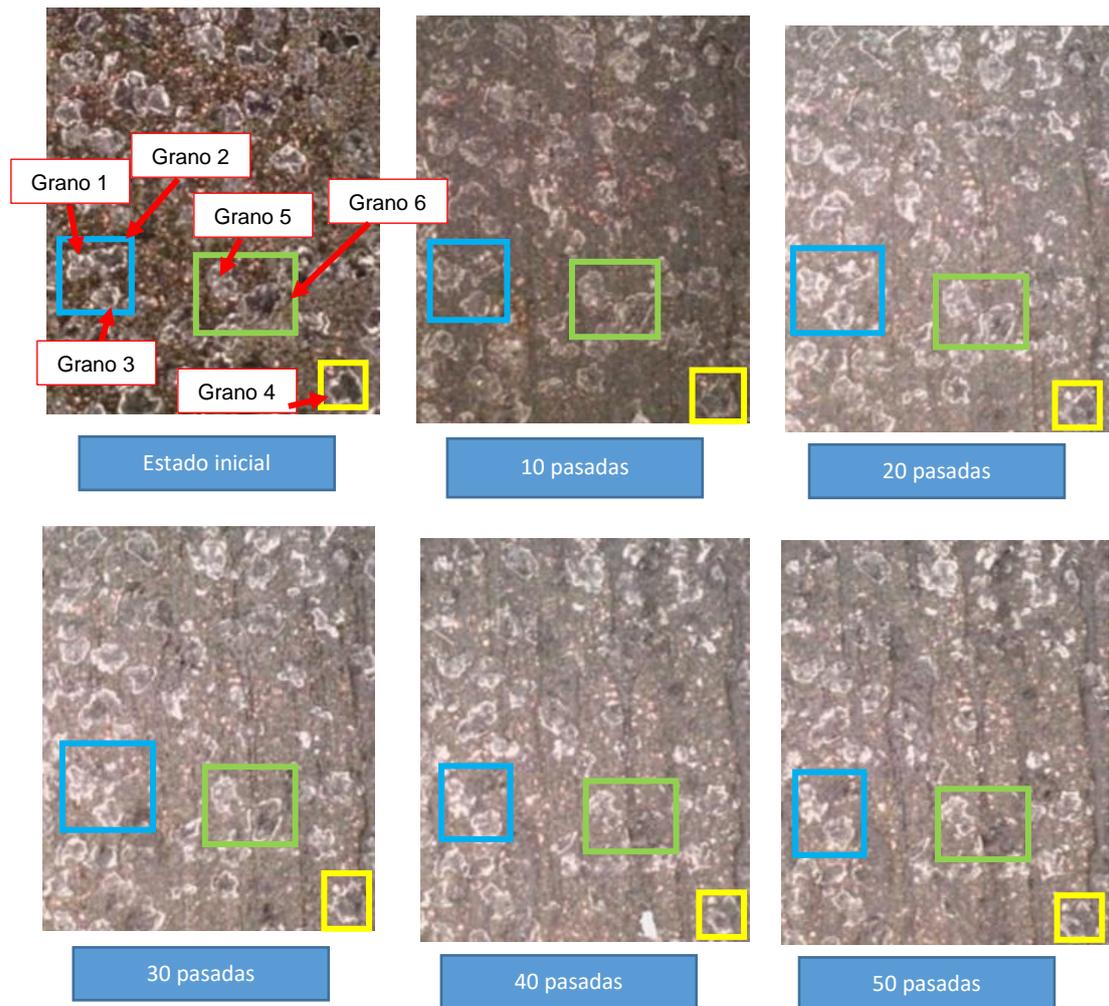


Figura 8.21: Estados de muela Tantalio - 1º

Los granos a los que se les realiza el seguimiento vienen marcados en la figura y se distribuyen en tres zonas concretas.

- **Zona Azul:**
  - Grano 1
  - Grano 2
  - Grano 3
- **Zona Amarilla:**
  - Grano 4
- **Zona Verde:**
  - Grano 5
  - Grano 6

En la Figura 8.22 se muestra el porcentaje de granos en el sector correspondiente a cada uno de los estados de muela evaluados. Se puede ver que la concentración de granos varía con las pasadas y, por lo tanto, el reperfilado ha tenido incidencia. Se puede ver una tendencia inicial a disminuir la concentración de granos. Es interesante conocer el tipo de incidencia, si tiende más a un efecto de reavivado o de reperfilado. Para ello, se estudia el comportamiento de los granos analizados.

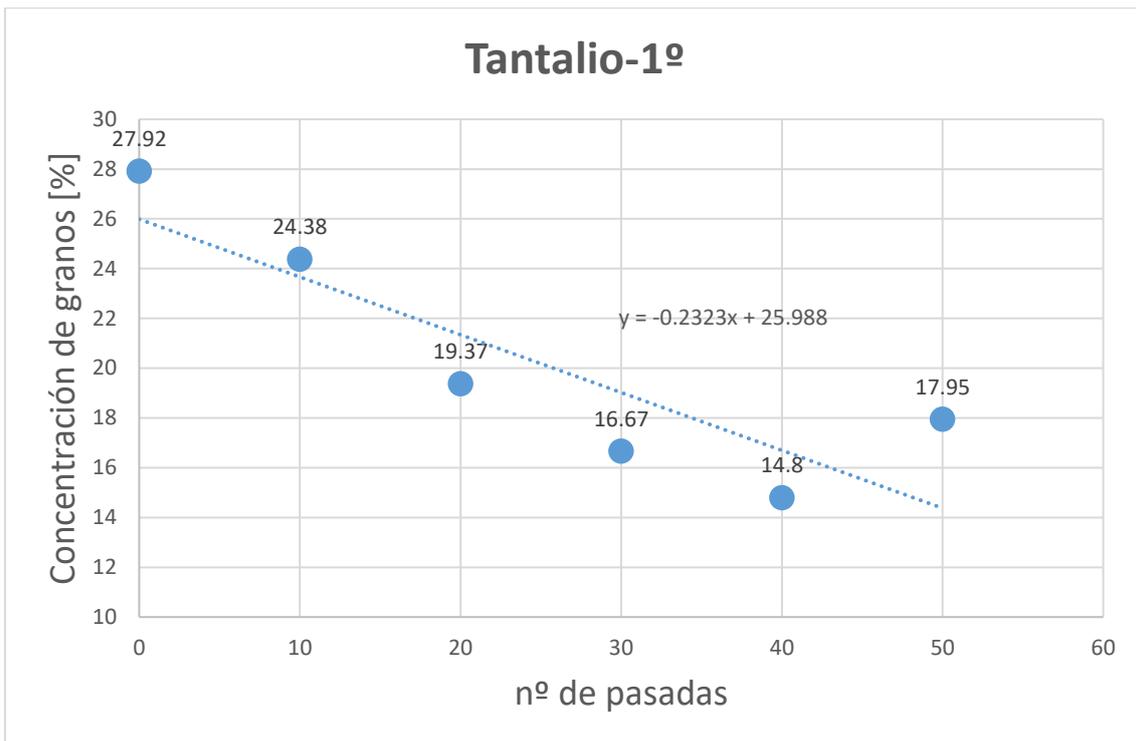


Figura 8.22: Concentración de granos en Tantalio - 1º

Se comienza con la zona azul. En la Figura 8.23 se puede ver la evolución de los granos. Recordando, esta zona al comienzo de los ensayos contiene tres granos. En primer lugar, el Grano al comienzo mantiene su tamaño con pequeñas variaciones de 3% y 0,3%. A continuación, en los siguientes dos intervalos se fractura y se reduce un 27% y 8%. Finalmente, termina el bloque de ensayos manteniendo el tamaño con un pequeño aumento del 10%.

En segundo lugar, el Grano 2 se fractura y reduce continuamente en los tres primeros intervalos, un 19%, otro 19% y un 38%, respectivamente. Finalmente, en el intervalo 30-40 se desprende de la superficie. Se aprecia la misma tendencia que los bloques anteriores, de fracturación previo a desprendimiento.

Por último, en cuanto al Grano 3, mantiene el tamaño durante el bloque de ensayos con pequeños aumentos apenas apreciables. El más destacado es el aumento del 19% en el intervalo de pasadas 30-40.

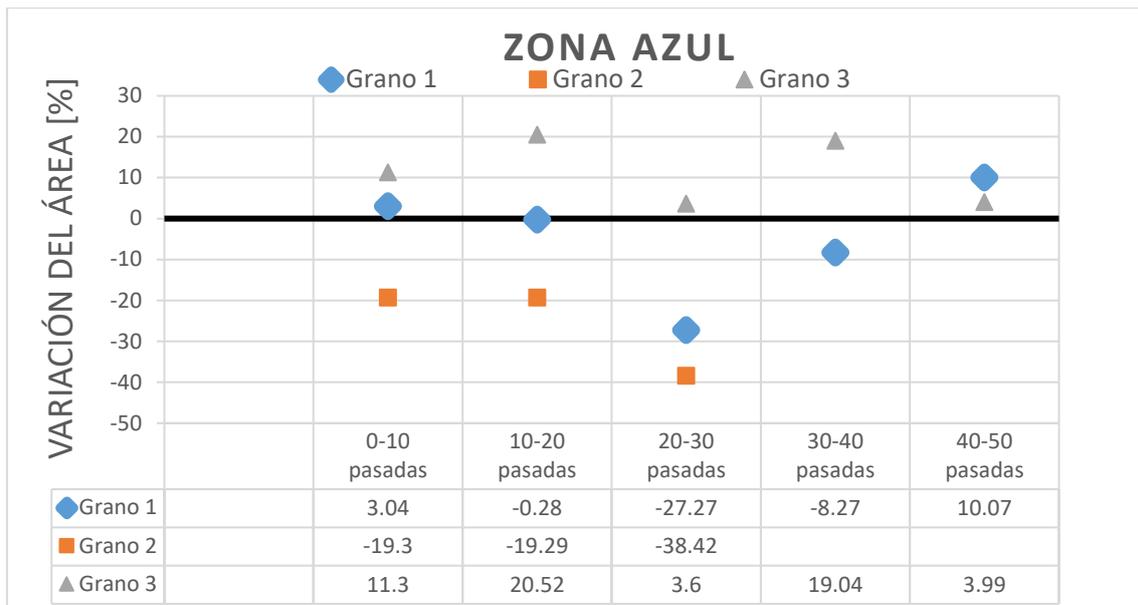


Figura 8.23: Evolución de los granos de la zona azul (Tantalio - 1º)

A continuación, se estudia la zona amarilla. Esta zona contiene un solo grano, el Grano 4. En la Figura 8.24 se observa la evolución de dicho grano. En ningún intervalo de pasadas varía el tamaño de manera considerable. La mayor variación es del 15%.

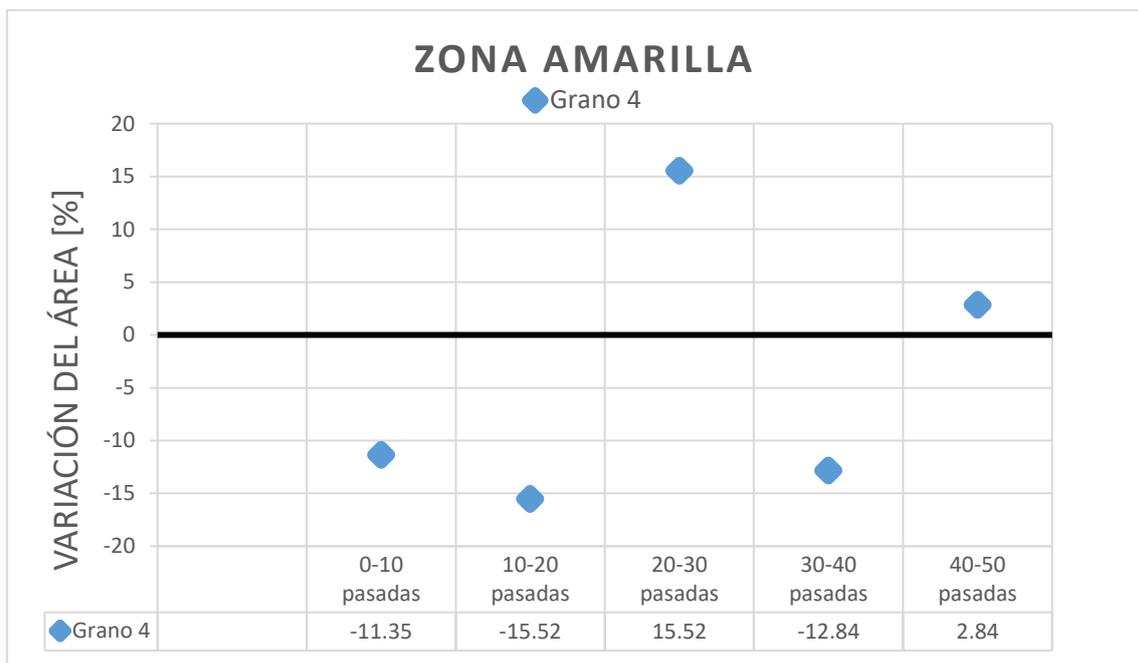


Figura 8.24: Evolución de los granos de la zona amarilla (Tantalio - 1º)

Para terminar con el estudio de los granos, se analiza la zona verde. En la Figura 8.25 se puede observar el comportamiento de los dos granos que forman la zona verde. El Grano 5 mantiene el tamaño durante las pasadas sin cambios considerables. En cuanto al Grano 6, comienza aumentando un 10% y en los siguientes dos intervalos se reduce un 21% y un 8%. Posteriormente se desprende de la superficie.

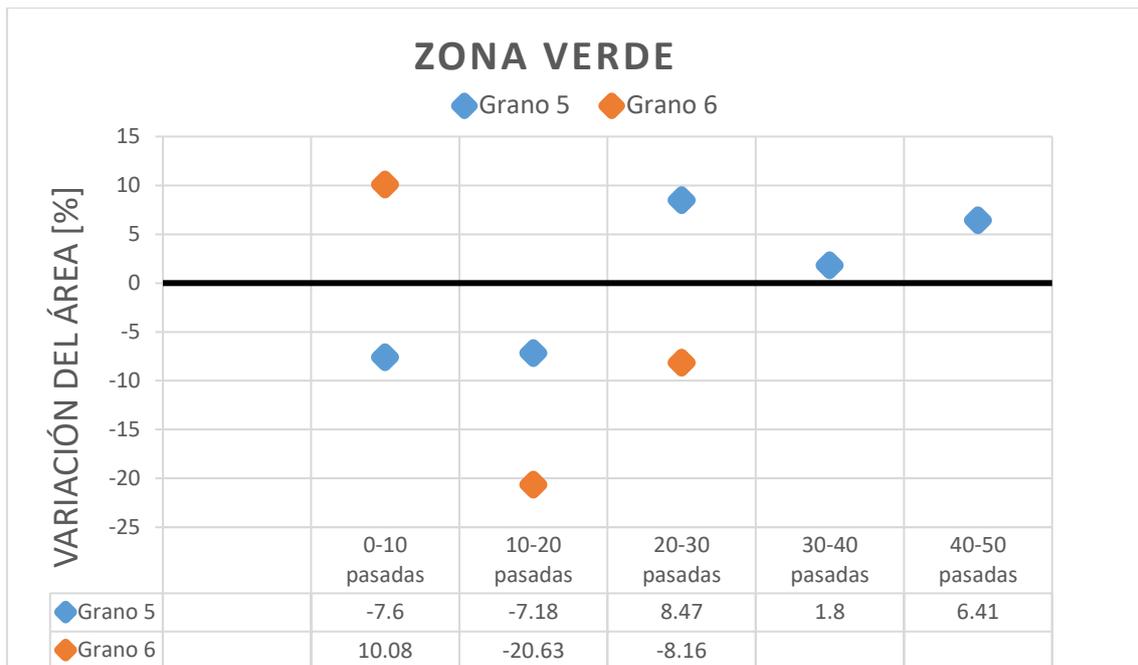


Figura 8.25: Evolución de los granos de la zona verde (Tantalio - 1º)

En los dos granos que se desprende durante este bloque de ensayos se detecta fracturación de partículas de grano previamente, al igual que en ensayos anteriores.

Por último, partiendo de la desviación geométrica del 96% en la arista de incidencia y del 2% en la otra arista, en la primera se mejora un 38% mientras que en la segunda se empeora un 20%. A pesar de la mejora en la arista de incidencia, la desviación continúa siendo del 57%. En la siguiente figura se pueden ver graficados los resultados.

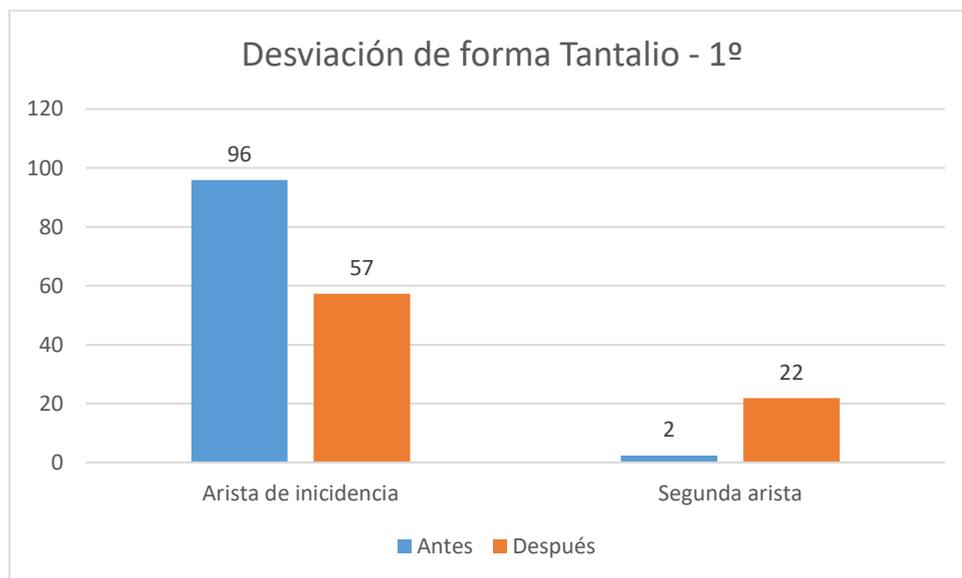


Figura 8.26: Desviación de forma Tantalio - 1º

En el gráfico se muestra la desviación de forma en porcentaje respecto al valor nominal de fabricación de 90°. Para los valores angulares reales ver la Tabla 8.3.

Tabla 8.3: Desviación de forma en valores angulares Tantalio - 1°

Desviación de forma Tantalio - 1° [°]			
	Antes	Después	Dif.
<b>Arista de incidencia</b>	176,26	141,62	-34,64
<b>Segunda arista</b>	92,14	109,65	17,51

## 8.4. Bloque de ensayos Tantalio - DIACUT

En este apartado se analizan gráficamente los resultados obtenidos en el anexo II.3. *Bloque de ensayos Tantalio – DIACUT*. Tal y como se detalla en apartados anteriores, las condiciones del fabricante DIACUT engloban varias pasadas dentro del mismo proceso. Por lo tanto, en este bloque de ensayos en lugar de hablar de intervalos de pasadas, se trata de número de repeticiones. En la Figura 8.27 se pueden ver los estados evaluados de la muela, así como las zonas que contienen a los granos que se estudian.

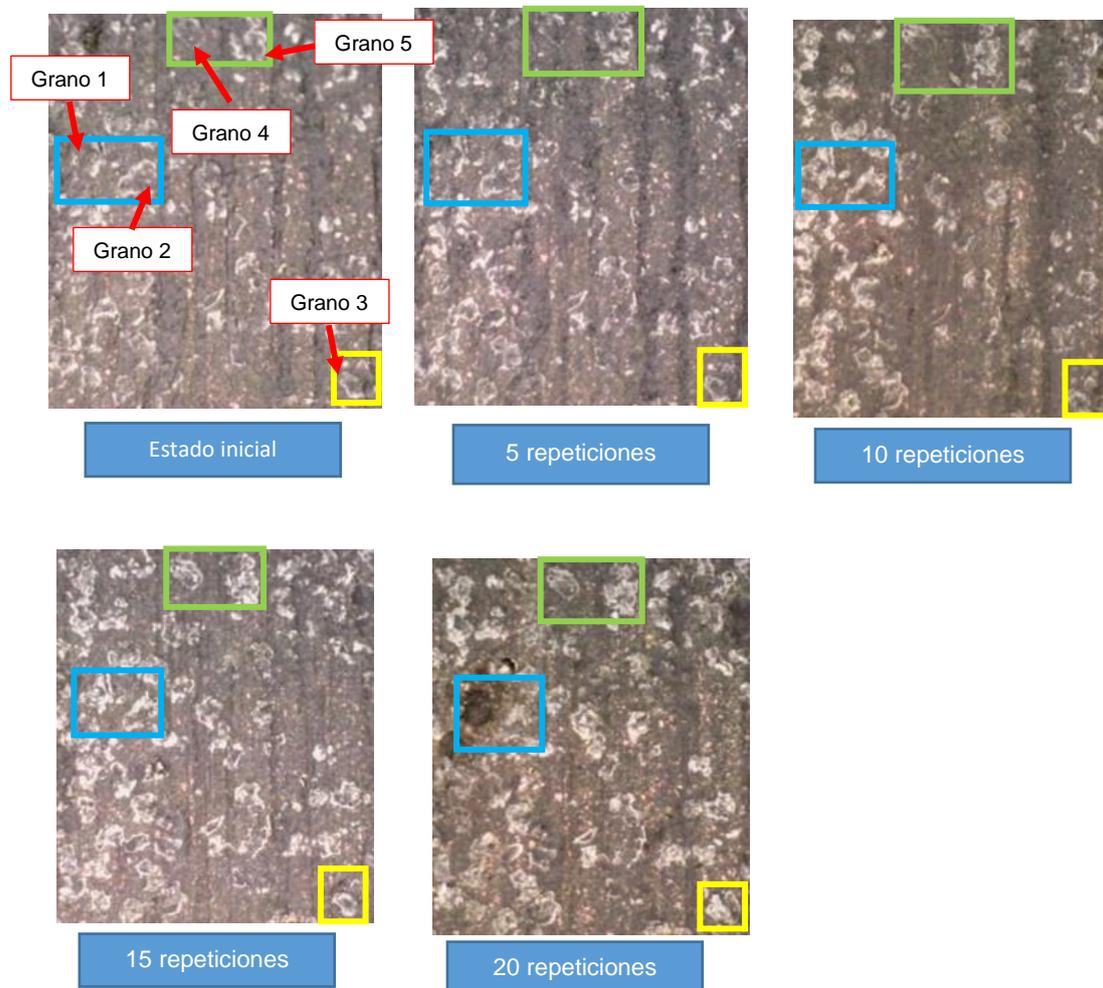


Figura 8.27: Estados de muela Tantalio – DIACUT

Los granos a los que se les realiza el seguimiento vienen marcados en la figura y se distribuyen en tres zonas concretas.

- **Zona Azul:**
  - **Zona Amarilla:**
  - **Zona Verde:**
- Grano 1
  - Grano 3
  - Grano 4
- Grano 2
  - 
  - Grano 5

En la Figura 8.28 se muestra el porcentaje de granos en el sector correspondiente a cada uno de los estados de muela evaluados. Se puede ver como la concentración varía con las repeticiones del reperfilado. Se entiende que el proceso tiene incidencia en la superficie de la muela. También se aprecia que la concentración de granos oscila sobre un valor constante, no se aprecian tendencias de aumentar o disminuir. Para conocer el tipo de incidencia se estudian los granos definidos dentro de cada zona.

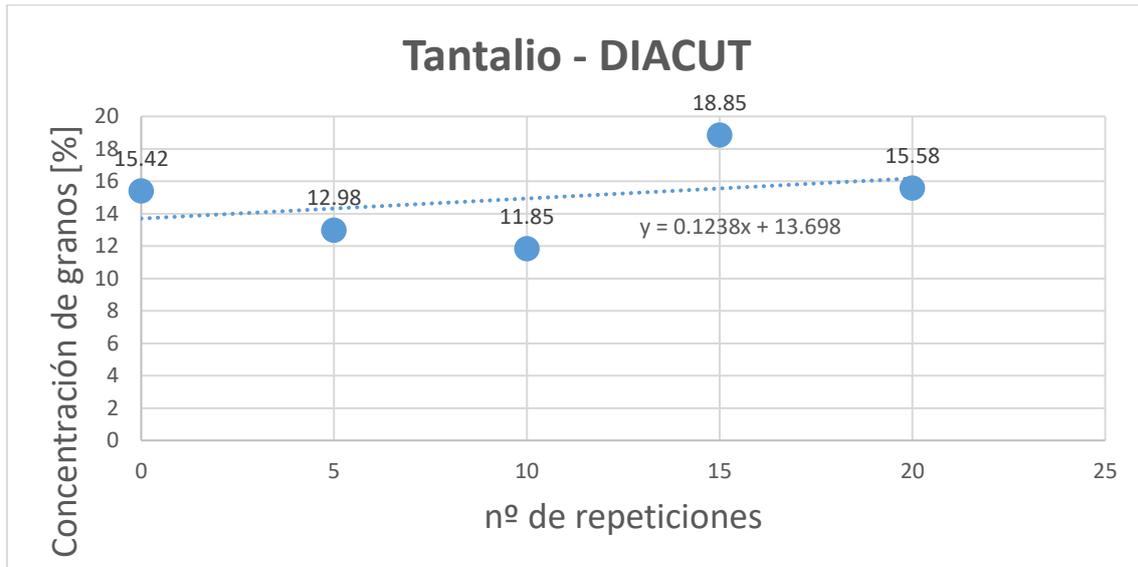


Figura 8.28: Concentración de granos Tantalio – DIACUT

Se comienza con la zona azul. Esta zona al comienzo del bloque de ensayos contiene dos granos. En la Figura 8.29 se puede ver la evolución de los granos. Por un lado, el Grano 1 en las primeras repeticiones comienza aumentando su tamaño de forma considerable (hasta un 10% y 57%) y después sin cambio aparente se desprende de la superficie dejando un hueco. El grano se desprende de la superficie sin fractura aparente y después de un aumento del tamaño. De la misma manera aparece un surco en la superficie de la muela que no se da en ninguno de los bloques de ensayos (ver zona azul del estado de la muela correspondiente a 20 repeticiones en la Figura 8.27).

Por otro lado, el Grano 2 mantiene su tamaño con pequeñas variaciones durante las repeticiones. El cambio más destacable es una reducción del 12% en el mismo intervalo de repeticiones que el desprendimiento del Grano 1.

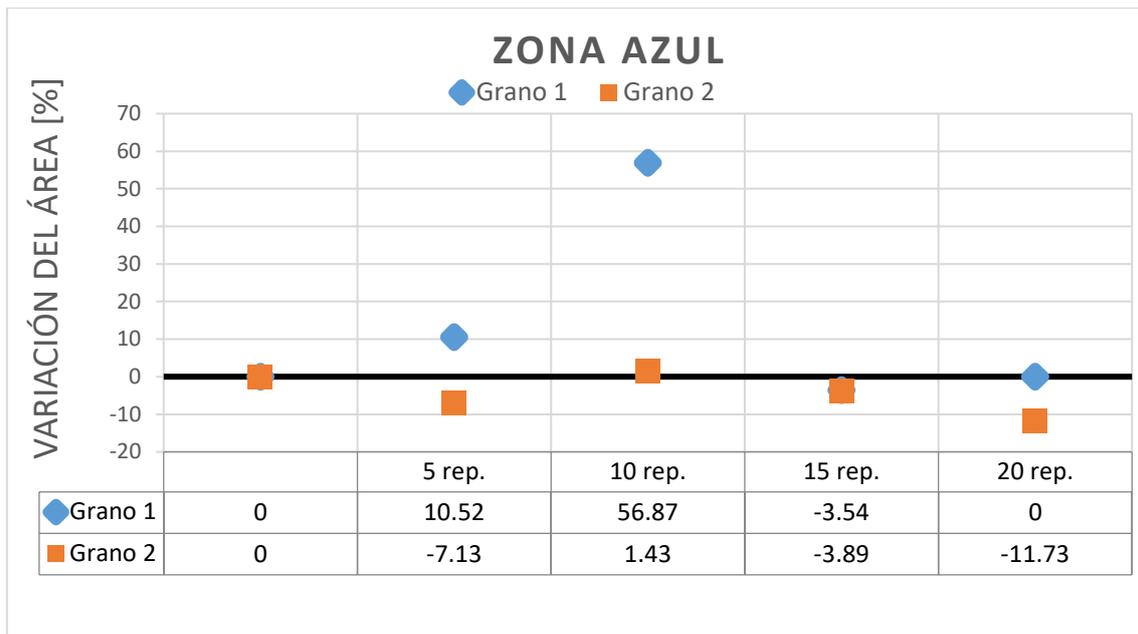


Figura 8.29: Evolución de los granos de la zona azul (Tantalio – DIACUT)

Para el estudio de la zona amarilla se analiza la Figura 8.30. Esta zona contiene un solo grano denominado Grano 3. Este grano apenas sufre variaciones de tamaño durante las repeticiones. La más destacable es un aumento del 21% en el último intervalo de 15-20 repeticiones.

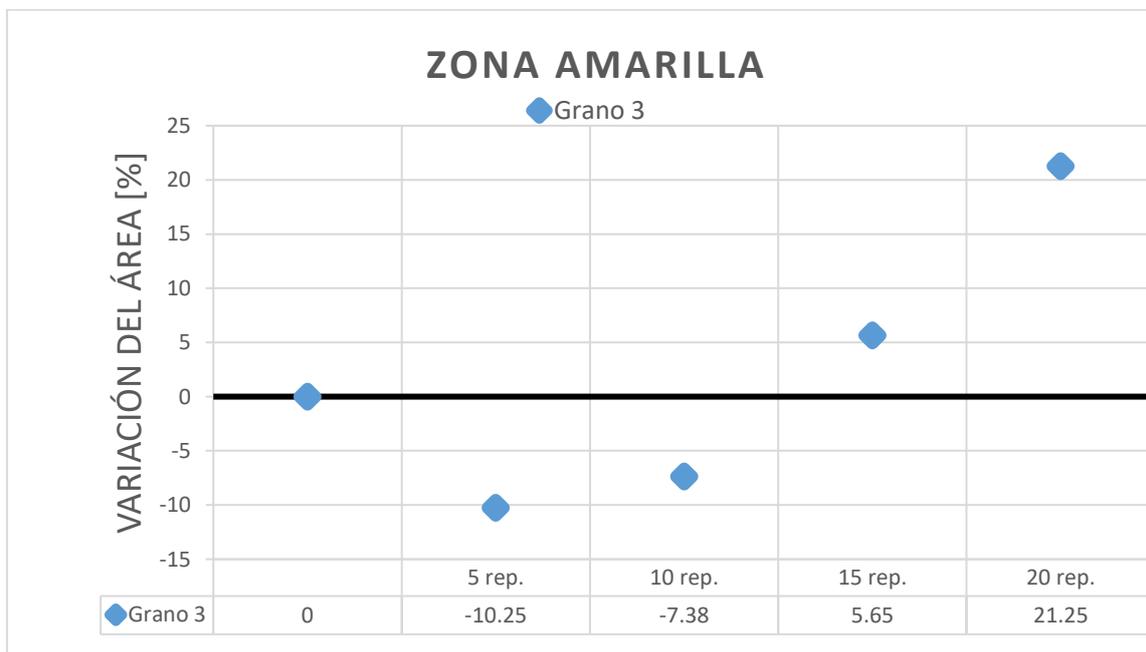


Figura 8.30: Evolución de los granos de la zona amarilla (Tantalio – DIACUT)

Para finalizar con el estudio de los granos, se analiza la zona verde. En la Figura 8.31 se puede ver la evolución de los dos granos que forman la zona verde. Por un lado, el Grano 4 después una reducción del 24% comienza un continuo aumento del 17%, 33% y 18% progresivamente. No se aprecian fracturas.

Por otro lado, respecto al Grano 5, mantiene el tamaño durante el proceso. La variación máxima es del 6%.

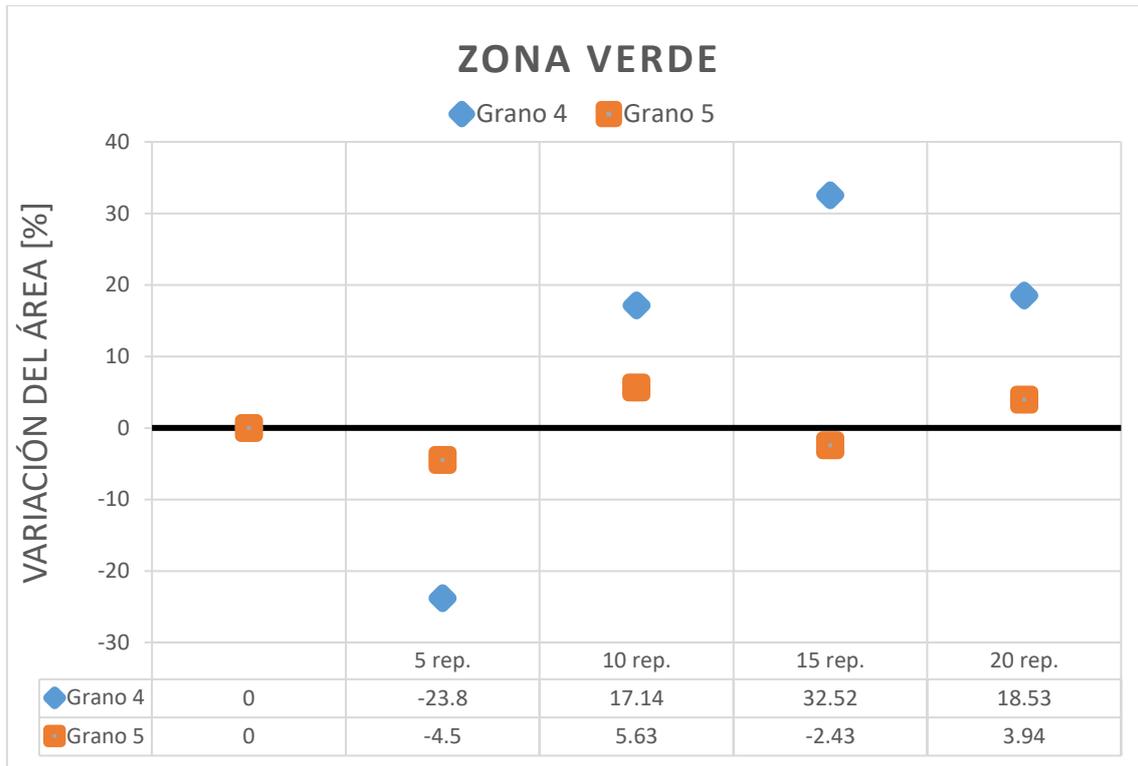


Figura 8.31: Evolución de los granos de la zona verde (Tantalio – DIACUT)

En este caso se detectan menor número de desprendimientos de granos y a diferencia con los procesos anteriores, se da después de un aumento de tamaño. Por lo general, los granos varían en menor medida su tamaño durante las pasadas y se detectan menos fracturas de granos.

Por último, como se puede ver en el apartado II.3.5. *Análisis de la geometría*, se mejora la desviación en la arista de incidencia un 48,62%. Sin embargo, la desviación continúa siendo del 8,73%. Respecto a la otra arista, se mejora la desviación un 22%. La desviación resultante es del 1,08%. En la siguiente figura se grafican los resultados.

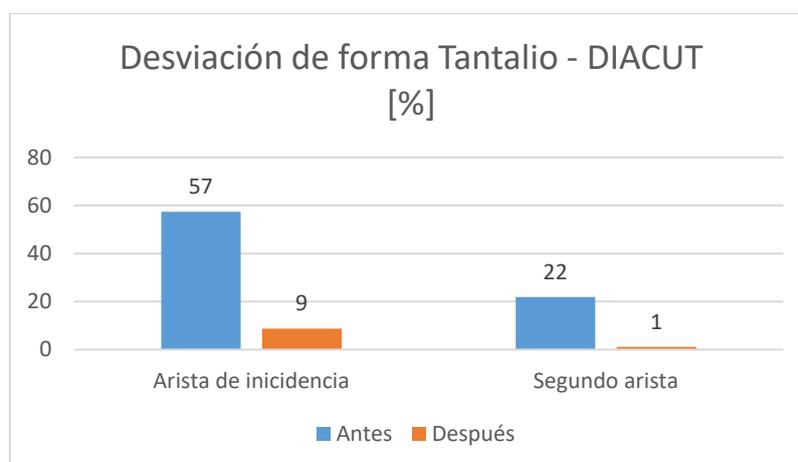


Figura 8.32: Desviación de forma Tantalio - DIACUT

En el gráfico se muestra la desviación de forma en porcentaje respecto al valor nominal de 90° ya que se trata de una muela recta. Para los valores angulares ver Tabla 8.4.

Tabla 8.4: Desviación de forma angular Tantalio - DIACUT

Desviación de forma Tantalio - DIACUT [°]			
	Antes	Después	Dif.
<b>Arista de incidencia</b>	141,62	97,86	-43,76
<b>Segunda arista</b>	109,65	90,98	-11,79

## 8.5. Bloque de ensayos SiC H – 2°

En este apartado se analizan gráficamente los resultados obtenidos en el anexo II.4. *Bloque de ensayos SiC H – 2°*. En la Figura 8.33 se pueden ver los estados evaluados de la muela, así como las zonas que contienen a los granos que se estudian.

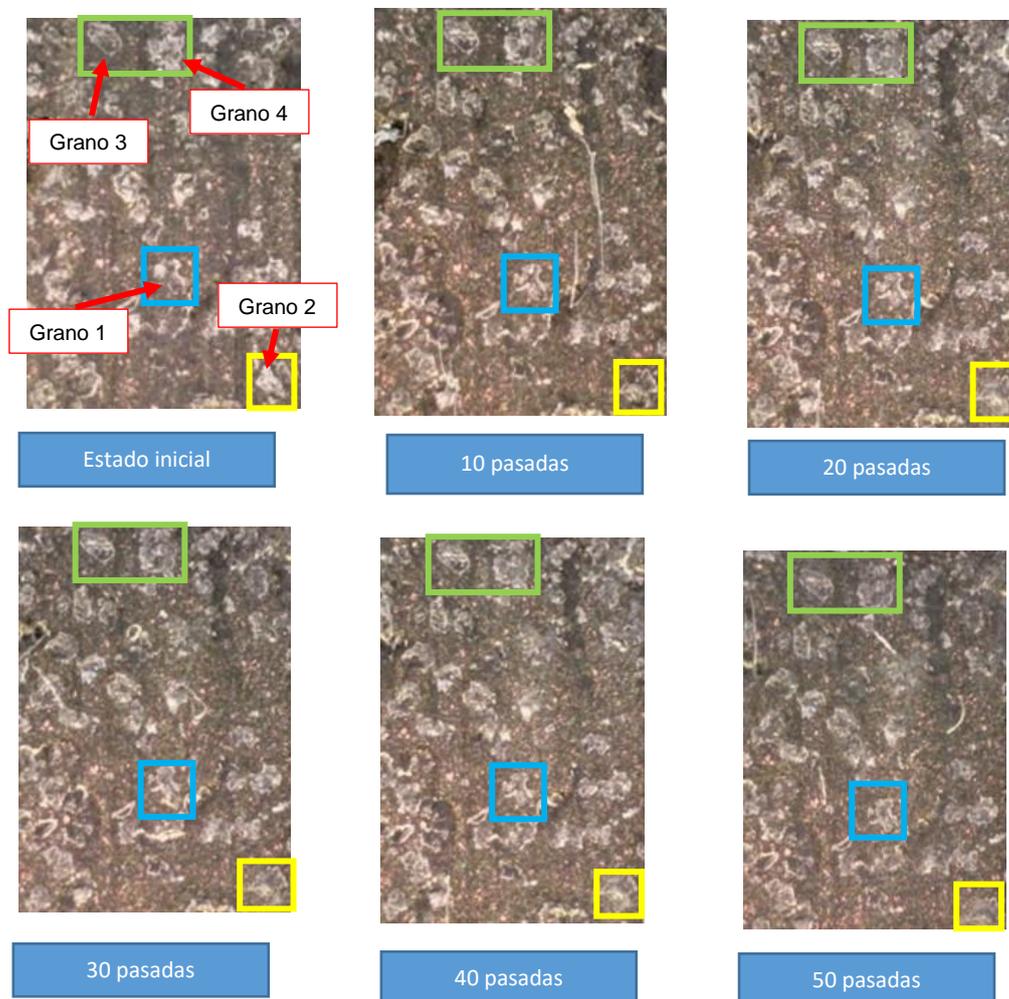


Figura 8.33: Estados de muela SiC H - 2°

Los granos a los que se les realiza el seguimiento vienen marcados en la figura y se distribuyen en tres zonas concretas.

- **Zona Azul:**
  - Grano 1
- **Zona Amarilla:**
  - Grano 2
- **Zona Verde:**
  - Grano 3
  - Grano 4

En la Figura 8.34 se muestra el porcentaje de granos del sector correspondiente a cada uno de los estados de muela evaluados. Se puede ver una ligera tendencia a aumentar la concentración con las pasadas, pero la variación de la concentración de granos es menor que en otros bloques de ensayos. Es posible que la incidencia en la superficie haya sido menor, para conocer el tipo de incidencia se estudian los granos seleccionados dentro de cada zona.

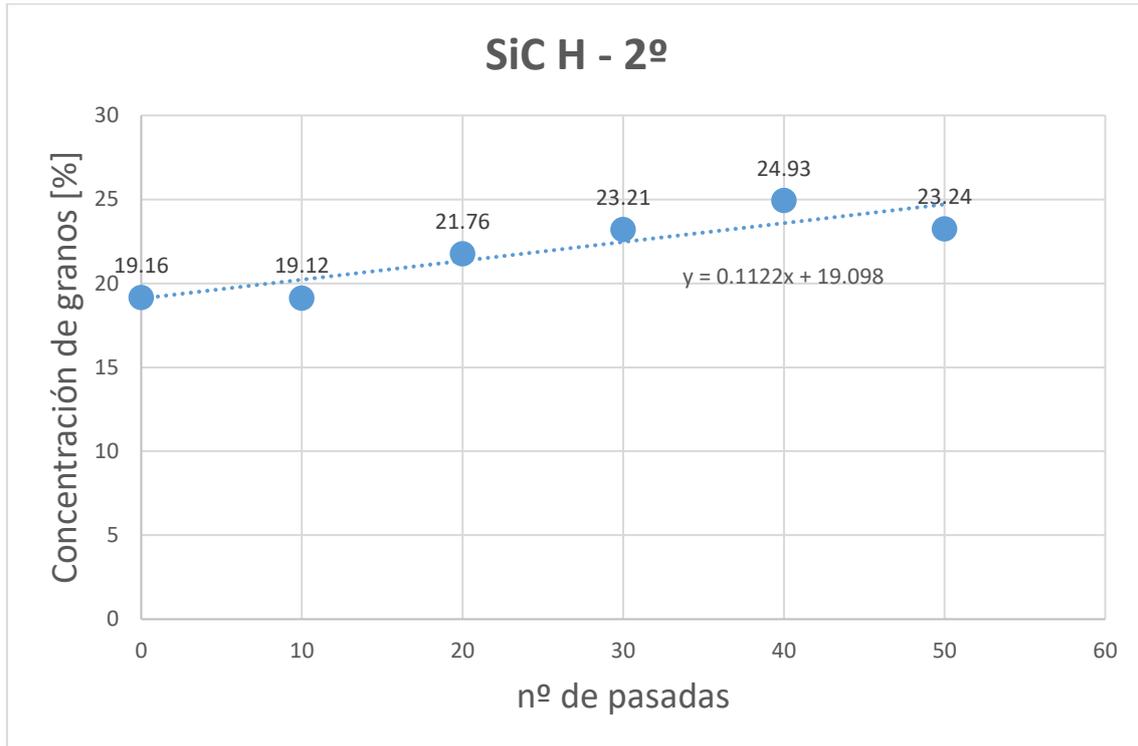


Figura 8.34: Concentración de granos SiC H - 2º

Se comienza con la zona azul. En esta zona al comienzo del bloque de ensayos contiene un solo grano denominado Grano 1. En la Figura 8.35 se puede ver la evolución del grano a lo largo de los ensayos. El grano como tónica general mantiene su tamaño durante las pasadas exceptuando dos aumentos del 12% y 18%.

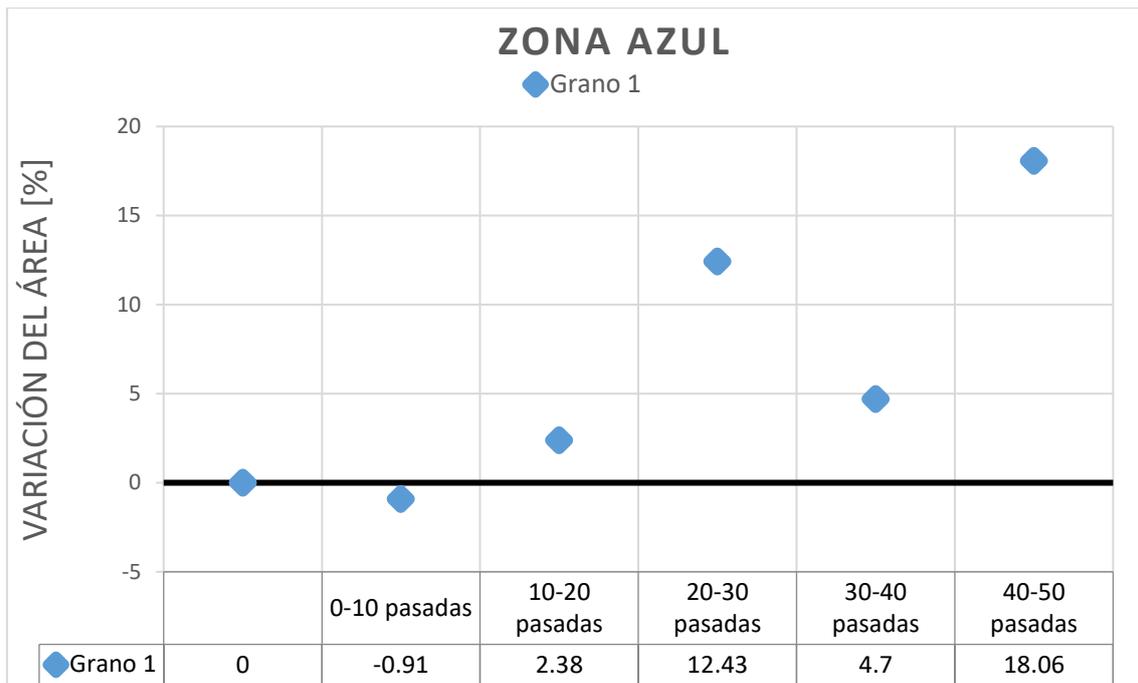


Figura 8.35: Evolución de los granos de la zona azul (SiC H - 2º)

Para el estudio de la zona amarilla se analiza la Figura 8.36. Esta zona contiene un solo grano conocido como Grano 2. El grano comienza reduciendo el tamaño un 16,6% en el intervalo de pasadas 0 – 10. Se puede ver como se ha fracturado en la parte superior izquierda. En el siguiente intervalo aumenta un 12% y se seguido comienza con una reducción progresiva con reducciones del 14,5% y 12%. Durante el proceso se aprecia que algunas partículas de granos se fracturan, sin embargo, en general el grano apenas varía su tamaño.

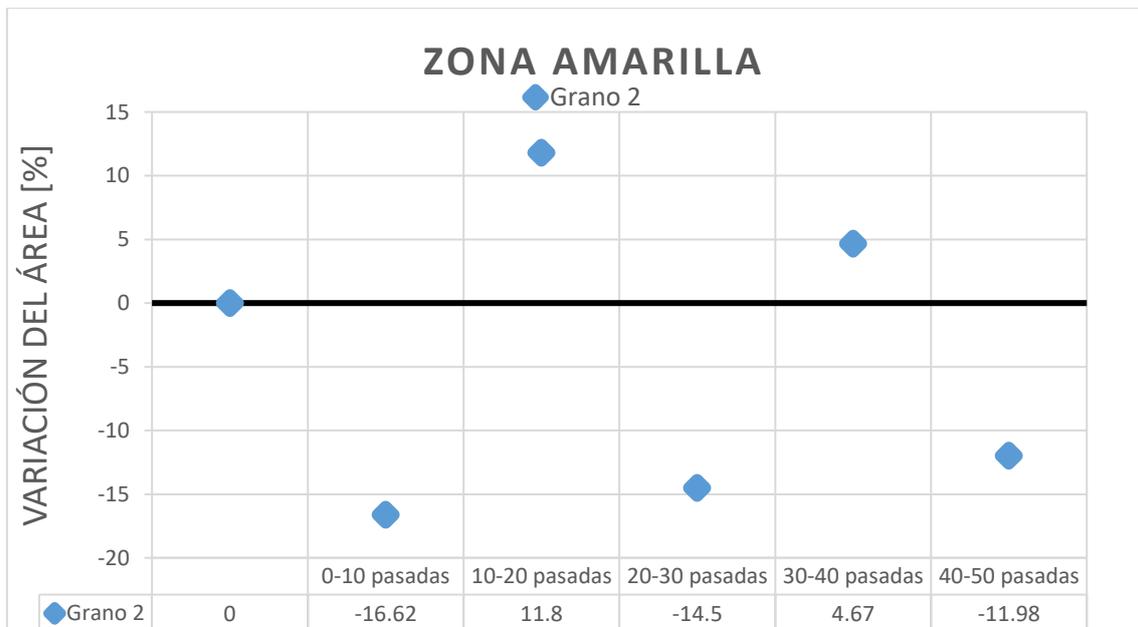


Figura 8.36: Evolución de los granos de la zona amarilla (SiC H - 2º)

Para finalizar con el análisis de los granos se estudia la zona verde. En la Figura 8.37 se puede ver la evolución de los dos granos dentro de esta zona. Se observa que ambos

granos tienen un comportamiento similar en todo el proceso, mantienen el tamaño durante todo el proceso con un pequeño aumento en el último intervalo. Para el grano izquierdo este aumento es del 11% y para el Derecho de 17%.

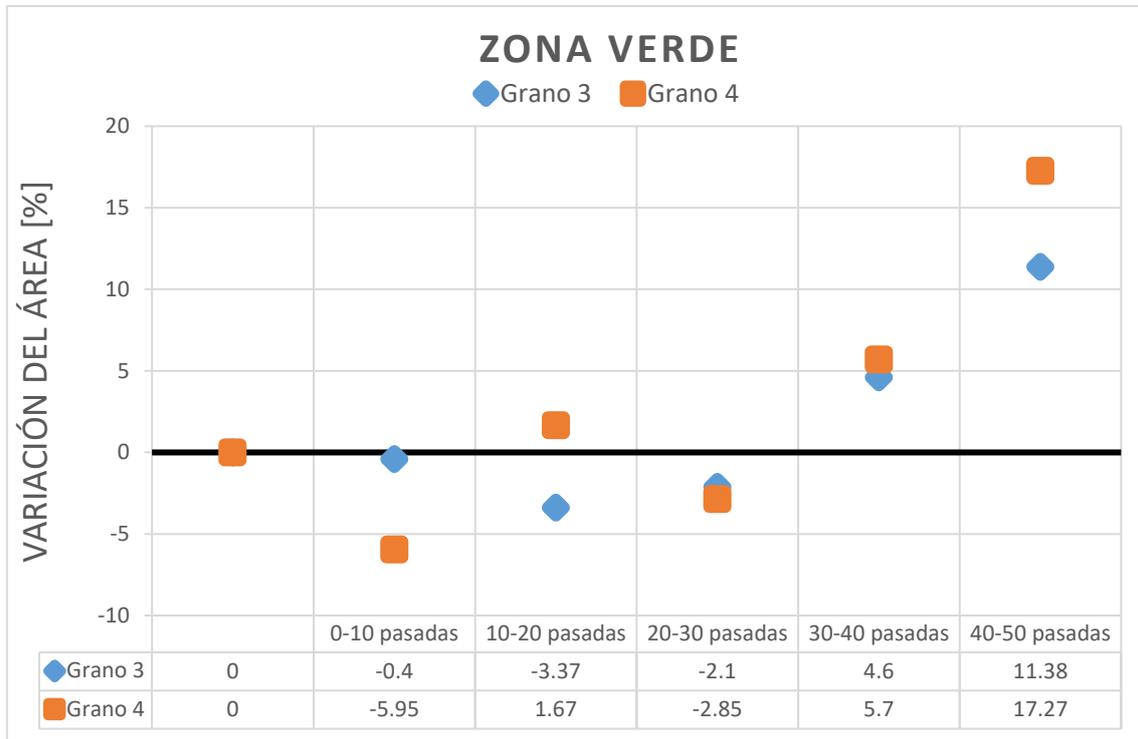


Figura 8.37: Evolución de los granos de la zona verde (SiC H - 2º)

En este caso no se detectan ningún desprendimiento de grano y la variación del tamaño de los granos es ligera. La incidencia del reperfilado ha sido leve.

Por último, como se puede ver en el anexo II.4.6. *Análisis de la geometría SiC H - 2º* se aumenta la desviación geométrica en la arista de incidencia un 48%. Además, la otra arista también sufre un aumento del 4% en la desviación de la forma. En la siguiente figura se muestra el gráfico.

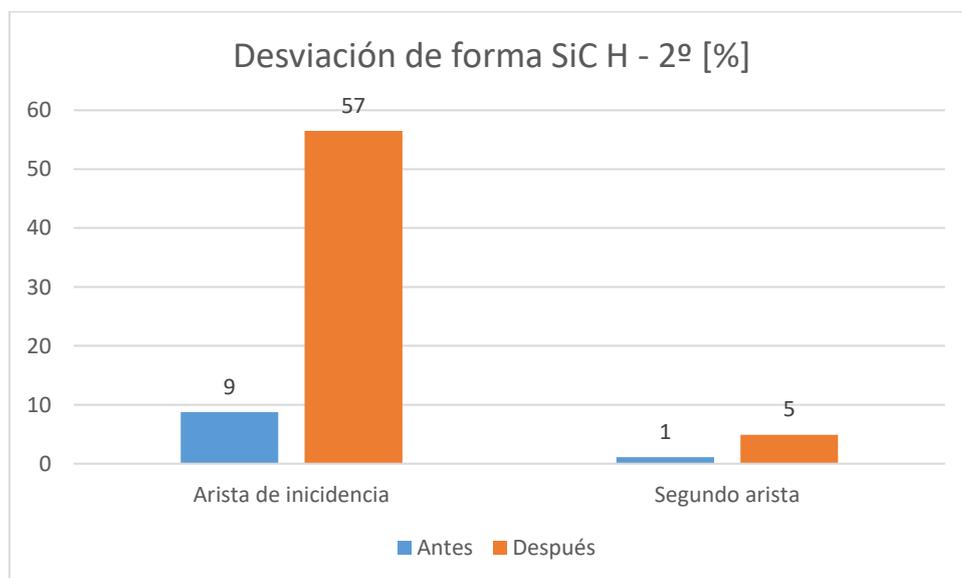


Figura 8.38: Desviación de forma SiC H - 2º

El gráfico muestra la desviación de forma en porcentaje respecto al valor nominal de  $90^\circ$  ya que se trata de una muela recta. Para los valores angulares reales ver Tabla 8.5.

Tabla 8.5: Desviación de forma angular SiC H -  $2^\circ$

Desviación de forma SiC H - $2^\circ$ [°]			
	Antes	Después	Dif.
<b>Arista de incidencia</b>	97,86	140,86	43
<b>Segunda arista</b>	90,98	94,42	3,44

## 8.6. Bloque de ensayos SiC J – $2^\circ$

En este apartado se analizan gráficamente los resultados obtenidos en el anexo II.5. *Bloque de ensayos SiC J –  $2^\circ$* . En la Figura 8.39 se pueden ver los estados evaluados de la muela, así como las zonas que contienen a los granos que se estudian.

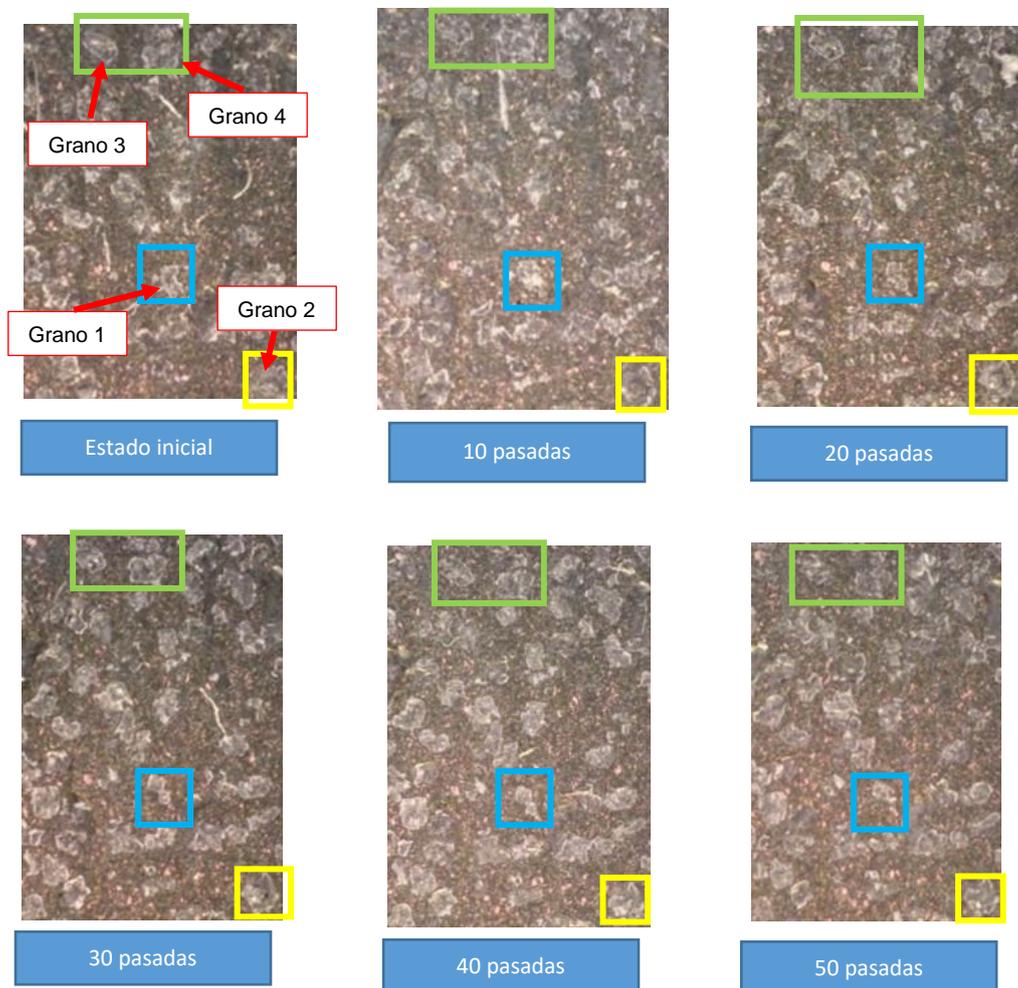


Figura 8.39: Estados de muela SiC J -  $2^\circ$

Los granos a los que se les realiza el seguimiento vienen marcados en la figura y se distribuyen en tres zonas concretas.

- **Zona Azul:**  
○ Grano 1
- **Zona Amarilla:**  
○ Grano 2
- **Zona Verde:**  
○ Grano 3  
○ Grano 4

En la Figura 8.40 se muestra el porcentaje de granos del sector correspondiente a cada uno de los estados de muela evaluados. En este caso se puede ver una tendencia a aumentar la concentración con las pasadas. Se entiende que el proceso ha tenido incidencia en la muela y se quiere conocer el tipo de incidencia. Para ello, se estudian los comportamientos de varios granos. Los granos que se analizan en este apartado coinciden directamente con los analizados en el bloque de ensayos SiC H – 2°.

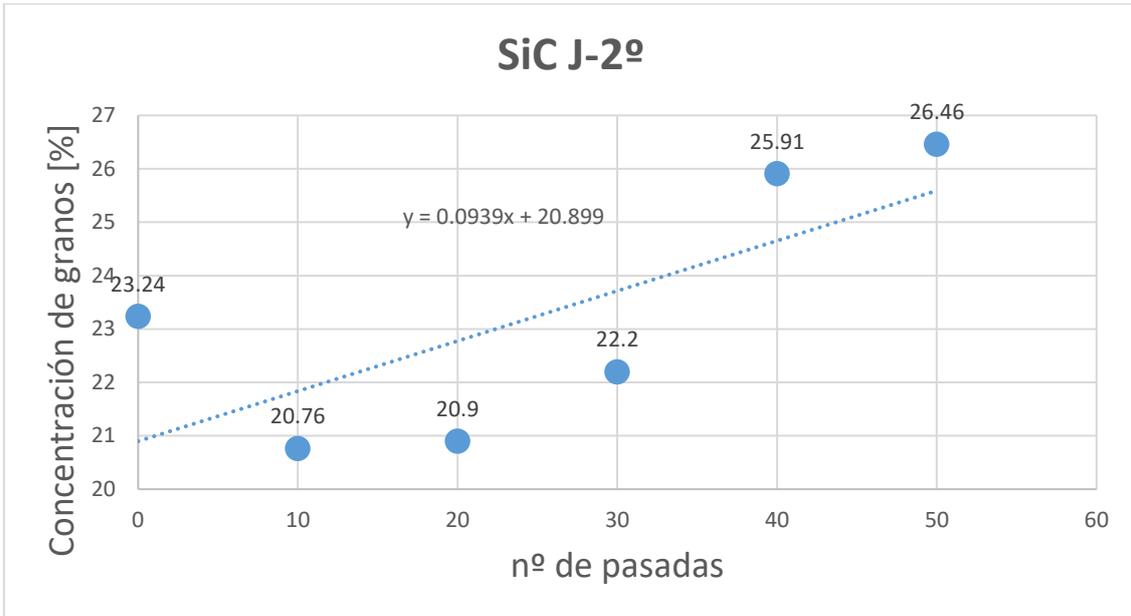


Figura 8.40: Concentración de granos SiC J - 2°

Se comienza con la zona azul. Esta contiene un solo grano conocido como Grano 1. En la Figura 8.41 se puede ver su comportamiento con las pasadas. La tónica general de este grano es el de reducir su tamaño durante las pasadas. Sufre reducciones del 34%, 23%, 14% y 21 con un ligero aumento intercalado del 8%. Se aprecia como en las reducciones el grano se va fracturando.

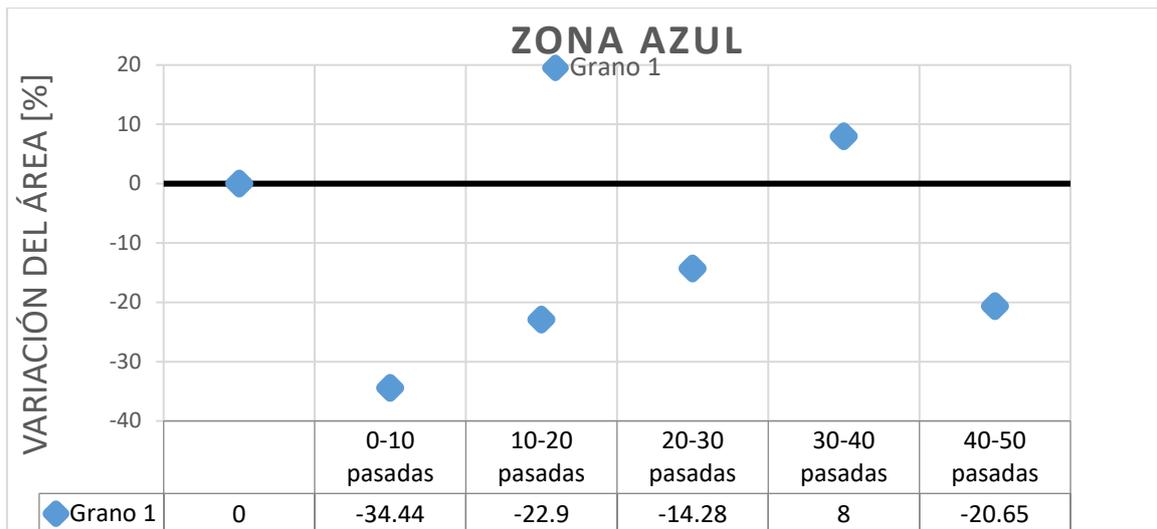


Figura 8.41: Evolución de los granos de la zona azul (SiC J - 2º)

Para el estudio de la zona amarilla se analiza la Figura 8.42. Esta zona contiene el grano denominado Grano 2. El grano apenas varía el tamaño con las pasadas. La variación más destacable es un ligero aumento del 14%.

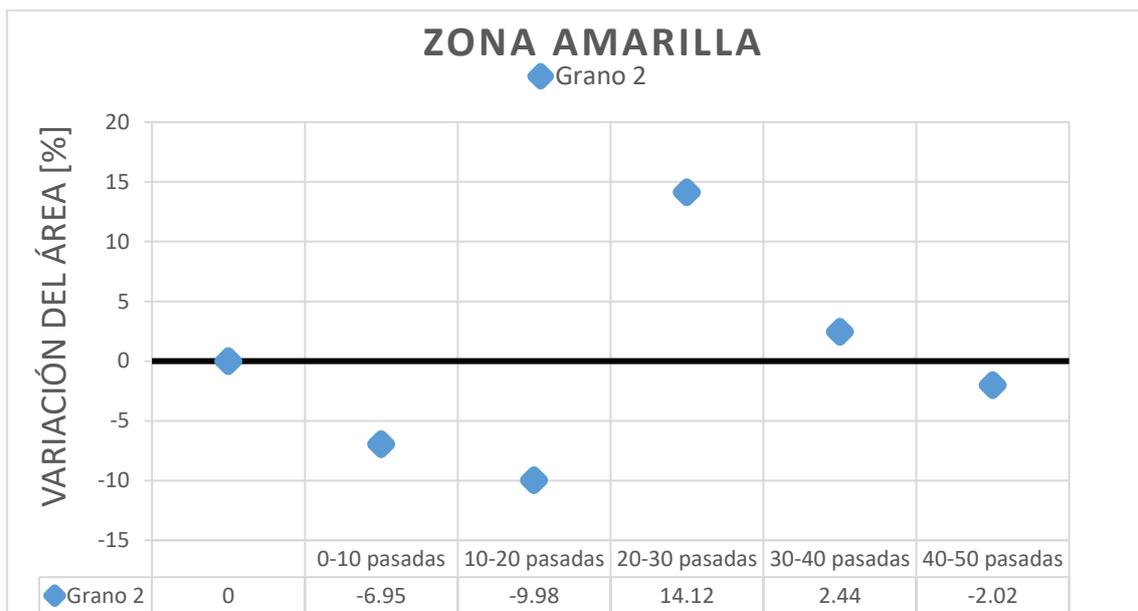


Figura 8.42: Evolución de los granos de la zona amarilla (SiC J - 2º)

Para finalizar con el análisis de los granos se estudia la zona verde. En la Figura 8.43 se puede ver la evolución de los dos granos de esta zona. Por un lado, el Grano 3 después de un aumento del 37% en el intervalo 10 – 20 mantiene su tamaño con las pasadas.

Por otro lado, el Grano 4 sufre una reducción del 20% en el intervalo 10 – 20 que en el siguiente intervalo recupera con un 22% de aumento. Sin embargo, a partir de ahí comienza a reducirse con reducciones del 14% y 12%.

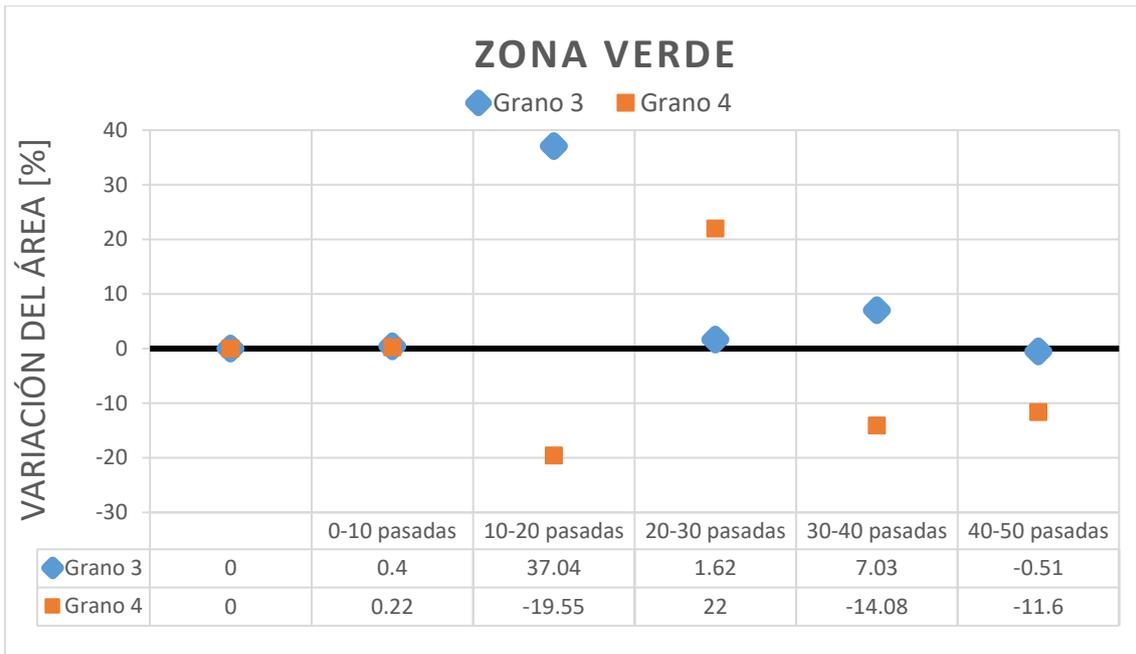


Figura 8.43: Evolución de los granos de la zona verde (SiC J - 2º)

En este caso no se detectan ningún desprendimiento de grano y la variación del tamaño de los granos no es muy notable.

Por último, como se puede ver en el anexo II.5.6. *Análisis de la geometría*, partiendo de una desviación del 57%, se aumenta hasta una del 64% en la arista de incidencia. En cuanto a la otra arista, se parte de una desviación del 5% y se aumenta hasta un 11%. En la siguiente figura se pueden ver los resultados de manera gráfica.

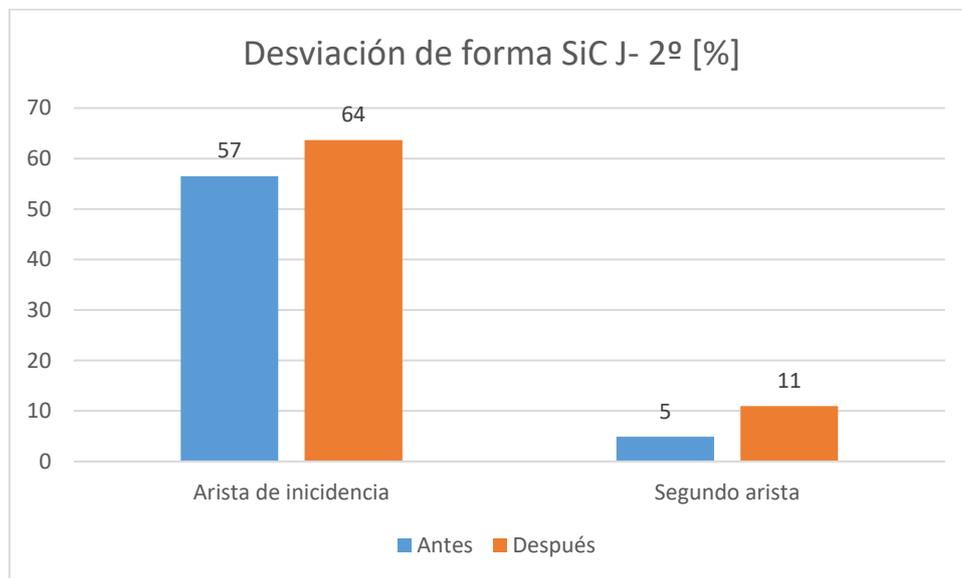


Figura 8.44: Desviación de forma SiC J - 2º

El gráfico muestra la desviación de forma en porcentaje respecto al valor nominal de 90º al tratarse de una muela recta. Para los valores angulares reales ver la Tabla 8.6.

Tabla 8.6: Desviación de forma angular SiC J - 2°

Desviación de forma SiC J - 2° [%]			
	Antes	Después	Dif.
<b>Arista de incidencia</b>	140,86	147,26	6,4
<b>Segundo arista</b>	94,42	99,87	5,45

## 8.7. Comparativa entre los distintos reperfilados

En los apartados anteriores se analiza cada bloque de ensayos de manera independiente y sin relación con los demás bloques. En este apartado se comparan los resultados de los diferentes bloques entre sí.

### 8.7.1. Concentración de granos

A la hora de estudiar la variación de la concentración de granos es necesario conocer de qué estado o bloque de ensayos parte la muela abrasiva. De contrario, cada gráfico por separado no es capaz de aportar información de la tendencia que sigue la concentración de granos en el proceso particular. El bloque de ensayos anterior tiene influencia en el siguiente ya que marca el estado inicial del que parte la muela. Por esa razón se agrupan todos los gráficos de la variación de concentración de granos en uno mismo. El orden de los bloques de ensayos tiene influencia directa por lo que en el gráfico vienen marcados en el mismo orden que se realizan. Las líneas verticales de la Figura 8.45 marcan cuando termina o comienza un bloque de ensayos y en la parte inferior se puede ver dentro de un rectángulo el bloque al que corresponden los datos del gráfico.

Analizando el gráfico se puede observar como al comienzo la muela abrasiva de fábrica parte de un máximo en la concentración de granos del 30%. El primer bloque de ensayos es SiC H – 1° y se aprecia que la concentración de granos se reduce y se estabiliza sobre un 24%. A continuación, con las pasadas del bloque SiC J – 1° la concentración tiende a aumentar ligeramente incluso alcanzando el inicial 30%.

Los dos siguientes bloques emplean herramientas de Tantalio. Se aprecia una disminución continua desde el comienzo del bloque Tantalio – 1° hasta que se estabiliza el valor sobre un 15%. Con el bloque Tantalio – DIACUT se mantiene la concentración de granos con algún altibajo llegando incluso al 11%.

Entonces, los dos últimos bloques vuelven a emplear SiC como herramienta. En primer lugar, se aprecia como la concentración de granos vuelve a aumentar desde el comienzo de SiC H – 2° y se estabiliza en torno al 23%. Por último, con el bloque SiC J – 2° la concentración continua su aumento hasta el 26%.

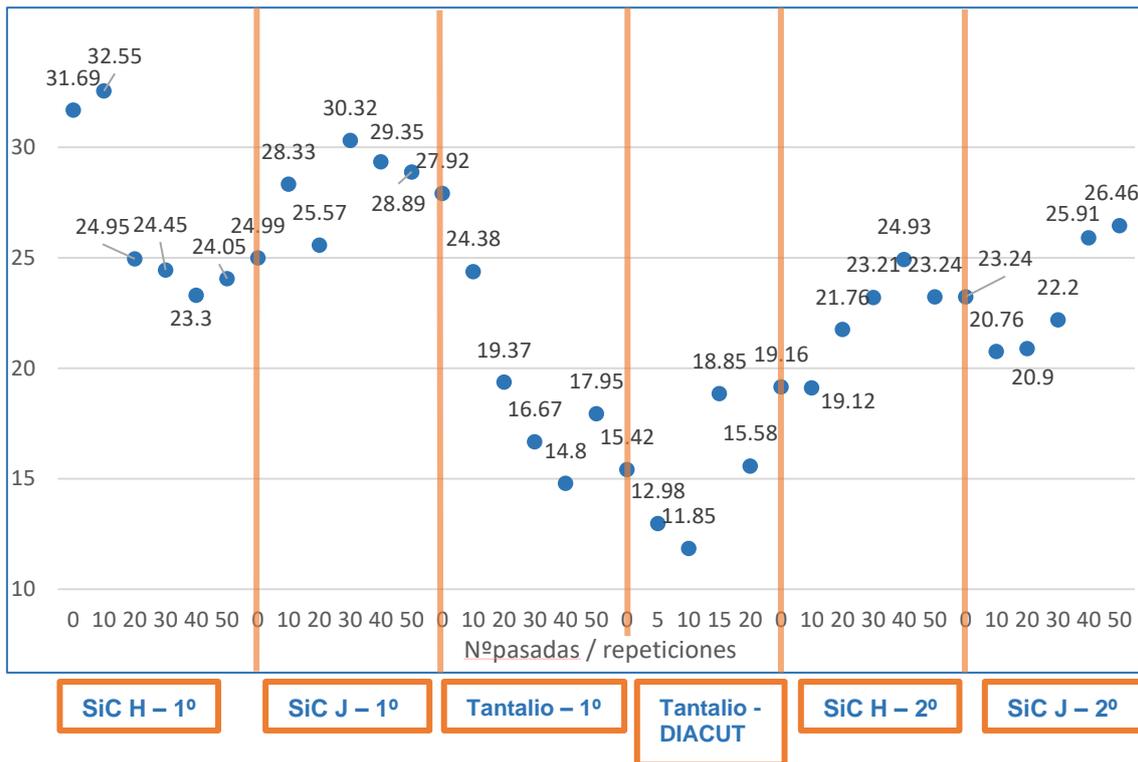


Figura 8.45: Evolución de la concentración de granos durante los bloques de ensayo

En conclusión, se entiende que el proceso con Carburo de Silicio estabiliza la concentración de granos en torno al 25%, mientras que el proceso con Tantalio en torno al 15%.

Concentraciones de granos más altas conllevan directamente a estructura de muelas más cerradas con menos espacio entre los granos que forma la superficie. De la misma manera, concentraciones más bajas conllevan a estructuras más abiertas. Por lo tanto, se ve como el SiC deja una estructura más cerrada en la muela mientras que el tantalio deja una estructura más abierta.

### 8.7.2. Estudio del comportamiento de los granos

En este apartado se analizan los datos obtenidos al estudiar las variaciones en el tamaño que sufren los granos a lo largo de los bloques de ensayos. En la Figura 8.46 se muestran los valores numéricos obtenidos de distintos parámetros analizados. Para mayor comprensión, a continuación, se detalla a que hace referencia cada uno de los gráficos:

- **Granos desprendidos:** Numero de granos desprendidos en el sector durante todas las pasadas del bloque de ensayos correspondiente.
- **Variación media de grano / intervalo:** Independientemente si se trata de un aumento o una reducción, cuantifica la media de lo que varía el tamaño de un grano por cada intervalo de pasadas. Recordando, en cada intervalo de pasadas se consume 1 mm de herramienta en todos los bloques exceptuando Tantalio – DIACUT que se consume 3,3 mm.
- **Reducción media:** Cada vez que un grano se reduce (fractura), la magnitud media de esta reducción.

Analizando la figura, se ve que los bloques de SiC con las primeras condiciones (SiC H – 1º y SiC J – 1º) tienen la mayor incidencia en los granos, causa las mayores variaciones en su tamaño con un 28% y 26%. Hasta el doble que los demás bloques de ensayos. Sumado a esto, cuando un grano se fractura lo hace en mayor magnitud (33% y 25%). Esto en relación con el apartado de la concentración de granos, donde se ve que en estos bloques es mayor y, por lo tanto, la fuerza del proceso se reparte entre mayor número de granos y aun así la incidencia es mayor. En relación con el número de granos desprendidos, junto con el bloque Tantalio – 1º son los bloques en los que más granos se han desprendido con un total de 8 y 7 granos, lo cual refuerza que sean los bloques con la mayor incidencia en los granos.

En cuanto a los bloques con herramienta de tantalio (Tantalio – 1º y Tantalio – DIACUT), tienen menor efecto en los granos que los bloques anteriores, causan menores variaciones medias en su tamaño con un 12% y 13%. De la misma manera, cuando se fracturan los granos, lo hacen en menor magnitud (15% y 8%). Como se comenta anteriormente, en el bloque Tantalio – 1º se han detectado 7 granos, mientras que en el bloque Tantalio – DIACUT solamente 2.

Por último, respecto a los bloques de SiC con las segundas condiciones se aprecia en los tres aspectos analizados que son los bloques con menor incidencia en los granos. Además, son los bloques en los que menos desprendimientos se detectan.

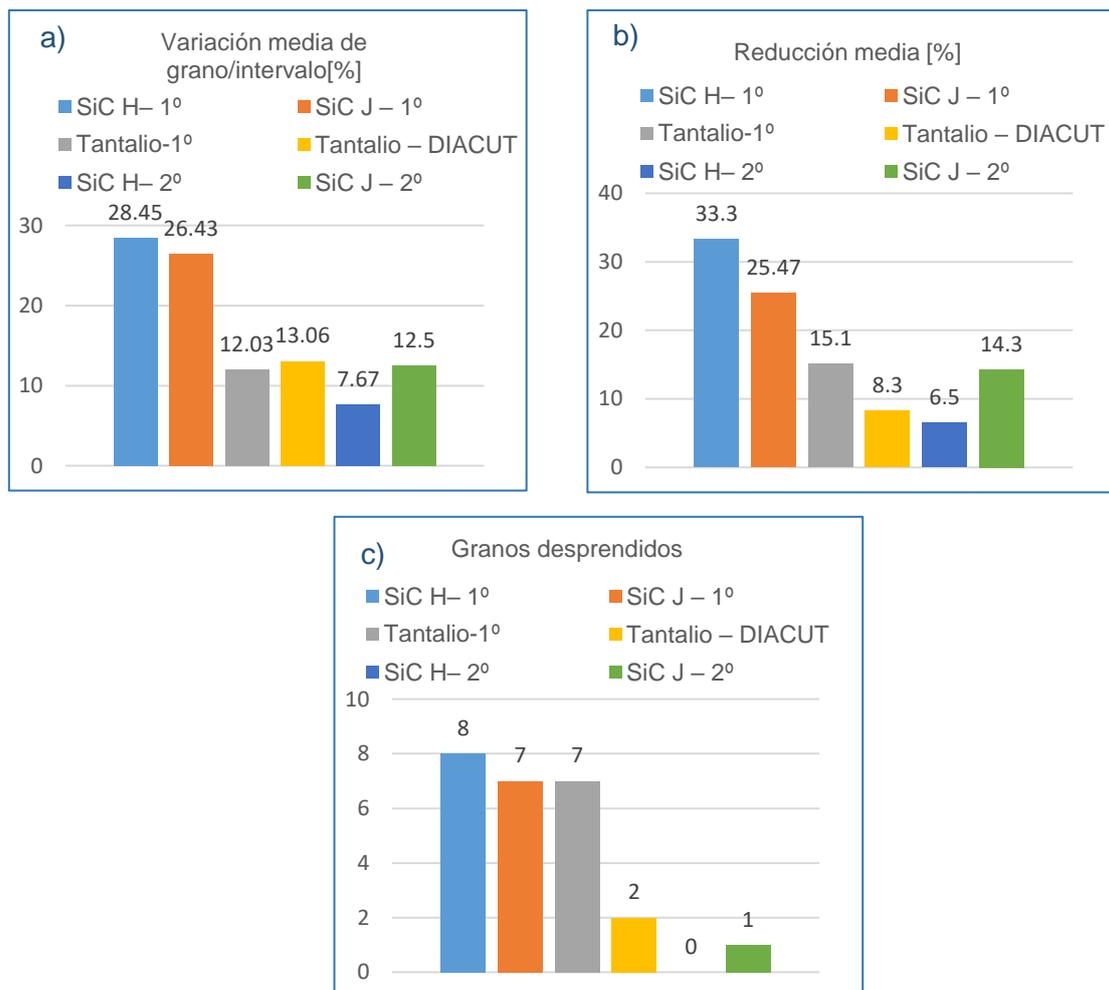


Figura 8.46: a) Variación media de grano / intervalo. b) Reducción media. c) Granos desprendidos

### 8.7.3. Evaluación de la geometría

En este apartado se agrupan los datos relacionados con el estado del perfil de la muela de los diferentes bloques de ensayos. En las Tabla 8.7 y Tabla 8.8 se puede ver la desviación del perfil de la muela respecto al valor nominal, que al tratarse de una muela recta es de 90°. Se muestran para las dos aristas de la muela el valor previo al bloque y el posterior, así como la diferencia. Ambas tablas muestran lo mismo, pero en diferentes magnitudes. La Tabla 8.7 muestra los valores en porcentaje, mientras que Tabla 8.8 lo hace en valores angulares reales.

Tabla 8.7: Comparativa de las desviaciones geométricas en valores de porcentaje

Desviación de forma [%]						
	Arista de incidencia			Segunda arista		
	Antes	Después	Dif.	Antes	Después	Dif.
SiC H – 1°	0	11	11	0	2	2
SiC J – 1°	11	46	35	2	2	4
Tantalio – 1°	96	57	-39	2	22	20
Tantalio – DIACUT	57	9	-48	22	1	-21
SiC H – 2°	9	57	48	1	5	4
SiC J – 2°	57	64	7	5	11	6

Tabla 8.8: Comparativa de las desviaciones geométricas en valores angulares

Desviación de forma [°]						
	Arista de incidencia			Segunda arista		
	Antes	Después	Dif.	Antes	Después	Dif.
SiC H – 1°	90	100,3	10,3	90	91,9	1,9
SiC J – 1°	100,3	131,58	31,28	91,9	93,46	1,56
Tantalio – 1°	176,26	141,62	-34,64	92,14	109,65	17,51
Tantalio – DIACUT	141,62	97,86	-43,76	109,65	90,98	-11,79
SiC H – 2°	97,86	140,86	43	90,98	94,42	3,44
SiC J – 2°	140,86	147,26	6,4	94,42	99,87	5,45

Analizando los valores, se aprecia que todos los bloques que emplean SiC como material de herramienta conllevan a un aumento de la desviación geométrica. Dentro de estos bloques se ve que las herramientas de dureza J aumentan en mayor medida la desviación. Al mismo tiempo, las segundas condiciones de reperfilado son las que mayor desviación han generado.

Por el contrario, los bloques que emplean tantalio como herramienta disminuyen la desviación del perfil. Entre ambos bloques el que mejor resultado da es Tantalio – DIACUT, que consigue mejorar ambas aristas. Sin embargo, la desviación se aprecia que no llega definitivamente a su valor nominal, pero al apreciarse siempre tendencia a reducirse, es probable que continuando con el proceso se llegue a desviación 0. Esto se debe a que la muela parte de un estado geométrico muy afectado por los bloques anteriores.

## 9. Conclusiones y líneas futuras

En este apartado se detallan las conclusiones a las que se ha llegado una vez analizados todos los resultados, teniendo en cuenta los objetivos marcados al comienzo del trabajo. Además, se trata de orientar los siguientes pasos que podrían llevarse a cabo en futuros estudios.

### ➤ **Mecanismo de arranque y fases en la vida de un grano en la superficie de la muela durante las pasadas de reperfilado**

En primer lugar, analizando el comportamiento de los granos que acaban desprendiéndose de la superficie se diferencian dos tendencias:

- Salto de la superficie después de continuos aumentos del tamaño del grano.
- Desprendimiento de la superficie después de haber sufrido varias reducciones en el tamaño durante su vida en la superficie de la muela.

La primera tendencia se relaciona con eliminar el aglomerante que rodea el grano abrasivo hasta que el volumen sumergido en la muela no sea capaz de sostener el grano, causando que este salte de la superficie. En este caso se entiende que proceso no es capaz de incidir en los granos, solamente en el aglomerante. De esta manera en el método de evaluación de superficie empleado se aprecia el grano abrasivo siempre en su tamaño máximo y nunca reduciéndose. No es un mecanismo de arranque interesante cuando se busca generar una capa abrasiva renovada con filos de corte nuevos (objetivo del reperfilado paso 1).

La segunda tendencia está asociada a eliminar tanto aglomerante como partículas de los granos abrasivos. En este caso, en el método de evaluación de superficie se aprecia el grano con diferentes tamaños, tanto aumentándose como reducciones durante las pasadas de reperfilado. El mecanismo de arranque de esta manera se denomina fractura de grano, ya que el grano se fractura y varía el tamaño durante las pasadas hasta que se desprende de la superficie. Se entiende que el grano consigue fracturarse, de lo contrario, se observaría continuamente la parte de mayor tamaño del grano tapando las zonas más estrechas. Es un mecanismo de arranque interesante con el que evitar granos planos y conseguir renovar la capa abrasiva.

Estudiando los diferentes granos que se han desprendido durante el trabajo, que recordando han sido en los bloques de SiC con las primeras condiciones y en el bloque Tantalio – 1º, se definen tres fases en la vida de un grano en la superficie de la muela durante las pasadas de reperfilado. En la Figura 9.1 se gráfica la tendencia del tamaño de grano en función de las pasadas de reperfilado para los bloques mencionados. En la fase 1 el grano comienza a aparecer en la superficie de la muela y aumenta de manera notable con las pasadas. Seguido, una vez alcanza el tamaño óptimo para su función lo mantiene durante las pasadas con pequeñas variaciones tanto de aumento como de fractura. Por último, el grano alcanza la fase 3 donde comienza a reducirse considerablemente hasta que se finalmente se desprende de la superficie. Por lo tanto,

en los bloques de ensayos mencionados, se entiende que el proceso de capaz de arrancar tanto aglomerante como partículas de diamante, dando lugar a un mecanismo de arranque por fractura de grano.

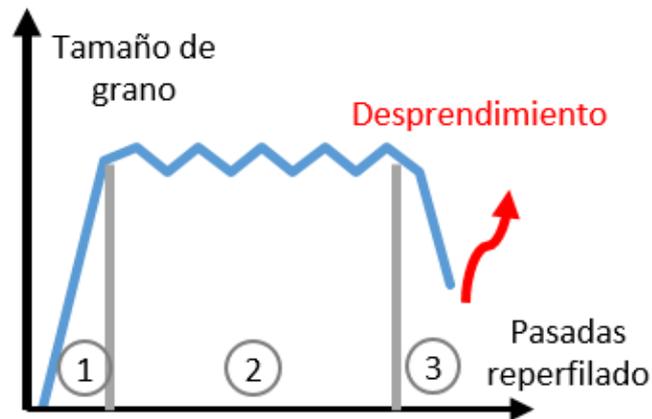


Figura 9.1: Fases de un grano durante las pasadas de reperfilado

➤ **Influencia del material de la herramienta y las condiciones en el proceso**

Analizando al mismo tiempo los resultados tratados en el apartado 8.7. *Comparativa entre los distintos reperfilados* se rellena la Tabla 9.1 con los aspectos de mayor importancia. En la tabla no se incluyen los bloques de SiC y las segundas condiciones ya que se entiende que quedan solapados por los bloques de SiC y las primeras condiciones al haber presentado resultados más destacables en todos los puntos. Por lo tanto, los bloques SiC H – 2º y SiC J – 2º no han obtenido resultados destacables en la incidencia en la superficie y empeora la desviación del perfil de la muela.

De la misma manera los bloques de SiC H – 1º y SiC J – 1º se agrupan en una misma columna al presentar resultados razonablemente parecidos. Por lo tanto, en este caso la dureza de la herramienta no ha tenido influencia notable. Algo similar ocurre con las condiciones en los bloques que emplean tantalio como material de herramienta. Ambos presentan resultados parecidos exceptuando el número de granos desprendidos que Tantalio – DIACUT presenta un menor número.

Tabla 9.1: Comparativa entre materiales de herramienta

SiC – 1º	Tantalio
Estructura cerrada	Estructura abierta
Mayor incidencia en los granos – mayor variación del tamaño de los granos	Menor incidencia en los granos - menor variación del tamaño de los granos
Fracturas de mayor magnitud	Fracturas de menor magnitud
Mayor número granos desprendidos	<u>Tantalio – 1º</u> : saltos de grano a nivel de SiC <u>Tantalio – DIACUT</u> : Menor número de granos desprendidos
Aumenta la desviación de forma	Disminuye la desviación de forma

Atendiendo a la tabla, se ve como el tantalio deja una estructura de la muela más abierta, con mayor distancia entre granos. Entonces hay más espacio para la formación de viruta (aumenta la capacidad de arranque) y mayor facilidad para la entrada del fluido [3]. Por otro lado, el Carburo de Silicio ha tenido mayor incidencia en los granos, causando una mayor variación del tamaño de estos por cada intervalo de pasadas. Además, las fracturas de los granos han sido de mayor magnitud, lo que puede ayudar a evitar granos planos y renovar la capa abrasiva de la muela creando filos de corte nuevos.

En cuanto a los desprendimientos de grano, el SiC – 1º y Tantalio – 1º han tenido un número similar (8 y 7 granos) mientras que el Tantalio – DIACUT un número menor (2).

Por último, respecto a la desviación de forma, los bloques de SiC – 1º aumenta la desviación mientras que los bloques con tantalio tienden a acercarla a su valor nominal.

En conclusión, recordando las definiciones de las fases del proceso realizadas en el apartado 6.1.1. *Descripción de fases y metodología* recogidas en la Figura 9.2 se discute lo siguiente:

- Los bloques de SiC – 1º han tenido un efecto de reperfilado paso 1
- Los bloques con Tantalio tienen un efecto relacionado con el reperfilado paso 2 y el reavivado

Por lo que una combinación de ambos podría resultar en un proceso de diamantado completo.

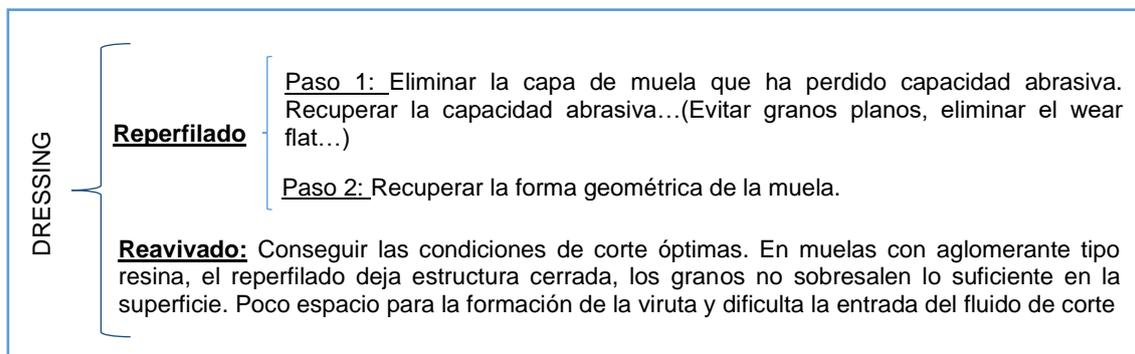


Figura 9.2: Fases del proceso de un diamantado completo de muelas de diamante con aglomerante de resina

### ➤ Método de evaluación del estado general de la muela y la metodología del estudio

Se demuestra que el método de evaluación del estado general de la muela es capaz de generar suficientes datos tanto de la superficie de la muela como de la geometría para poder analizar el proceso de manera razonable. Además, la metodología propuesta al comienzo del trabajo ha resultado adecuada para estudiar los diferentes procesos. La versatilidad de la herramienta desarrollada en el trabajo hace que sea aplicable para la evaluación muelas abrasivas de diferente naturaleza con distintos tipos de granos abrasivos y aglomerante. Además, su aplicación es totalmente ampliable a otras superficies abrasivas como pueden ser moletas de diamantado, diamantadores estáticos tipo loseta e incluso para lijas.

Por esta razón, tanto la metodología como el método de evaluación son perfectamente aplicables en futuros trabajos que quieran evaluar las superficies abrasivas mencionadas.

➤ **Líneas futuras**

Por último, se comentan brevemente varios pasos futuros posibles. Uno de ellos podría ser estudiar en mayor profundidad la fase 2 de reavivado. Para ello, emplear un bloque de corindón blanco tal y como se recomienda en varios trabajos orientados en este proceso [3]. Otro de los pasos posibles sería si el dispositivo de diamantado lo permite, pasar a condiciones de reperfilado más agresivas con el objetivo de ver si se aumenta la incidencia en la muela en menor tiempo de ensayos.

Para ambos pasos, el método de evaluación desarrollado en este trabajo es perfectamente aplicable.

---

## 10. Bibliografía

- [1] F. Klocke, «Manufacturing Processes 2,» de *Chapter 6: Grinding*, Berlin, Springer Berlin Heilderberg, 2009, p. 1166.
- [2] L. Godino, A. Muñoz, I. Pombo y J. Alvarez, «On the Influence of Rotary Dresser Geometry on Wear Evolution and Grinding Process,» *Materials*, p. 3855, 2019.
- [3] A. Lefebvre, O. Sinot y A. Torrance, «Optimization of Dressing Conditions for Resin-Bonded Diamond Wheel by Topography Analysis,» *Machining Science and Technology*, vol. 12, nº 2, pp. 312-24, 2013.
- [4] I. Inasaki, «Dressing of resinoid bonded diamond grinding wheels,» *Annals of the CIRP-Manufacturing Technology*, nº 38, pp. 315-318, 1989.
- [5] J. Derkx, A. Hoogstrate, J. Saurwalt y B. Karpuschewski, «Form crush dressing of diamond grinding wheels,» *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, nº 57, pp. 349-52, 2008.
- [6] K. Wegener, E. Weingartner y M. Blaser, «In-process wire electrical discharge dressing (IWEDD) of metal bonded,» *Annals of the CIRP-Manufacturing tecnology*, vol. I, nº 62, pp. 339-342, 2013.
- [7] K. Wegener, W. Hoffmeister, B. Karpuschewski, F. Kuster, C. Hahmann y M. Rabiey, «Conditioning and monitoring of grinding wheels,» *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, nº 60, pp. 757-778, 2011.
- [8] Z. Yang, S. Zhang, Z. Zhang, Y. Zhang, J. Hu y K. Li, «Experimental research on laser-ultrasonic vibration synergic dressing of,» *Journal of Materials Processing Tech*, nº 269, pp. 182-189, 2019.
- [9] U. Shankar y N. Ramesh Babu, «A Model for Predicting the Geometry of Crater on Grinding Wheel,» *Procedia Manufacturing*, nº 26, pp. 509-520, 2018.
- [10] Z. Zhang, P. Yao, C. Huang, J. Wang, D. Xue, W. Deng y Z. Zhang, «Investigation and modeling of microgrooves generated on diamond grinding wheel by abrasive waterjet based on Box–Behnken,» *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, nº 100, pp. 321-332, 2019.
- [11] M. P. Hitchiner, I. D. Marinescu y E. Uhlmann, «Chapter 7-Dressing,» de *Handbook of Machining with Grinding Wheels*, 2006, pp. 127-165.
- [12] W. B. Rowe, «Chapter 3- Grinding Wheel Developments,» de *Principles of Modern Grinding Technology*, 2009, pp. 36-61.

- 
- [13] M. P. Hitchiner, I. D. Marinescu y E. Uhlmann, «Chapter 5- The Nature of the Abrasive,» de *Handbook of Machining with Grinding Wheels*, 2006, pp. 75-101.
- [14] M. P. Hitchiner, I. D. Marinescu y E. Uhlmann, «Chapter 6- Specification of the Bond,» de *Handbook of Machining with Grinding Wheels*, 2006, pp. 103-125.
- [15] R. Drazumeric, J. Badger, U. Klement y P. Kajnik, «Truing of diamond wheels - Geometry, kinematics and removal,» *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, nº 68, pp. 345-348, 2018.
- [16] B. Linke, «Dressing process model for vitrified bonded grinding wheels,» *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. I, nº 58, pp. 345-348, 2008.
- [17] W. B. Rowe, «Chapter 14 - Material Removal by Grains,» de *Principles of Modern Grinding Technology*, 2009, pp. 298-319.

# 11. Anexos

## ANEXO I: Introducción a los parámetros del diamantado

Este trabajo se desarrolla mediante diamantadores rotativos o moletas. En este documento anexo se describen los parámetros más influyentes que toman parte en el diamantado convencional con diamantadores rotativos. Dichos parámetros son los siguientes:

- Ratio de solapamiento  $U_d$
- Ratio de afilado  $\gamma_d$
- Profundidad de pasada  $a_{ed}$
- Ratio de velocidad del diamantado  $q_d$
- Ratio de diamantado  $G_d$

### 1.1. Ratio de solapamiento $U_d$

El ratio de solapamiento indica cada cuanto un punto de la superficie de la muela entra en contacto con la herramienta de diamantado. Analíticamente viene definido como la relación de la anchura de contacto  $a_{pd}$  entre el avance axial del diamantado por revolución de la muela  $f_{ad}$ .

$$U_d = \frac{a_{pd}}{f_{ad}} \quad [11.1]$$

Asimismo, dicho avance axial  $f_{ad}$  es la relación de la velocidad axial del diamantado  $V_{fa,D}$  entre el número de revoluciones por minuto de muela  $n_{sd}$  y sigue la siguiente expresión.

$$f_{ad} = \frac{V_{fa,D}}{n_{sd}} \quad [11.2]$$

Por otro lado, la anchura de contacto, se toma como la media entre el avance axial del diamantado y la anchura activa de la herramienta de diamantado  $b_d$ .

$$a_{pd} = \frac{f_{ad} + b_d}{2} \quad [11.3]$$

Para el caso de diamantadores rotativos, la anchura de contacto depende de la profundidad de pasada y del radio punta de la herramienta  $r_p$ .

$$b_d = \sqrt{8 \cdot r_p \cdot a_{ed}} \quad [11.4]$$

Una vez definido el parámetro se estudia la influencia del mismo. El ratio de solapamiento influye directamente en la superficie que se genera en la muela abrasiva

después del diamantado. Generalmente, se utilizan valores entre 2 y 20, donde los valores bajos se relacionan con operaciones de desbaste. En la Figura 11.1 se puede ver como un valor alto del ratio genera en la muela un superficie más fina con mayor número de filos de corte pero menos profundos. Esto conlleva a fuerzas mayores en el rectificando y un aumento en la energía específica del proceso. Sin embargo, la rugosidad en la pieza final es menor.

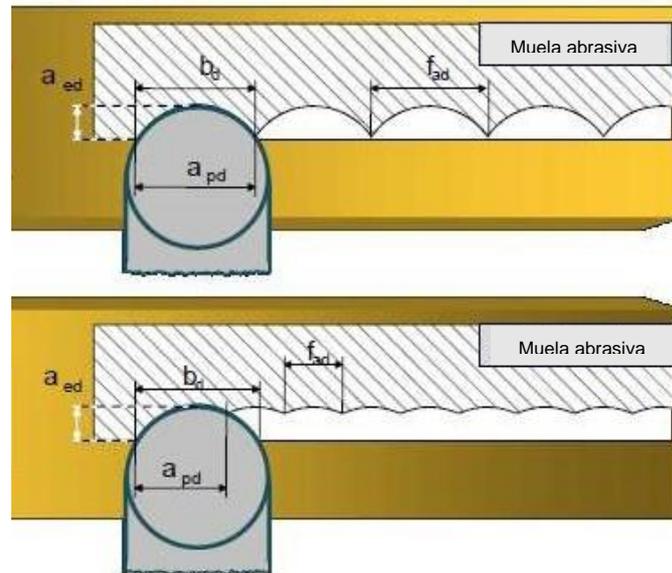


Figura 11.1: a) Ratio menor. b) Ratio mayor. Fuente: Comegui S.L

## 1.2. Ratio de afilado $\gamma_d$

Este parámetro al igual que el ratio de solapamiento  $U_d$  influye directamente en la superficie efectiva de la muela, concretamente a los filos de corte en la superficie. Es la relación de la profundidad de pasada en el diamantado entre la anchura de contacto efectiva de la herramienta. Análíticamente se expresa según [ 11.5 ] y sirve para estimar el filo de la herramienta.

$$\gamma_d = \frac{a_{ed}}{b_d} \quad [ 11.5 ]$$

Es un parámetro que tiene influencia en el rectificando ya que afecta a la superficie de la muela. Una herramienta más afilada, con un ratio mayor, deja una superficie más fina en la muela, es decir, deja más filos de corte activos que son menos profundos (ver Figura 11.2). Por la contra, el efecto es el opuesto.

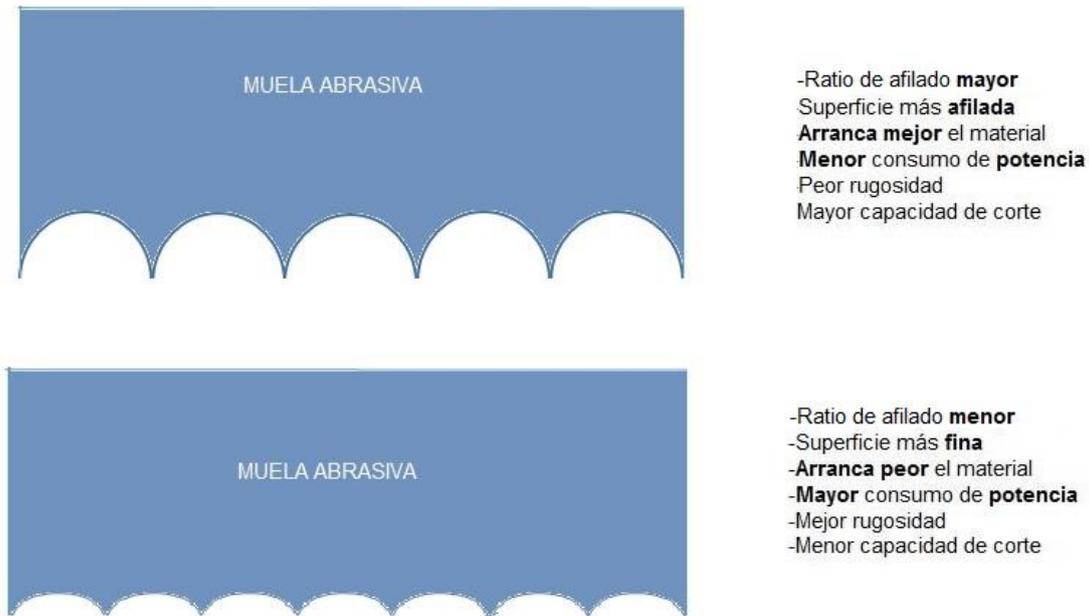


Figura 11.2: Influencia del ratio de afilado

Al mismo tiempo, existen factores que influyen en este parámetro como lo son el desgaste de la herramienta y la anchura de la misma. Por un lado, a medida que la herramienta va sufriendo desgaste, el ratio de afilado disminuye. Por otro lado, la anchura de la herramienta también influye en este parámetro ya que varía la anchura de contacto efectiva  $b_d$  entre diamante y herramienta.

### 1.3. Profundidad de pasada $a_{ed}$

Es un parámetro que afecta a la superficie de la muela e influye en el desgaste de la herramienta de diamantado. Reducir la profundidad de pasada conlleva a una topografía más suave en la muela. Asimismo, aumenta las fuerzas del rectificado y se reduce la capacidad de arranque. Sin embargo, cuanto menor sea la profundidad de pasada menor desgaste sufrirá la herramienta de diamantado.

En la industria, para el diamantado de muelas de superabrasivo se trabaja con pasadas de entre 1 y 6  $\mu\text{m}$ . No es recomendable superar el 10% del tamaño de grano medio de la muela abrasiva. En la Figura 11.1 se puede ver gráficamente la profundidad de pasada del diamantado  $a_{ed}$ .

### 1.4. Ratio de velocidades del diamantado $q_d$

Se trata de un parámetro exclusivo para el diamantado con herramientas rotativas. Relaciona la velocidad periférica de la herramienta de diamantado entre la de la muela abrasiva. Analíticamente se expresa:

$$q_d = \pm \frac{V_d}{V_s} \quad [11.6]$$

El valor positivo corresponde al diamantado uni-direccional, mientras que el negativo al diamantado contra-direccional. En la Figura 11.3 se representa gráficamente el parámetro.

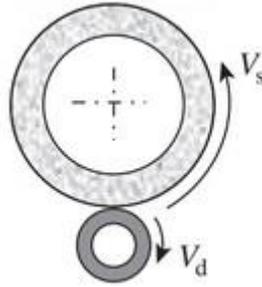


Figura 11.3: Ratio de velocidades del diamantado. Fuente: [12]

Para operaciones de rectificado de precisión con muelas convencionales, el valor del ratio de velocidad del diamantado adecuado esta entre -0,2 y -0,8. Para muelas de superabrasivo se recomiendan valores positivos. Un valor del ratio de 1, significa que ambas velocidades son iguales. Se trata de un proceso destructivo y la rugosidad de la superficie de la muela obtenida será alta, al igual que las fuerzas. Para una rugosidad y fuerzas menores, el ratio debe reducirse.

### 1.5. Ratio de diamantado $G_d$

Se trata de un parámetro que aporta información sobre la eficiencia del diamantado. No es una variable que se elija previo al proceso, ya que relaciona el volumen de muela abrasiva diamantado entre el volumen de desgaste de la herramienta. Analíticamente viene definido de la siguiente manera:

$$G_d = \frac{\Delta Vol_s}{\Delta Vol_d} \quad [11.7]$$

A medida que el valor del ratio sea mayor, el proceso de diamantado es más eficiente ya que se ha diamantado un mayor volumen de muela abrasiva para un determinado desgaste de la herramienta de diamantado.

## ANEXO II: Cálculo de resultados

### II.1. Bloque de ensayos SiC J – 1º

Al igual que en el bloque de ensayos anterior se realizan 4 pasadas de reavivado con la moleta 1ªCBL (ver Tabla 6.1) con las mismas condiciones de manera que la superficie de partida sea la adecuada para poder apreciar los cambios.

A continuación, en la Figura 11.4 se puede ver el estado de la superficie de la muela al comienzo de los ensayos del bloque SiC J – 1º así como el sector concreto que se analiza.

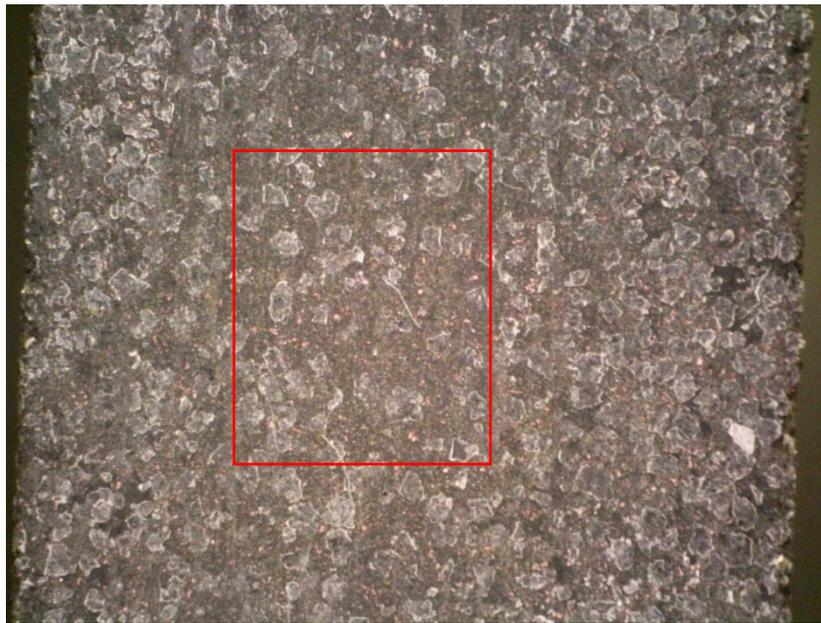


Figura 11.4: Estado de la muela previo al bloque de ensayos SiC J-1º

El análisis consiste en el seguimiento de varios granos en concreto, estudiando su evolución durante las diferentes pasadas de reperfilado. Además, se cuantifica la concentración de granos dentro del sector y el número de saltos de grano.

Como referencia se parte del estado de la superficie de la muela posterior las 4 pasadas de reavivado previamente mencionadas. En la Figura 11.5 se muestra dicho estado.

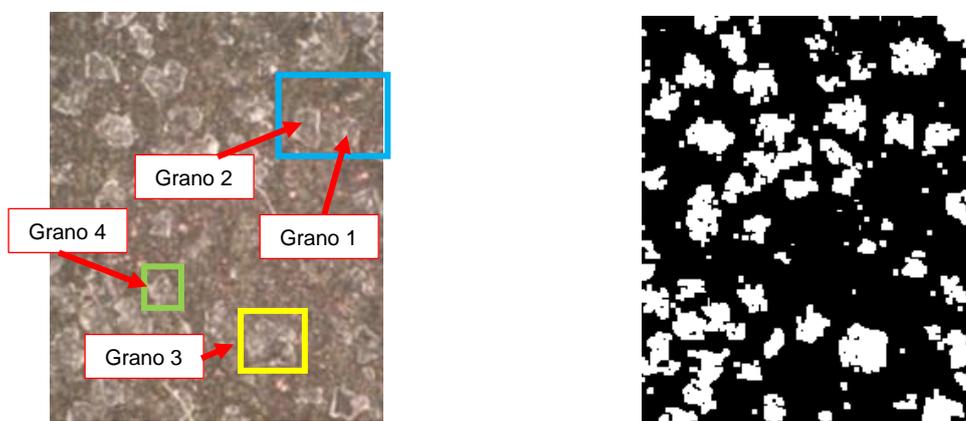


Figura 11.5: Estado de la superficie previo a los ensayos del bloque SiC J

La concentración de grano en este estado de la muela es del 24,99%. Los granos a los que se les realiza el seguimiento vienen marcados en la figura por zona, y son los siguientes:

- **Zona Azul:**
  - Grano 1
  - Grano 2
- **Zona Amarilla:**
  - Grano 3
- **Zona Verde:**
  - Grano 4

### II.1.1. Evaluación de la superficie después de 10 pasadas de SiC J – 1º

En este apartado se compara el estado de la superficie de la muela tras 10 pasadas del primer paso de reperfilado con el estado inicial. En la Figura 11.6 se pueden ver ambos estados agrupados con los granos que se analizan marcados.

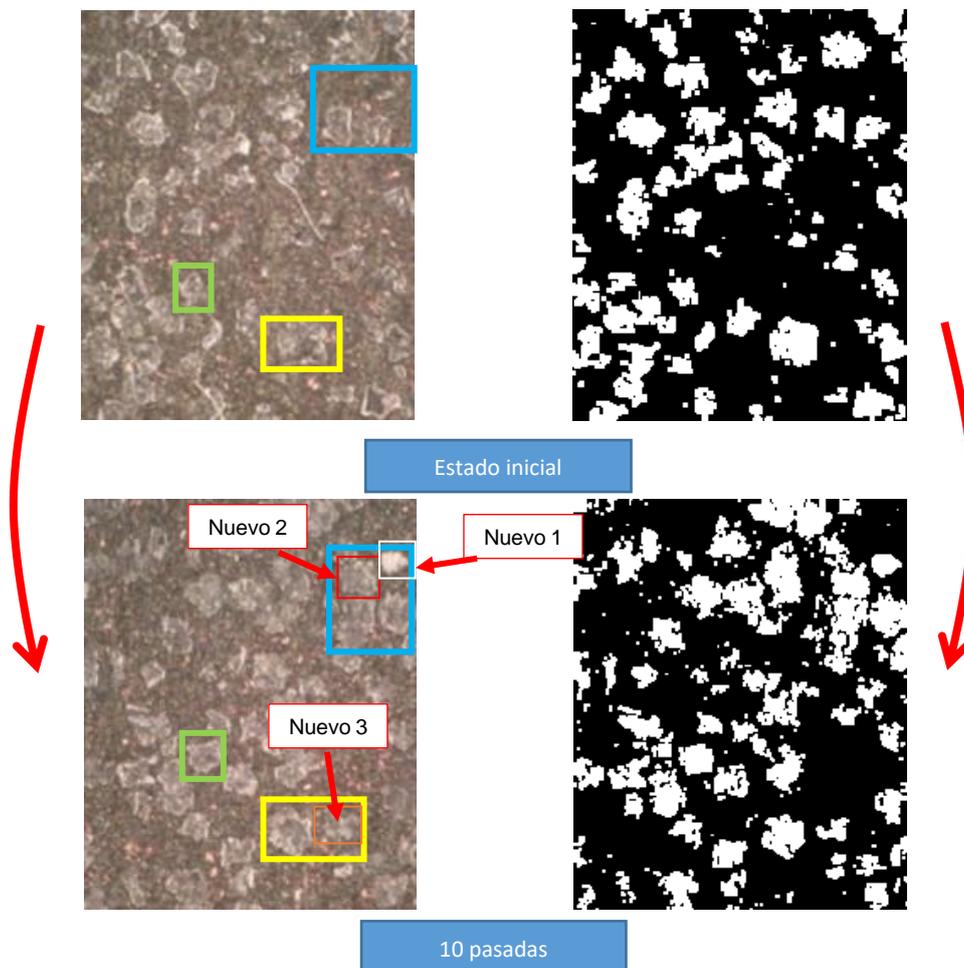


Figura 11.6: Comparativa: Estado inicial - 10 pasadas (SiC J-1º)

La concentración de grano en después de 10 pasadas es del 28,33%. Por lo tanto, ha aumentado un 3,34%.

Sobre la evaluación de los granos seleccionados, se discute lo siguiente:

- **Zona Azul:**
  - **Grano 1:** Aumenta el tamaño un 61,00%.
  - **Grano 2:** Aumenta el tamaño un 102,49%.

- **Nuevo 1:** Se trata de un grano nuevo que ha alcanzado la superficie, en la figura corresponde con el rectángulo blanco.
- **Nuevo 2:** Se trata de un grano nuevo que ha alcanzado la superficie, en la figura corresponde con el rectángulo rojo.
- **Zona Amarilla:**
  - **Grano 3:** Reduce el tamaño un 28,16%.
  - **Nuevo 3:** Se trata de un grano que ha comenzado a sobresalir a la superficie. Corresponde con el rectángulo naranja de la figura.
- **Zona Verde:**
  - **Grano 4:** Aumenta el tamaño un 25,11%.

### II.1.2. Evaluación de la superficie después de 20 pasadas de SiC J – 1º

En este apartado se compara el estado de la superficie de la muela tras 20 pasadas del primer paso de reperfilado con el estado después de 10. En la Figura 11.7 se pueden ver ambos estados agrupados con los granos que se analizan marcados.

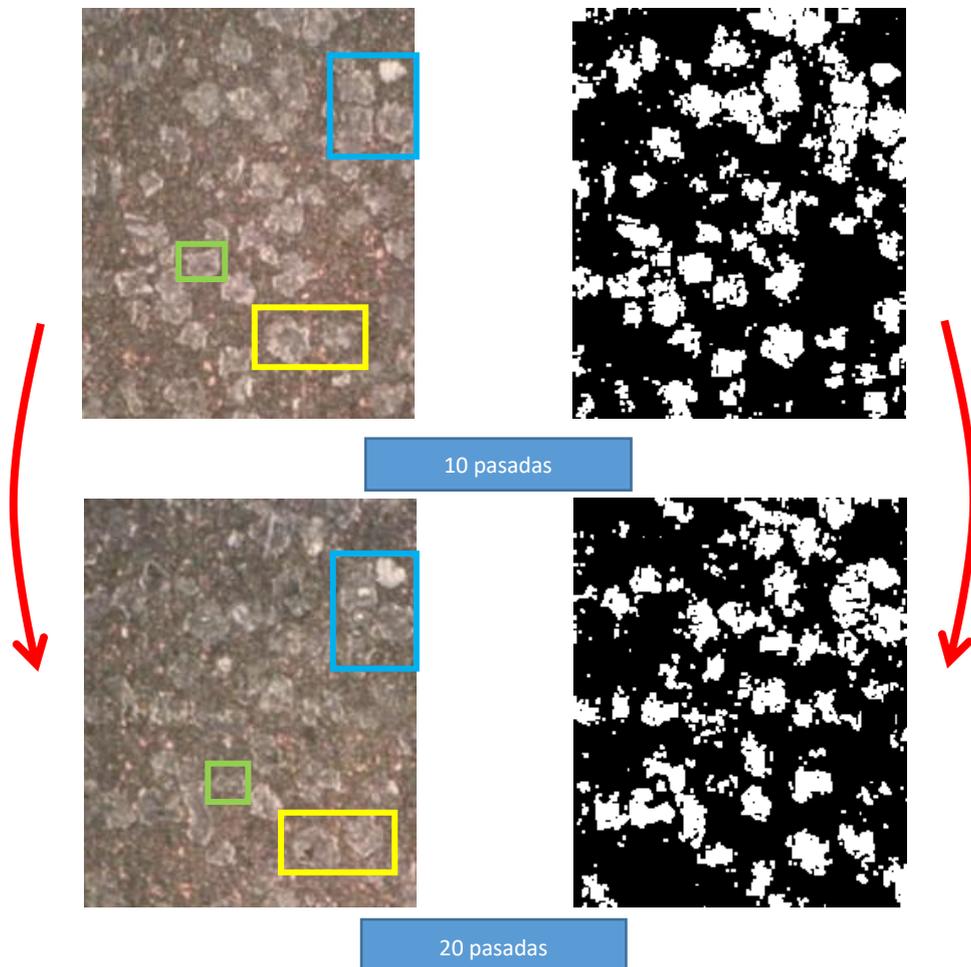


Figura 11.7: Comparativa: 10 pasadas - 20 pasadas (SiC J-1º)

En este estado la concentración de grano es del 25,57%. Por lo tanto, se ha reducido un 2,76% respecto al estado anterior y ha aumentado un 0,58% respecto al estado inicial.

Sobre la evaluación de los granos seleccionados, se discute lo siguiente:

- **Zona Azul:**
  - **Grano 1:** Aumenta el tamaño un 6,10%.
  - **Grano 2:** Reduce el tamaño un 29,71%. El grano pierde planicidad.
  - **Nuevo 1:** Aumenta el tamaño un 54,01%.
  - **Nuevo 2:** Aumenta el tamaño un 7,73%.
- **Zona Amarilla:**
  - **Grano 3:** Reduce el tamaño un 4,16%.
  - **Nuevo 3:** Aumenta el tamaño un 89,94%.
- **Zona Verde:**
  - **Grano 4:** Reduce el tamaño un 68,59%.

### II.1.3. Evaluación de la superficie después de 30 pasadas de SiC J – 1°

En este apartado se compara el estado de la superficie de la muela tras 30 pasadas del primer paso de reperfilado con el estado después de 20. En la Figura 11.8 se pueden ver ambos estados agrupados con los granos que se analizan marcados.

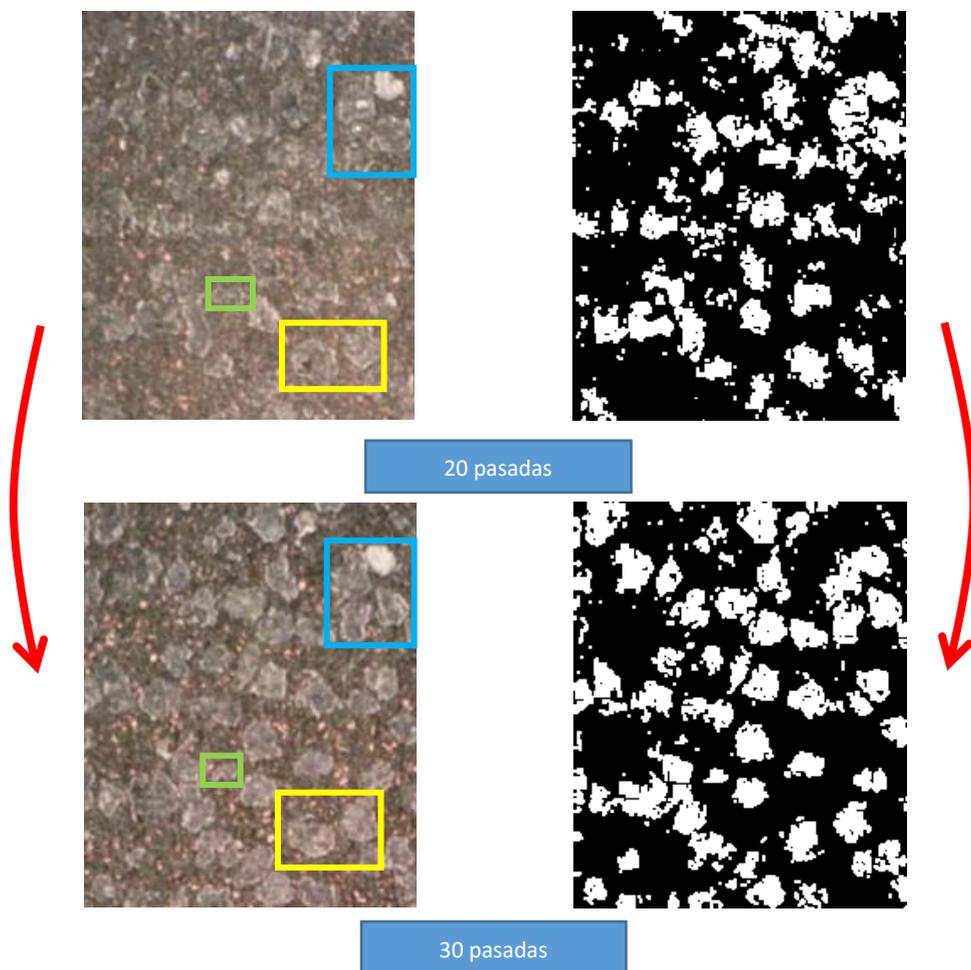


Figura 11.8: Comparativa: 20 pasadas - 30 pasadas (SiC J-1°)

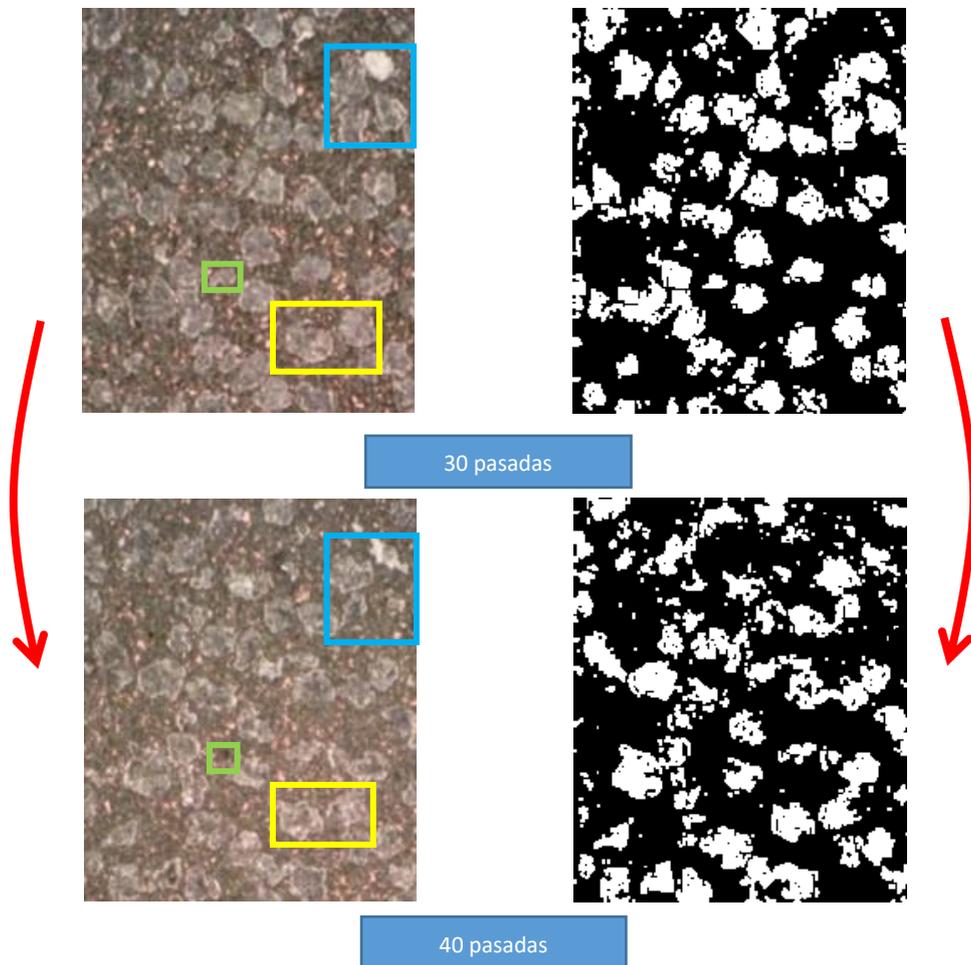
En este estado la concentración de grano es del 30,32%. Por lo tanto, ha aumentado un 4,75% respecto al estado anterior y ha aumentado un 5,33% respecto al estado inicial.

Sobre la evaluación de los granos seleccionados, se discute lo siguiente:

- **Zona Azul:**
  - **Grano 1:** Reduce el tamaño un 17,61%.
  - **Grano 2:** Reduce el tamaño un 2,72%.
  - **Nuevo 1:** Aumenta el tamaño un 0,34%.
  - **Nuevo 2:** Aumenta el tamaño un 6,36%.
- **Zona Amarilla:**
  - **Grano 3:** Reduce el tamaño un 14,65%.
  - **Nuevo 3:** Aumenta el tamaño un 22,02%.
- **Zona Verde:**
  - **Grano 4:** Aumenta el tamaño un 3,33%.

#### *II.1.4. Evaluación de la superficie después de 40 pasadas de SiC J – 1º*

En este apartado se compara el estado de la superficie de la muela tras 40 pasadas del primer paso de reperfilado con el estado después de 30. En la Figura 11.9 se pueden ver ambos estados agrupados con los granos que se analizan marcados.



*Figura 11.9: Comparativa: 30 pasadas - 40 pasadas (SiC J-1º)*

En este estado la concentración de grano es del 29,35%. Por lo tanto, se ha reducido un 0,97% respecto al estado anterior y ha aumentado un 4,36% respecto al estado inicial.

Sobre la evaluación de los granos seleccionados, se discute lo siguiente:

- **Zona Azul:**
  - **Grano 1:** Reduce el tamaño un 84,15%.
  - **Grano 2:** Reduce el tamaño un 35,36%.
  - **Nuevo 1:** Reduce el tamaño un 25,75%.
  - **Nuevo 2:** Aumenta el tamaño un 17,21%.
- **Zona Amarilla:**
  - **Grano 3:** Aumenta el tamaño un 12,87%.
  - **Nuevo 3:** Reduce el tamaño un 2,58%.
- **Zona Verde:**
  - **Grano 4:** Se desprende de la superficie dejando el hueco apreciable en la figura.

### II.1.5. Evaluación de la superficie después de 50 pasadas de SiC J – 1º

En este apartado se compara el estado de la superficie de la muela tras 50 pasadas del primer paso de reperfilado con el estado después de 40. En la Figura 11.10 se pueden ver ambos estados agrupados con los granos que se analizan marcados.

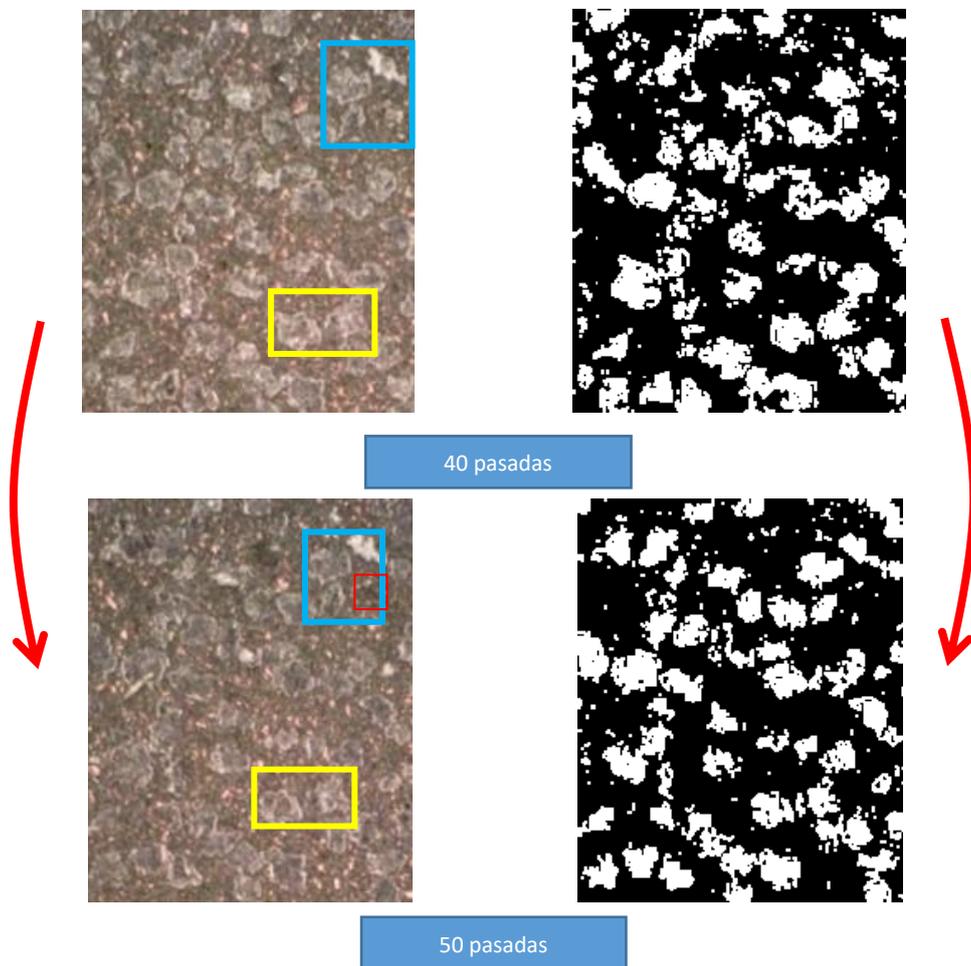


Figura 11.10: Comparativa: 40 pasadas - 50 pasadas (SiC J-1º)

En este estado la concentración de grano es del 28,89%. Por lo tanto, se ha reducido un 0,46% respecto al estado anterior y ha aumentado un 3,9% respecto al estado inicial.

Sobre la evaluación de los granos seleccionados, se discute lo siguiente:

- **Zona Azul:**
  - **Grano 1:** Se desprende de la superficie dejando el hueco correspondiente al rectángulo rojo de la figura.
  - **Grano 2:** Aumenta el tamaño un 4,26%.
  - **Nuevo 1:** Aumenta el tamaño un 5,02%.
  - **Nuevo 2:** Reduce el tamaño un 2,93%.
- **Zona Amarilla:**
  - **Grano 3:** Reduce el tamaño un 9,13%.
  - **Nuevo 3:** Reduce el tamaño un 13,29%.

### II.1.6. Análisis de la geometría SiC J – 1°

En este apartado se analiza la geometría del perfil de la muela. Dicho perfil corresponde con la geometría negativa del perfil del grafito.

Para realizar el análisis se estudia la Figura 8.8. El ángulo de  $41,574^\circ$  de la figura corresponde a la arista que antes entra en contacto con el SiC. La muela de fábrica disponía de  $90^\circ$  en ambos lados. Por lo tanto, tras los ensayos, el ángulo de  $90$  ha pasado a ser de  $131,574^\circ$ , es decir, ha aumentado un 41,41%. En cuanto a la otra arista, el ángulo ha pasado a ser de  $93,463^\circ$ , aumentando  $1,563^\circ$ , es decir, un 1,7%. Por lo tanto, la muela ha perdido su geometría inicial. En definitiva, el ángulo de la arista que entra primero en contacto ha aumentado un 26,6 veces más que el de la otra arista.



Figura 11.11: Análisis de la geometría de la muela SiC J – 1°

## II.2. Bloque de ensayos Tantalio - 1°

Este bloque corresponde al reperfilado con el stick de tantalio y las condiciones Tantalio – 1°. En la Figura 11.12 se puede ver estado de la superficie de la muela antes de comenzar con los ensayos correspondientes al bloque. En dicha figura viene marcado el sector que se analiza.



Figura 11.12. Estado inicial Tantalio-1°

El análisis consiste en el seguimiento de varios granos dentro de dicho sector. Se estudia su evolución durante las diferentes pasadas de reperfilado Tantalio – 1°. Además, también se cuantifica la concentración de granos dentro del sector.

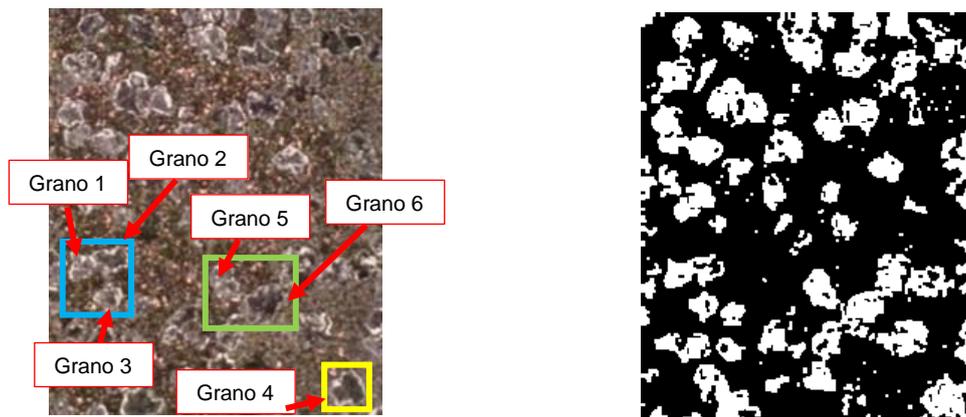


Figura 11.13. Sector de superficie a analizar Tantalio – 1°

La concentración de grano en este estado de la muela es del 27,92%. Los granos a los que se les realiza el seguimiento vienen marcados en la figura, distribuidos en diferentes zonas. Cada zona dispone de un color.

- **Zona Azul:**
  - Grano 1
  - Grano 2
  - Grano 3
- **Zona Amarilla:**
  - Grano 4
- **Zona Verde:**
  - Grano 5
  - Grano 6

### II.2.1. Evaluación de la superficie después de 10 pasadas de Tantalio – 1º

En este apartado se compara el estado de la superficie de la muela después de realizar 10 pasadas de Tantalio – 1º con el estado inicial. En la Figura 11.14 se pueden ver ambos estados con los granos a analizar marcados.

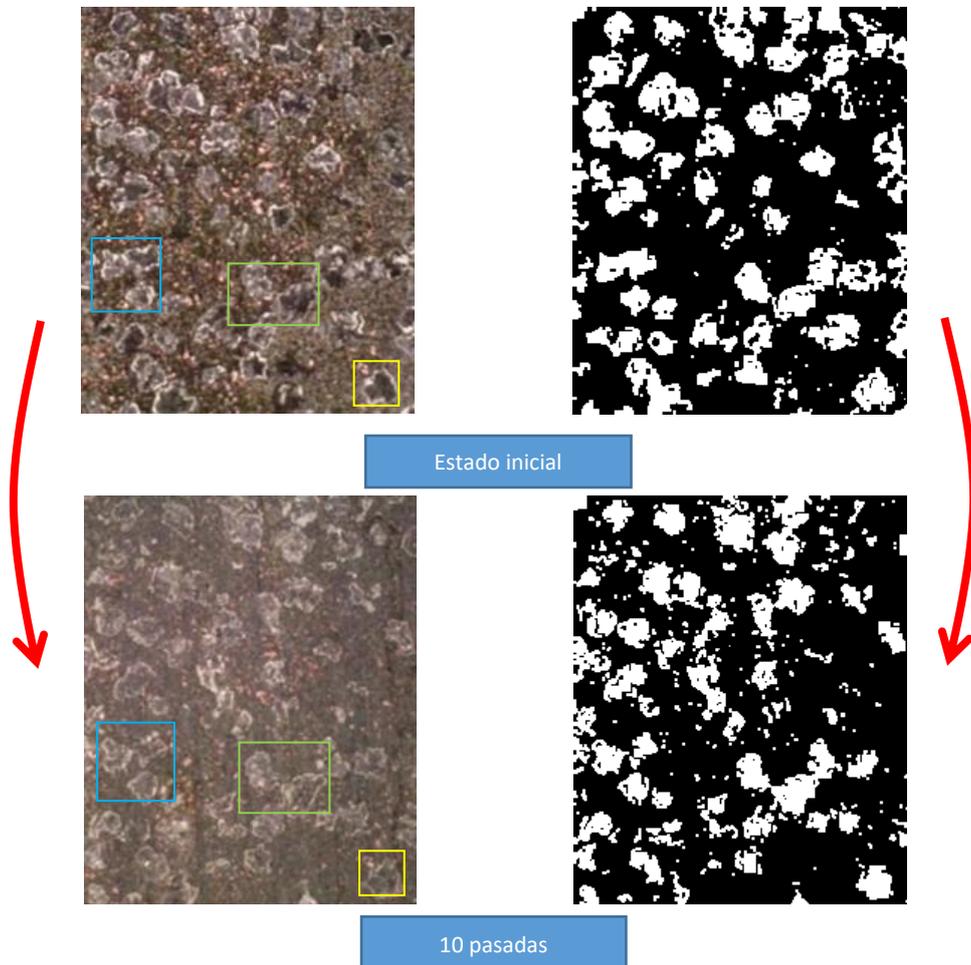


Figura 11.14: Comparativa: Estado inicial - 10 pasadas (Tantalio-1º)

La concentración de granos después de 10 pasadas es del 24,38%. Por lo tanto, se ha reducido un 3,54%.

Sobre la evaluación de los granos seleccionados, se discute lo siguiente:

- **Zona Azul:**
  - **Grano 1:** Aumenta el tamaño un 3,04%.
  - **Grano 2:** Reduce el tamaño un 19,30%.
  - **Grano 3:** Aumenta el tamaño un 11,30%.
- **Zona Amarilla:**
  - **Grano 4:** Reduce el tamaño un 11,35%.
- **Zona Verde:**
  - **Grano 5:** Reduce el tamaño un 7,61%.
  - **Grano 6:** Aumenta el tamaño un 10,08%.

### II.2.2. Evaluación de la superficie después de 20 pasadas de Tantalio – 1º

En este apartado se compara el estado de la superficie de la muela después de realizar 20 pasadas de Tantalio – 1º con el estado anterior. En la Figura 11.15 se pueden ver ambos estados con los granos a analizar marcados.

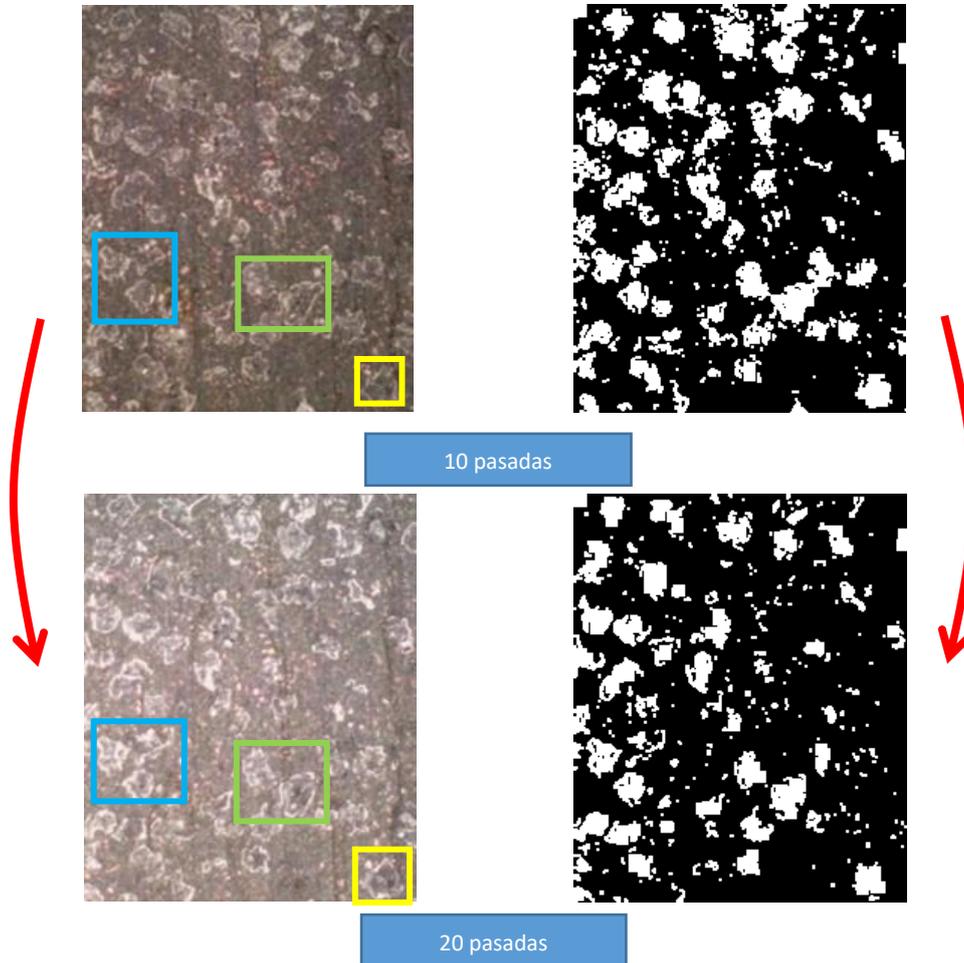


Figura 11.15: Comparativa: 10 pasadas - 20 pasadas (Tantalio-1º)

La concentración de granos después de 20 pasadas es del 19,37%. Por lo tanto, se ha reducido un 5,01%.

Sobre la evaluación de los granos seleccionados, se discute lo siguiente:

- **Zona Azul:**
  - **Grano 1:** Reduce el tamaño un 0,18%.
  - **Grano 2:** Reduce el tamaño un 19,29%. Además, se observa como el grano se ha fractura en dos.
  - **Grano 3:** Aumenta el tamaño un 20,52%.
- **Zona Amarilla:**
  - **Grano 4:** Reduce el tamaño un 15,52%.
- **Zona Verde:**
  - **Grano 5:** Reduce el tamaño un 7,18%.
  - **Grano 6:** Reduce el tamaño un 20,63%.

### II.2.3. Evaluación de la superficie después de 30 pasadas de Tantalio – 1º

En este apartado se compara el estado de la superficie de la muela después de realizar 30 pasadas de Tantalio – 1º con el estado anterior. En la Figura 11.16 se pueden ver ambos estados con los granos a analizar marcados.

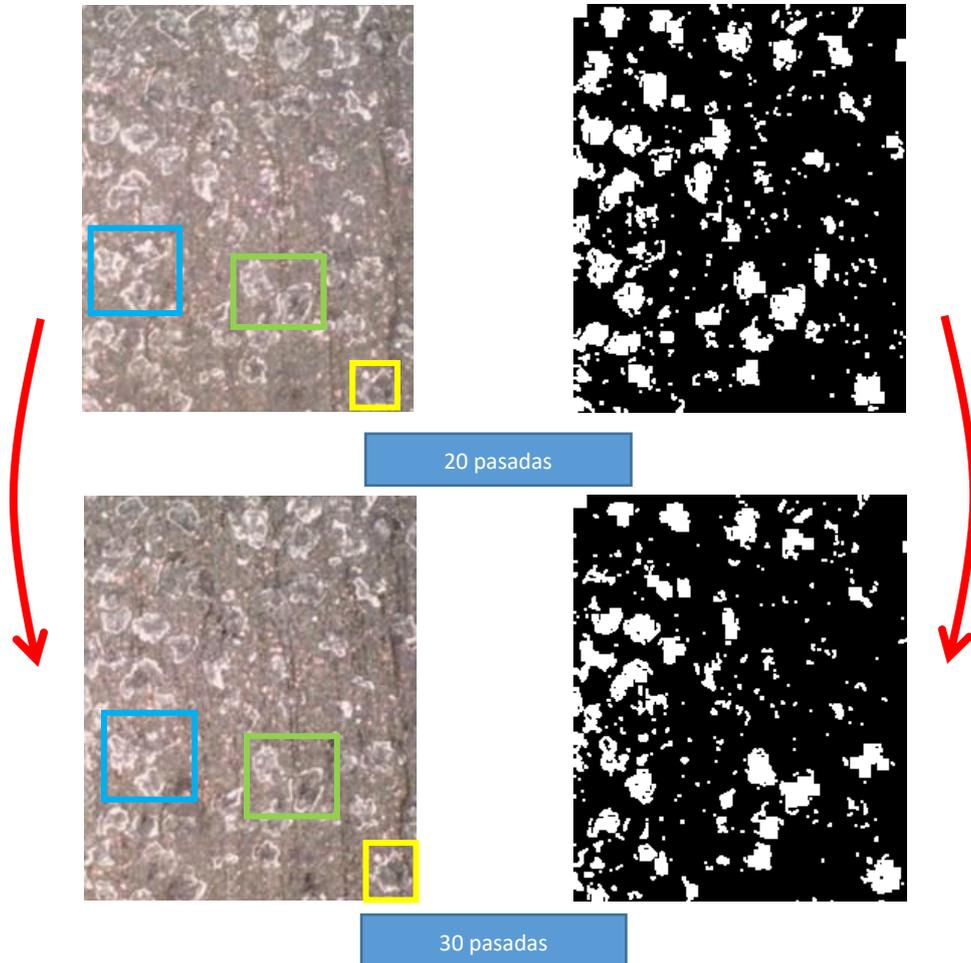


Figura 11.16: Comparativa: 20 pasadas - 30 pasadas (Tantalio-1º)

La concentración de granos después de 30 pasadas es del 16,67%. Por lo tanto, se ha reducido un 2,7%.

Sobre la evaluación de los granos seleccionados, se discute lo siguiente:

- **Zona Azul:**
  - **Grano 1:** Reduce el tamaño un 27,27%.
  - **Grano 2:** El conjunto de las dos partes del grano fracturado se reduce un 38,42%.
  - **Grano 3:** Aumenta el tamaño un 3,60%.
- **Zona Amarilla:**
  - **Grano 4:** Aumenta el tamaño un 15,51%.
- **Zona Verde:**
  - **Grano 5:** Aumenta el tamaño un 8,47%.
  - **Grano 6:** Reduce el tamaño un 8,16%.

### II.2.4. Evaluación de la superficie después 40 pasadas de Tantalio – 1º

En este apartado se compara el estado de la superficie de la muela después de realizar 40 pasadas de Tantalio – 1º con el estado anterior. En la Figura 11.17 se pueden ver ambos estados con los granos a analizar marcados.

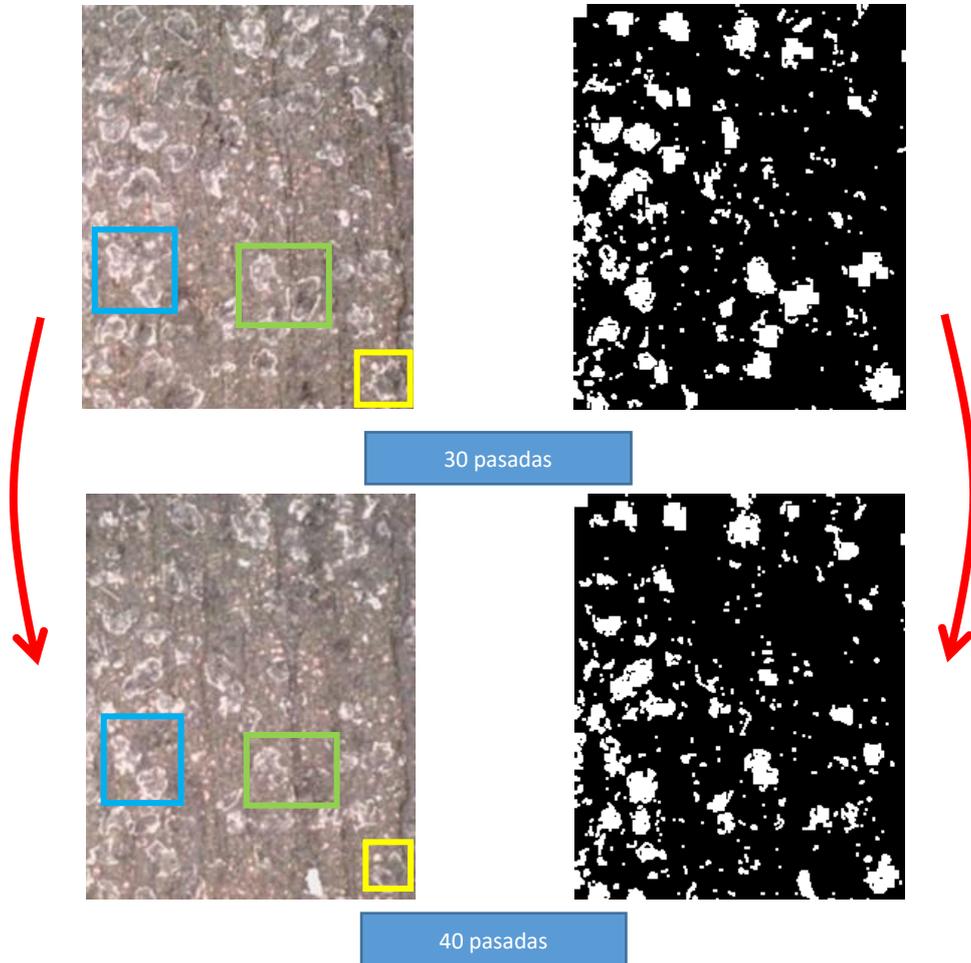


Figura 11.17: Comparativa: 30 pasadas - 40 pasadas (Tantalio-1º)

La concentración de granos después de 40 pasadas es del 14,8%. Por lo tanto, se ha reducido un 1,8%.

Sobre la evaluación de los granos seleccionados, se discute lo siguiente:

- **Zona Azul:**
  - **Grano 1:** Reduce el tamaño un 8,27%.
  - **Grano 2:** El grano se ha desprendido completamente de la superficie.
  - **Grano 3:** Aumenta el tamaño un 19,04%.
- **Zona Amarilla:**
  - **Grano 4:** Reduce el tamaño un 12,84%.
- **Zona Verde:**
  - **Grano 5:** Aumenta el tamaño un 1,8%.
  - **Grano 6:** El grano se ha desprendido.

### II.2.5. Evaluación de la superficie después de 50 pasadas de Tantalio – 1°

En este apartado se compara el estado de la superficie de la muela después de realizar 50 pasadas de Tantalio – 1° con el estado anterior. En la Figura 11.18 se pueden ver ambos estados con los granos a analizar marcados.

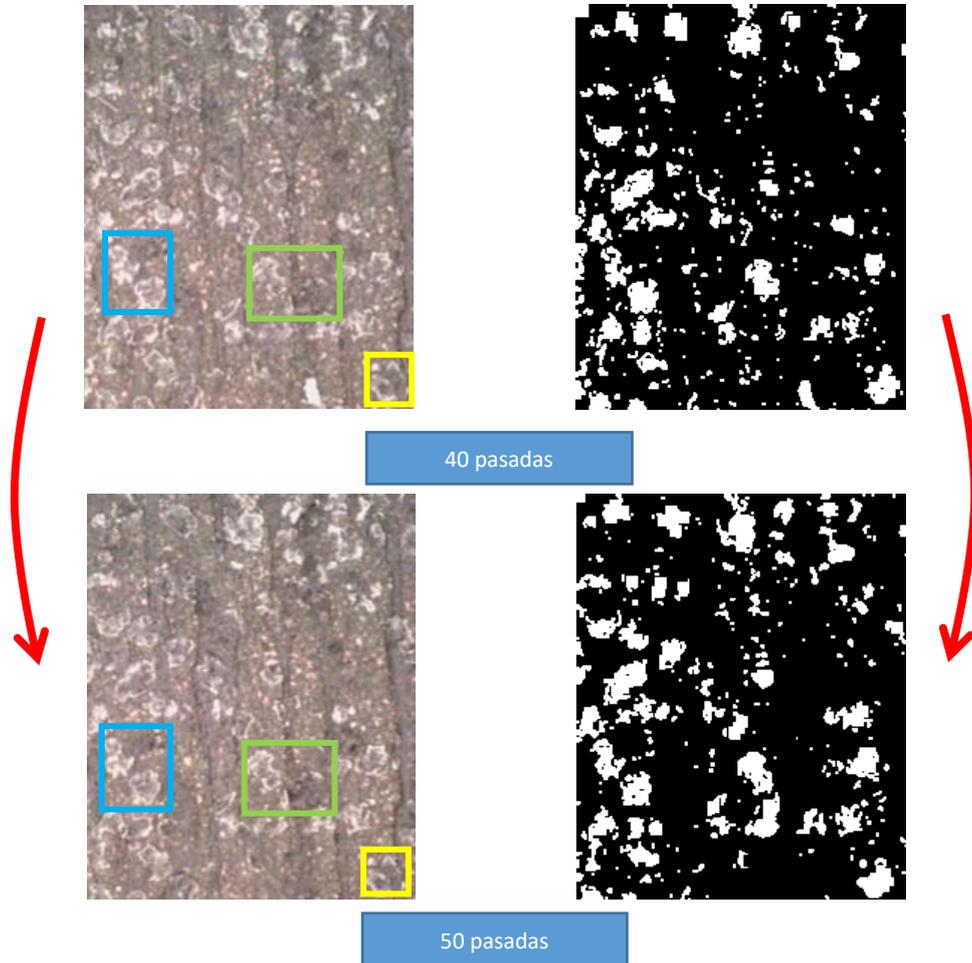


Figura 11.18: Comparativa: 40 pasadas - 50 pasadas (Tantalio-1°)

La concentración de granos después de 50 pasadas es del 17,95%. Por lo tanto, se ha reducido un 3,15%.

Sobre la evaluación de los granos seleccionados, se discute lo siguiente:

- **Zona Azul:**
  - **Grano 1:** Aumenta el tamaño un 10,07%.
  - **Grano 3:** Aumenta el tamaño un 3,99%.
- **Zona Amarilla:**
  - **Grano 4:** Aumenta el tamaño un 2,84%.
- **Zona Verde:**
  - **Grano 5:** Aumenta el tamaño un 6,41%.

### II.2.6. Análisis de la geometría Tantalio – 1°

En este apartado se analiza la geometría del perfil de la muela. Dicho perfil corresponde con la geometría negativa del perfil del grafito.

Para realizar el análisis se estudia la Figura 11.19, donde se pueden ver estado inicial y el posterior a los ensayos. El ángulo de la arista de incidencia previo a los ensayos era de  $176,26^\circ$  y pasa a ser de  $141,62^\circ$ . Teniendo en cuenta que el ángulo teórico es de  $90^\circ$ , se ha pasado de un porcentaje de error de  $95,84\%$  a uno de  $57,35\%$ . Se ha mejorado la desviación un  $38,49\%$ .

En cuanto a la arista que después entra en contacto con la muela, al comienzo de los ensayos disponía de un ángulo de  $92,14^\circ$  y pasa a ser de  $109,65^\circ$ . Teniendo en cuenta que el ángulo teórico es de  $90^\circ$ , se ha pasado de un porcentaje de error de  $2,37\%$  a uno de  $21,83\%$ . Se ha empeorado la desviación un  $19,46\%$ .

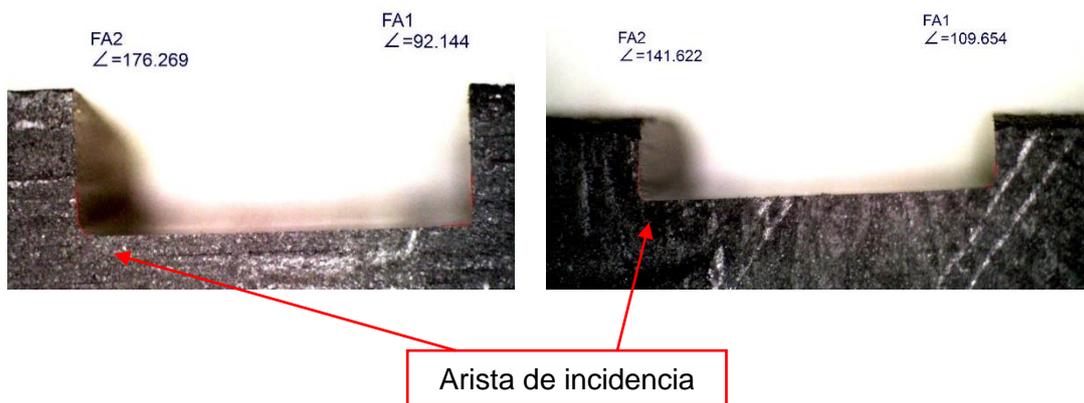


Figura 11.19: Análisis de la geometría Tantalio - 1º

### II.3. Bloque de ensayos Tantalio – DIACUT

Este bloque de ensayos corresponde al reperfilado con “stick” de tantalio y las condiciones recomendadas por el fabricante DIACUT definidas en apartados anteriores. En la Figura 11.20 se puede ver el estado de la superficie de la muela antes de comenzar con los ensayos del bloque. Al mismo tiempo, en la figura viene marcado el sector que se analiza.

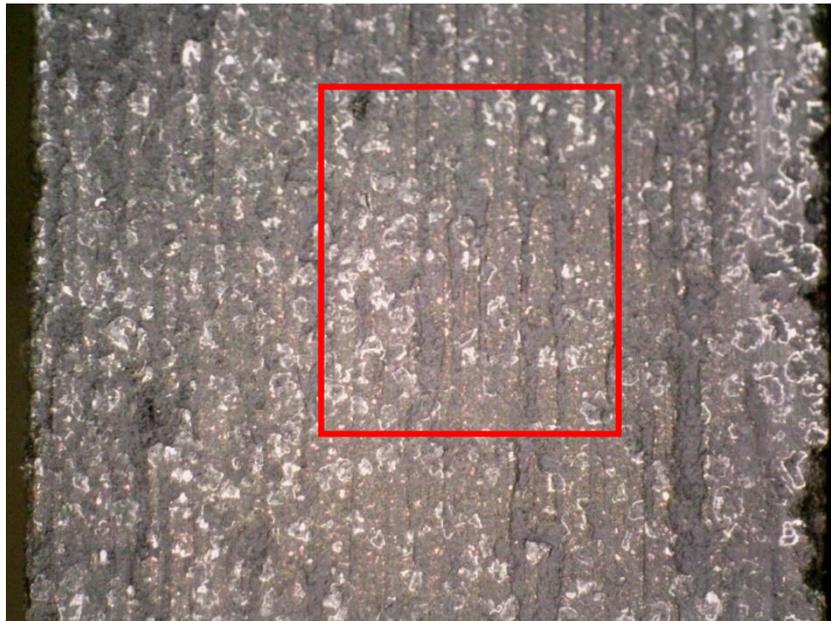


Figura 11.20: Estado inicial bloque de ensayos Tantalio – DIACUT

El análisis consiste en el seguimiento de varios granos dentro del sector. Se estudia su evolución durante las diferentes pasadas de Tantalio – DIACUT. Además, también se cuantifica y estudia la concentración de granos dentro del sector.

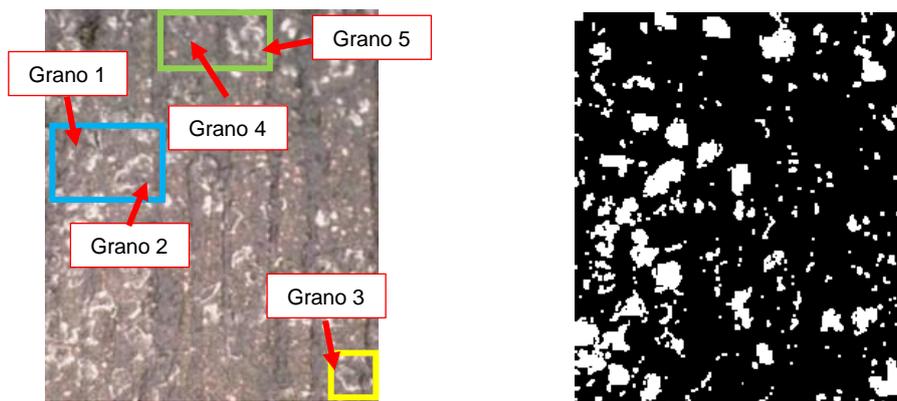


Figura 11.21: Sector de la superficie a analizar Tantalio - DIACUT

La concentración de grano en este estado de la muela es del 15,42%. Los granos a los que se les realiza el seguimiento vienen marcados en la figura, distribuidos en diferentes zonas. Cada zona dispone de un color.

- |                     |                         |                      |
|---------------------|-------------------------|----------------------|
| ➤ <b>Zona Azul:</b> | ➤ <b>Zona Amarilla:</b> | ➤ <b>Zona Verde:</b> |
| ○ Grano 1           | ○ Grano 3               | ○ Grano 4            |
| ○ Grano 2           |                         | ○ Grano 5            |

### II.3.1. Evaluación de la superficie después de 5 reperfilados de Tantalio – DIACUT

En este apartado se compara el estado de la superficie de la muela después de realizar 5 procesos de reperfilado según las condiciones DIACUT con el estado inicial. En la Figura 11.22 se pueden ver ambos estados con los granos a analizar marcados.

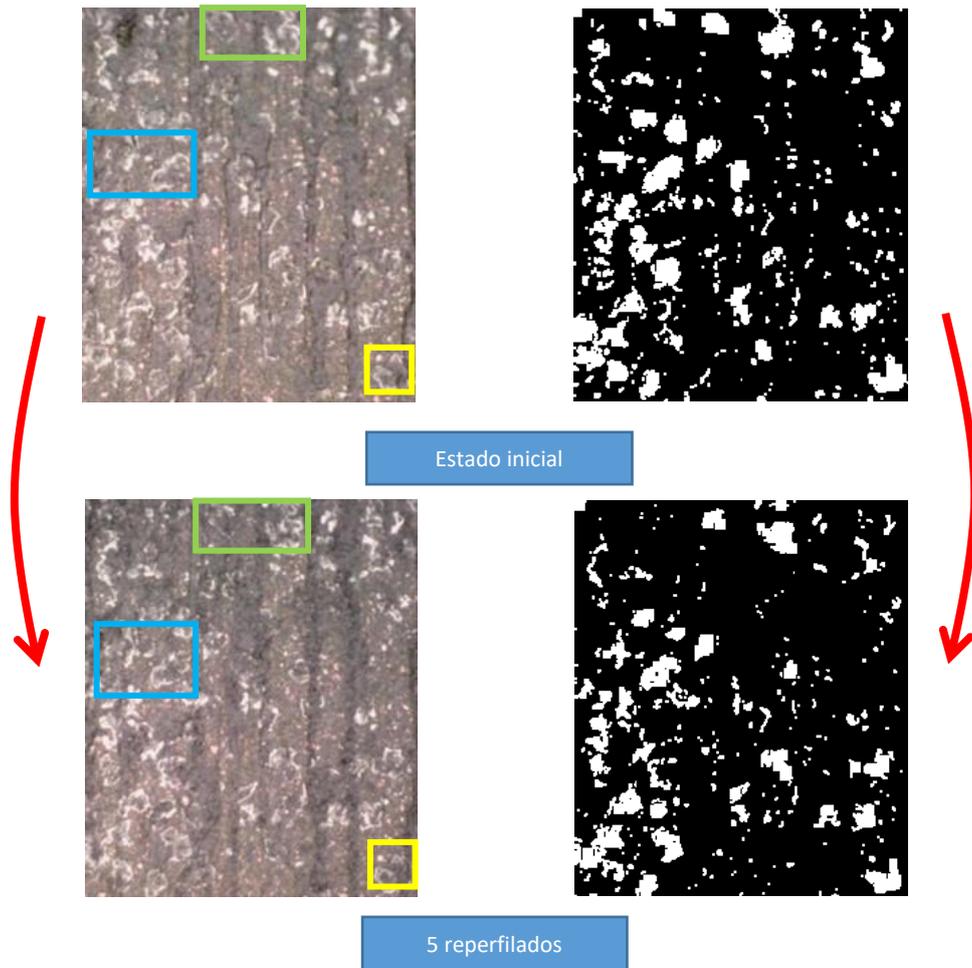


Figura 11.22: Comparativa: Estado inicial - 5 reperfilados (Tantalio - DIACUT)

La concentración de granos en este estado es del 12,98 %. Por lo tanto, ha disminuido un 2,44%.

En cuanto a la evaluación de los granos seleccionados, se discute lo siguiente:

- **Zona Azul:**
  - **Grano 1:** Aumenta el tamaño un 10,52%
  - **Grano 2:** Reduce el tamaño un 7,13%.
- **Zona Amarilla:**
  - **Grano 3:** Reduce el tamaño un 2,9%.
- **Zona Verde:**
  - **Grano 4:** Reduce el tamaño un 23,8%.
  - **Grano 5:** Reduce el tamaño un 10%.

### ***II.3.2. Evaluación de la superficie después de 10 reperfilados de Tantalio – DIACUT***

En este apartado se compara el estado de la superficie de la muela después de realizar 10 procesos de reperfilado según las condiciones DIACUT con el estado anterior. En la Figura 11.23 se pueden ver ambos estados con los granos a analizar marcados.

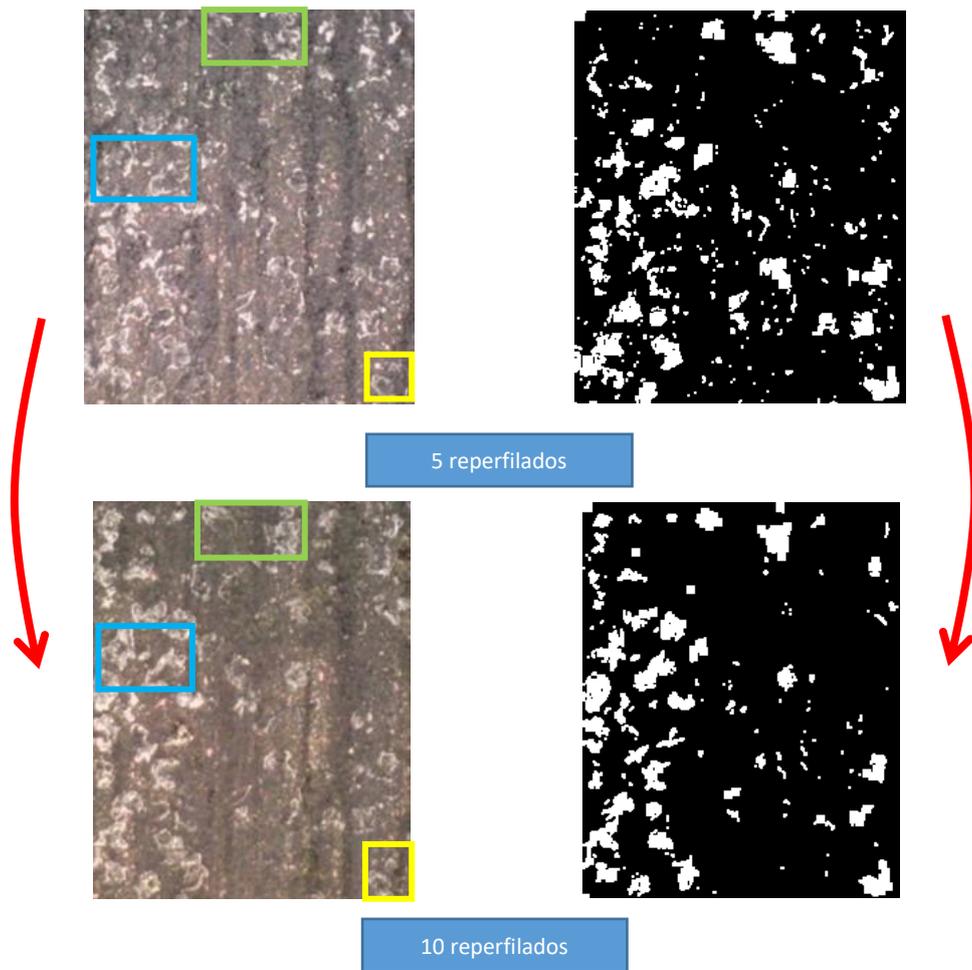


Figura 11.23: Comparativa: 5 reperfilados - 10 reperfilados (Tantalio - DIACUT)

La concentración de granos en este estado es del 11,85 %. Por lo tanto, ha disminuido un 1,13%.

En cuanto a la evaluación de los granos seleccionados, se discute lo siguiente:

- **Zona Azul:**
  - **Grano 1:** Aumenta el tamaño un 56,87%.
  - **Grano 2:** Aumenta el tamaño un 1,43%.
- **Zona Amarilla:**
  - **Grano 3:** Reduce el tamaño un 23,04%.
- **Zona Verde:**
  - **Grano 4:** Aumenta el tamaño un 17,14%.
  - **Grano 5:** Reduce el tamaño un 15,13%.

### ***II.3.3. Evaluación de la superficie después de 15 reperfilados de Tantalio – DIACUT***

En este apartado se compara el estado de la superficie de la muela después de realizar 15 procesos de reperfilado según las condiciones DIACUT con el estado anterior. En la Figura 11.24 se pueden ver ambos estados con los granos a analizar marcados.

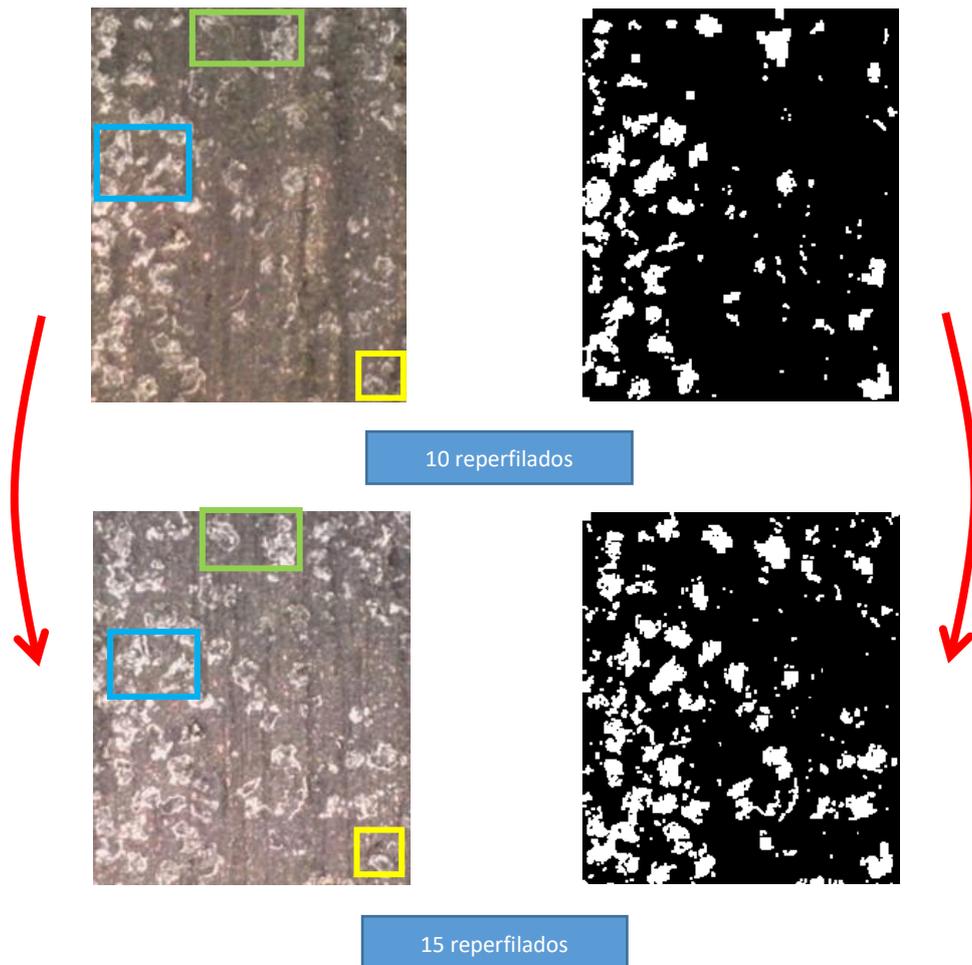


Figura 11.24: Comparativa: 10 reperfilados - 15 reperfilados (Tantalio - DIACUT)

La concentración de granos en este estado es del 18,85 %. Por lo tanto, ha aumentado un 7%.

En cuanto a la evaluación de los granos seleccionados, se discute lo siguiente:

- **Zona Azul:**
  - **Grano 1:** Reduce el tamaño un 3,54%.
  - **Grano 2:** Reduce el tamaño un 3,89%.
- **Zona Amarilla:**
  - **Grano 3:** Aumenta el tamaño un 44,53%.
- **Zona Verde:**
  - **Grano 4:** Aumenta el tamaño un 17,14%.
  - **Grano 5:** Aumenta el tamaño un 32,8%.

#### ***II.3.4. Evaluación de la superficie después de 20 reperfilados de Tantalio – DIACUT***

En este apartado se compara el estado de la superficie de la muela después de realizar 20 procesos de reperfilado según las condiciones DIACUT con el estado anterior. En la Figura 11.25 se pueden ver ambos estados con los granos a analizar marcados.

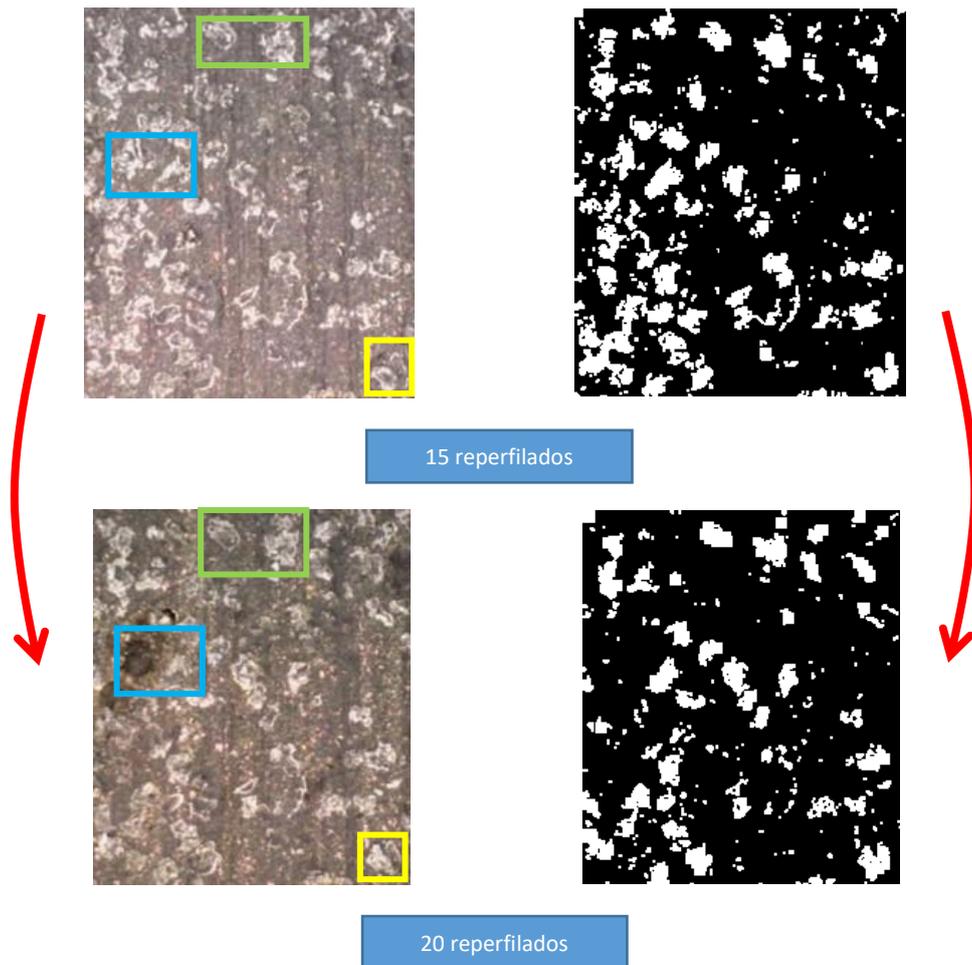


Figura 11.25: Comparativa: 15 reperfilados - 20 reperfilados (Tantalio - DIACUT)

La concentración de granos en este estado es del 15,58 %. Por lo tanto, ha disminuido un 3,27%.

En cuanto a la evaluación de los granos seleccionados, se discute lo siguiente:

- **Zona Azul:**
  - **Grano 1:** Se desprende dejando un hueco en la superficie.
  - **Grano 2:** Reduce el tamaño un 40,2%. (Fractura local en la parte izquierda del grano)
- **Zona Amarilla:**
  - **Grano 3:** Aumenta el tamaño un 54,9%.
- **Zona Verde:**
  - **Grano 4:** Aumenta el tamaño un 18,53%.
  - **Grano 5:** Reduce el tamaño un 18%.

### II.3.5. Análisis de la geometría Tantalio - DIACUT

En este apartado se analiza la geometría del perfil de la muela. Dicho perfil corresponde con la geometría negativa del perfil del grafito.

Para realizar el análisis se estudia la Figura 11.26, donde se pueden ver estado inicial y el posterior a los ensayos. El ángulo de la arista de incidencia previo a los ensayos era de  $141,62^\circ$  y pasa a ser de  $97,86^\circ$ . Teniendo en cuenta que el ángulo teórico es de  $90^\circ$ ,

se ha pasado de un porcentaje de error de 57,35% a uno de 8,73%. Se ha mejorado la desviación un 48,62%. Sin embargo, no se consigue recuperar la geometría inicial exacta.

En cuanto a la arista que después entra en contacto con la muela, al comienzo de los ensayos disponía de un ángulo de  $109,65^\circ$  y pasa a ser de  $90,979^\circ$ . Teniendo en cuenta que el ángulo teórico es de  $90^\circ$ , se ha pasado de un porcentaje de error de 21,83% a uno de 1,08%. Se ha mejorado la desviación un 20,75%.

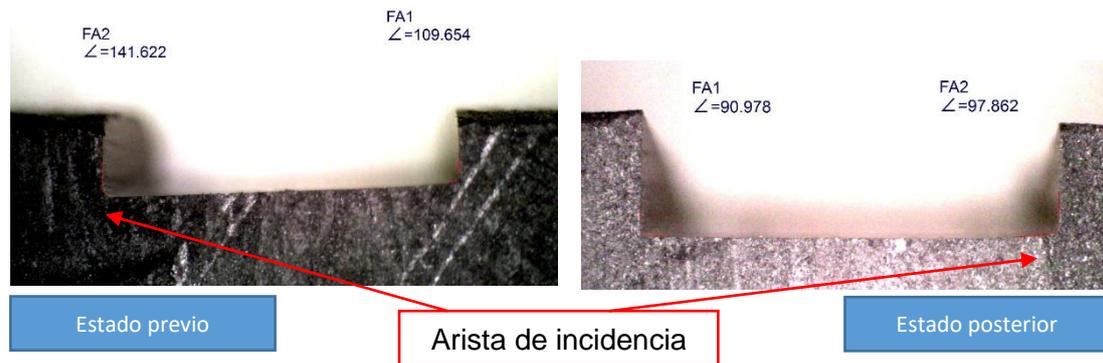


Figura 11.26: Análisis de la geometría tantalio – DIACUT

#### II.4. Bloque de ensayos SiC H – 2°

Este bloque de ensayos corresponde al reperfilado con moletas de carburo de silicio de dureza H y las segundas condiciones, SiC H – 2°. En la Figura 11.27 se puede ver el estado de la superficie de la muela antes de comenzar con los ensayos del bloque. Al mismo tiempo, en la figura viene marcado el sector que se analiza.

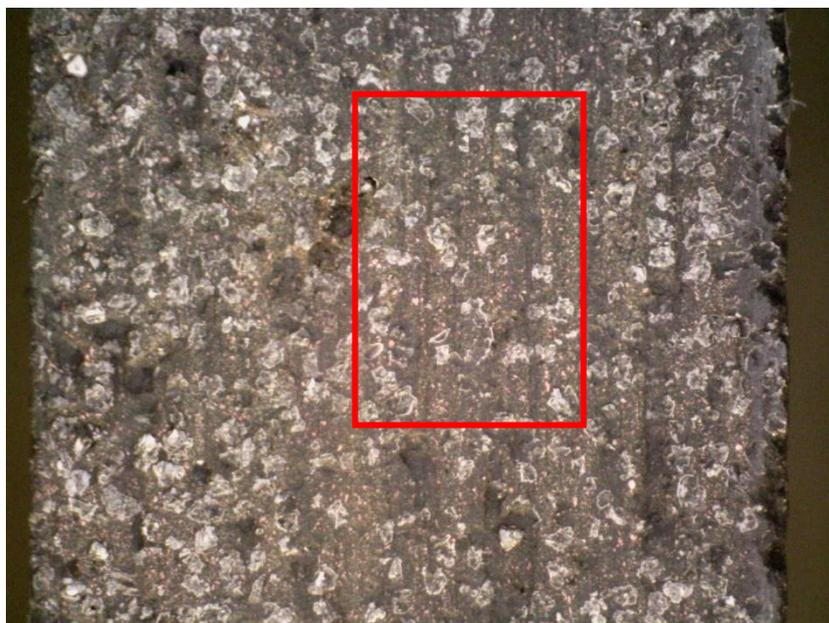


Figura 11.27: Estado inicial bloque de ensayos SiC H - 2°

El análisis consiste en el seguimiento de varios granos dentro del sector. Se estudia su evolución durante las diferentes pasadas de SiC H – 2°. Además, también se cuantifica y estudia la concentración de granos dentro del sector.

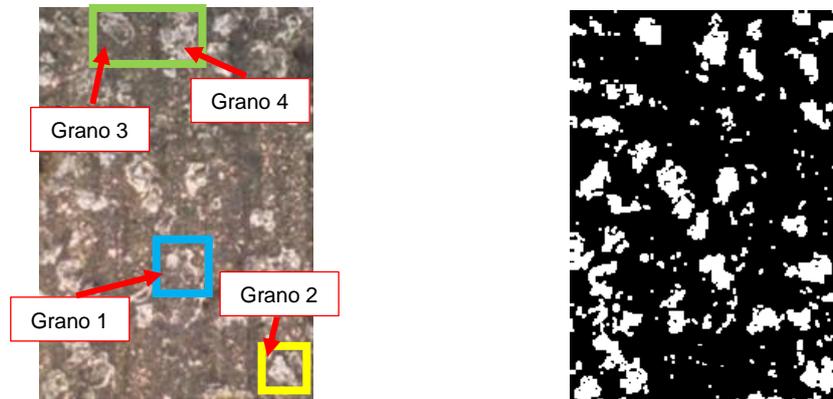


Figura 11.28: Sector de la superficie analizar SiC J – 2°

La concentración de grano en este estado de la muela es del 19,16%. Los granos a los que se les realiza el seguimiento vienen marcados en la figura, distribuidos en diferentes zonas. Cada zona dispone de un color.

- **Zona Azul:**
  - Grano 1
- **Zona Amarilla:**
  - Grano 2
- **Zona Verde:**
  - Grano 3
  - Grano 4

#### II.4.1. Evaluación de la superficie después de 10 pasadas de SiC H – 2°

En este apartado se compara el estado de la superficie de la muela después de realizar 10 pasadas de SiC H – 2° con el estado inicial. En la Figura 11.29 se pueden ver ambos estados con los granos a analizar marcados.

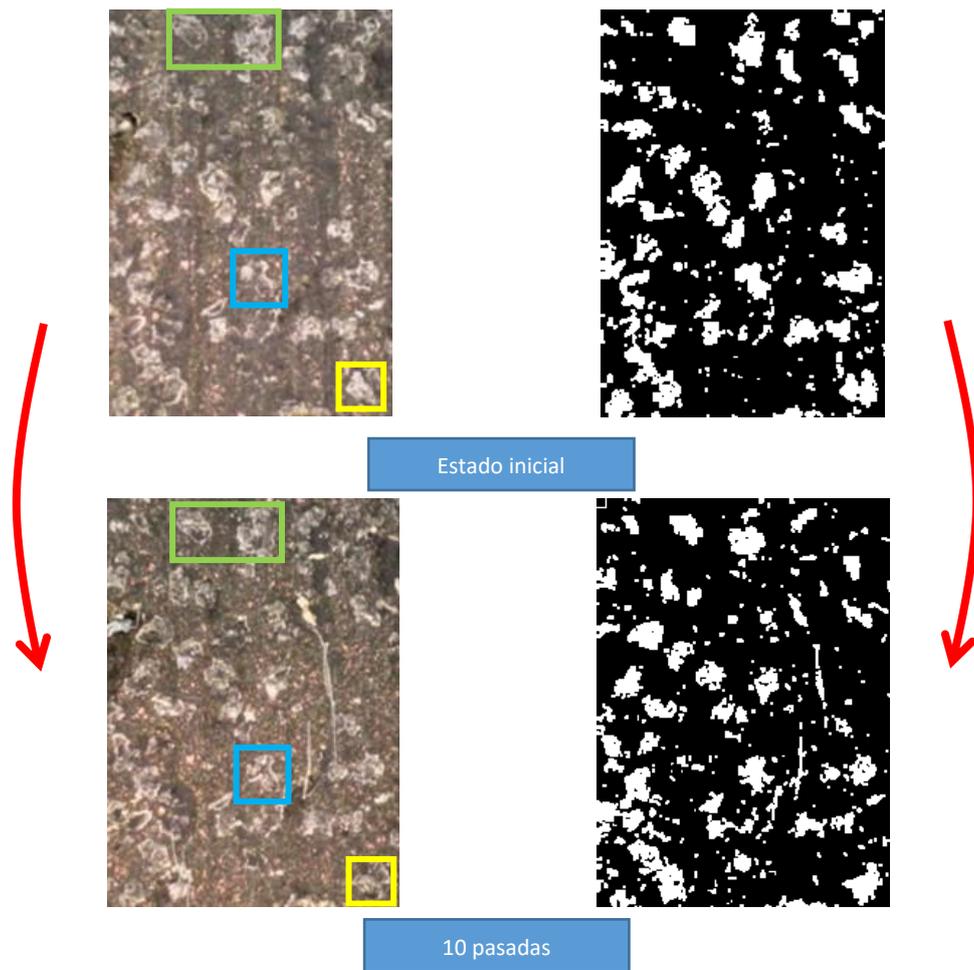


Figura 11.29: Comparativa: Estado inicial - 10 pasadas (SiC H - 2°)

La concentración de granos en este estado es del 19,12 %. Por lo tanto, ha aumentado un 0,04%.

En cuanto a la evaluación de los granos seleccionados, se discute lo siguiente:

- **Zona Azul:**
  - **Grano 1:** Reduce el tamaño un 0,91%.
- **Zona Amarilla:**
  - **Grano 2:** Reduce el tamaño un 4,3%.
- **Zona Verde:**
  - **Grano 3:** Reduce el tamaño un 0,4%.
  - **Grano 4:** Reduce el tamaño un 5,95%.

#### II.4.2. Evaluación de la superficie después de 10 pasadas de SiC H - 2°

En este apartado se compara el estado de la superficie de la muela después de realizar 20 pasadas de SiC H - 2° con el estado anterior. En la Figura 11.30 se pueden ver ambos estados con los granos a analizar marcados.

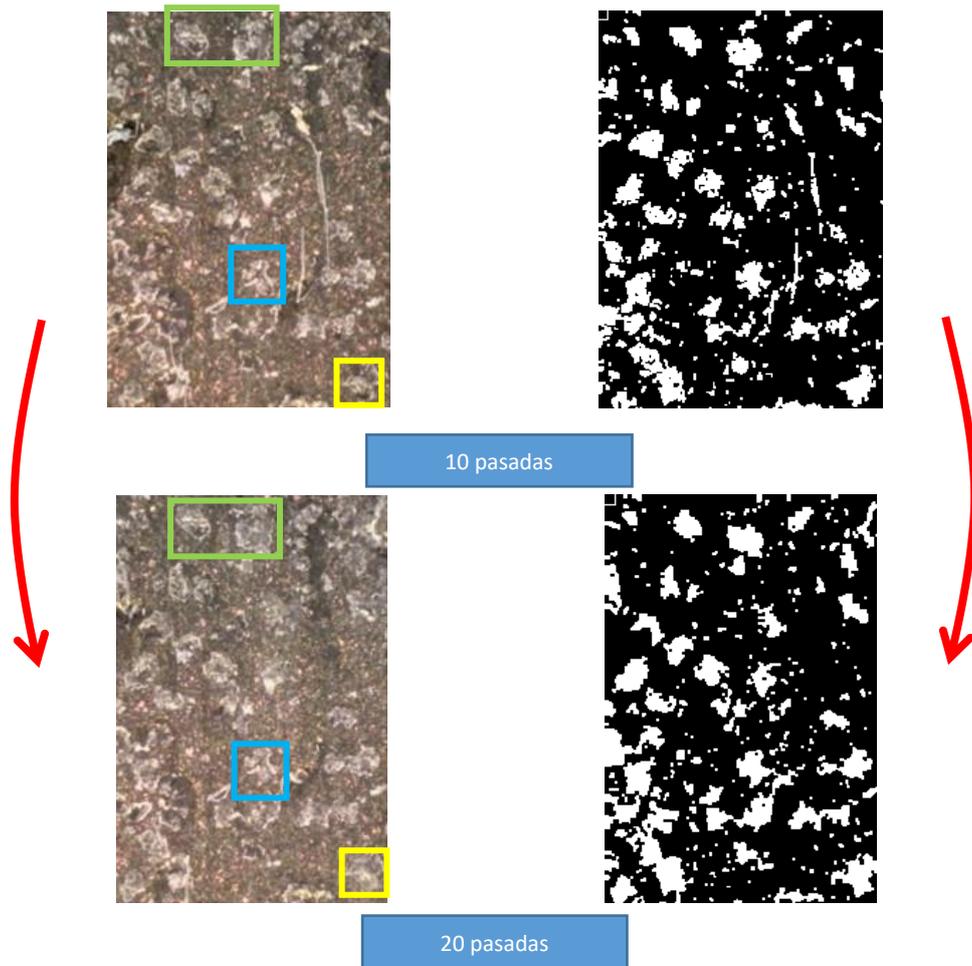


Figura 11.30: Comparativa: 10 pasadas - 20 pasadas (SiC H - 2°)

La concentración de granos en este estado es del 21,76 %. Por lo tanto, ha aumentado un 2,64%.

En cuanto a la evaluación de los granos seleccionados, se discute lo siguiente:

- **Zona Azul:**
  - **Grano 1:** Aumenta el tamaño un 2,38%.
- **Zona Amarilla:**
  - **Grano 2:** Aumenta el tamaño un 79,71%.
- **Zona Verde:**
  - **Grano 3:** Reduce el tamaño un 3,37%.
  - **Grano 4:** Aumenta el tamaño un 1,67%.

#### **II.4.3. Evaluación de la superficie después de 30 pasadas de SiC H - 2°**

En este apartado se compara el estado de la superficie de la muela después de realizar 30 pasadas de SiC H - 2° con el estado anterior. En la Figura 11.31 se pueden ver ambos estados con los granos a analizar marcados.

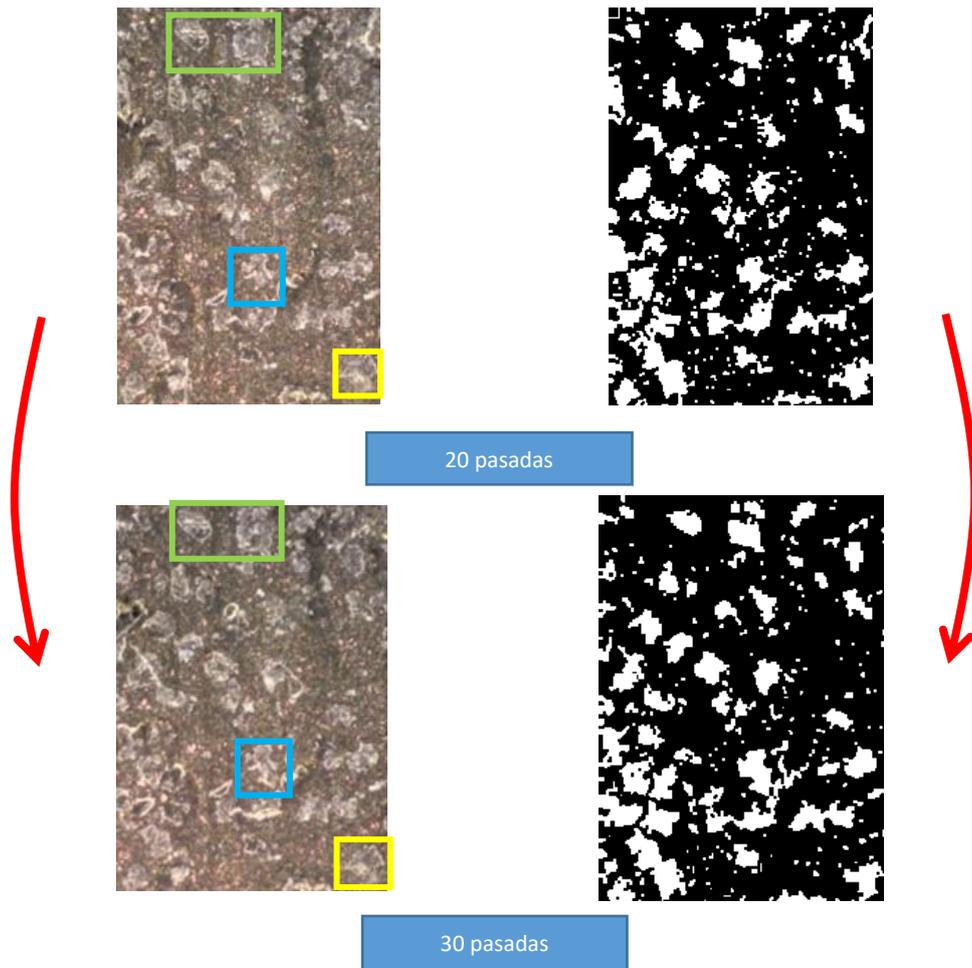


Figura 11.31: Comparativa: 20 pasadas - 30 pasadas (SiC H - 2°)

La concentración de granos en este estado es del 23,21 %. Por lo tanto, ha aumentado un 1,45%.

En cuanto a la evaluación de los granos seleccionados, se discute lo siguiente:

- **Zona Azul:**
  - **Grano 1:** Aumenta el tamaño un 20,31%
- **Zona Amarilla:**
  - **Grano 2:** Reduce el tamaño un 2,77%
- **Zona Verde:**
  - **Grano 3:** Reduce el tamaño un 2,1%.
  - **Grano 4:** Reduce el tamaño un 2,85%

#### II.4.4. Evaluación de la superficie después de 40 pasadas de SiC H - 2°

En este apartado se compara el estado de la superficie de la muela después de realizar 40 pasadas de SiC H - 2° con el estado anterior. En la Figura 11.32 se pueden ver ambos estados con los granos a analizar marcados.

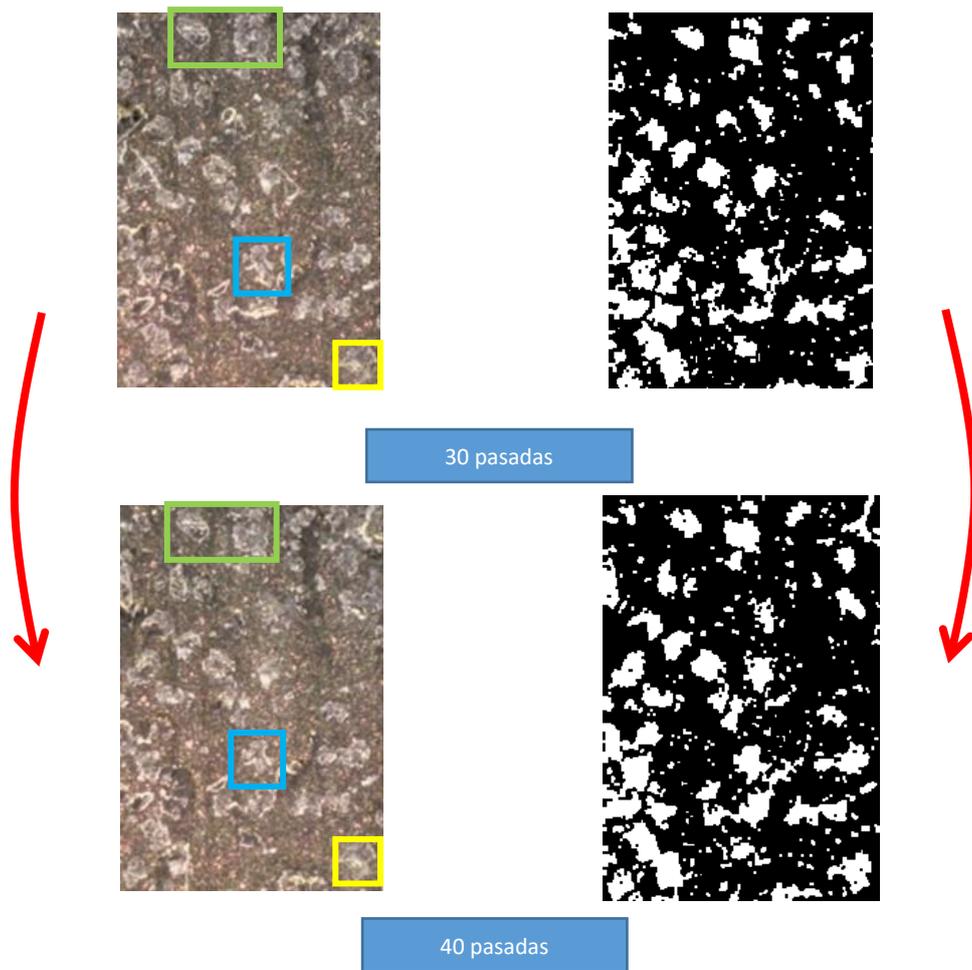


Figura 11.32: Comparativa: 30 pasadas - 40 pasadas (SiC H - 2°)

La concentración de granos en este estado es del 24,93%. Por lo tanto, ha aumentado un 1,72%.

En cuanto a la evaluación de los granos seleccionados, se discute lo siguiente:

- **Zona Azul:**
  - **Grano 1:** Aumenta el tamaño un 4,7%.
- **Zona Amarilla:**
  - **Grano 2:** Reduce el tamaño un 1,3%.
- **Zona Verde:**
  - **Grano 3:** Aumenta el tamaño un 4,6%.
  - **Grano 4:** Aumenta el tamaño un 5,7%.

#### II.4.5. Evaluación de la superficie después de 50 pasadas de SiC H - 2°

En este apartado se compara el estado de la superficie de la muela después de realizar 50 pasadas de SiC H - 2° con el estado anterior. En la Figura 11.33 se pueden ver ambos estados con los granos a analizar marcados.

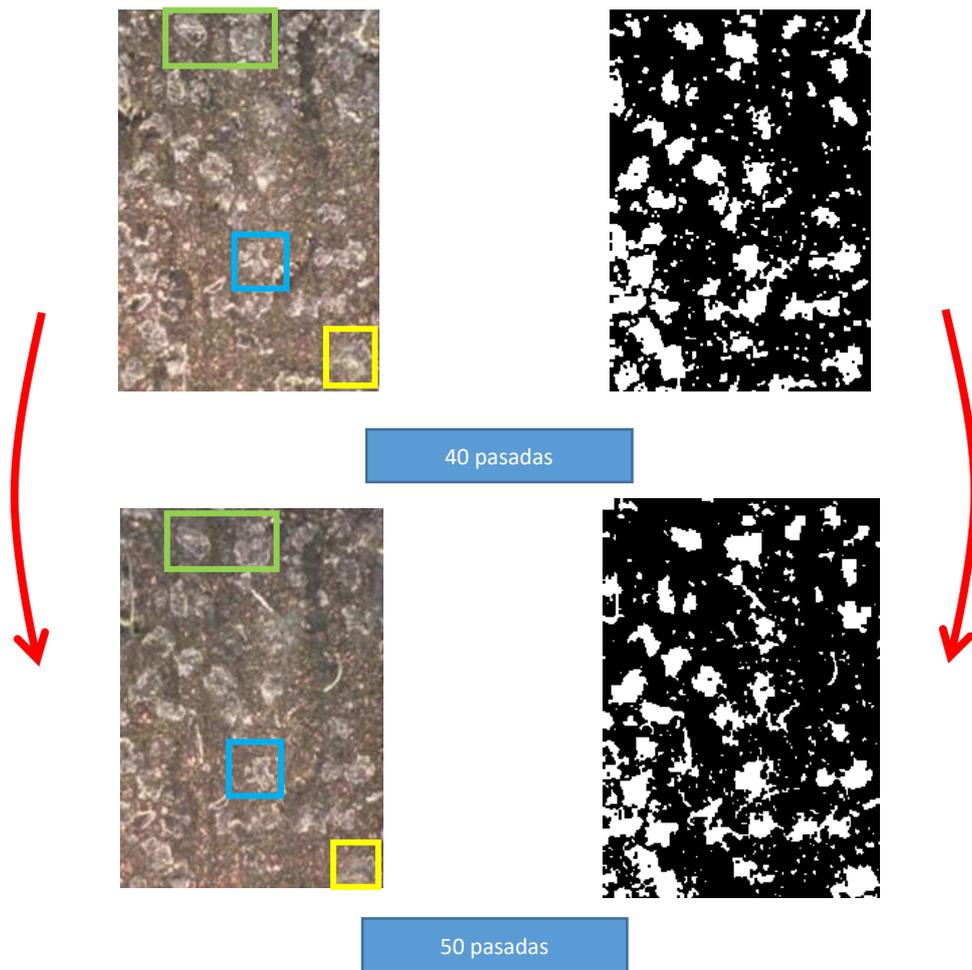


Figura 11.33: Comparativa: 40 pasadas - 50 pasadas (SiC H - 2°)

La concentración de granos en este estado es del 23,24%. Por lo tanto, ha disminuido un 1,69%.

En cuanto a la evaluación de los granos seleccionados, se discute lo siguiente:

- **Zona Azul:**
  - **Grano 1:** Aumenta el tamaño un 18,06%
- **Zona Amarilla:**
  - **Grano 2:** Reduce el tamaño un 4,7%.
- **Zona Verde:**
  - **Grano 3:** Reduce el tamaño un 11,38%.
  - **Grano 4:** Aumenta el tamaño un 17,27%.

#### II.4.6. Análisis de la geometría SiC H - 2°

En este apartado se analiza la geometría del perfil de la muela. Dicho perfil corresponde con la geometría negativa del perfil del grafito.

Para realizar el análisis se estudia la Figura 11.34, donde se pueden ver estado inicial y el posterior a los ensayos. El ángulo de la arista de incidencia previo a los ensayos era de 97,86° y pasa a ser de 140,86°. Teniendo en cuenta que el ángulo teórico es de 90°, se ha pasado de un porcentaje de error de 8,73% a uno de 56,51%. Se ha aumentado la desviación un 47,78%.

En cuanto a la arista que después entra en contacto con la muela, al comienzo de los ensayos disponía de un ángulo de  $90,979^\circ$  y pasa a ser de  $94,42^\circ$ . Teniendo en cuenta que el ángulo teórico es de  $90^\circ$ , se ha pasado de un porcentaje de error de  $1,08\%$  a uno de  $4,91\%$ . Se ha aumentado la desviación un  $3,83\%$ .

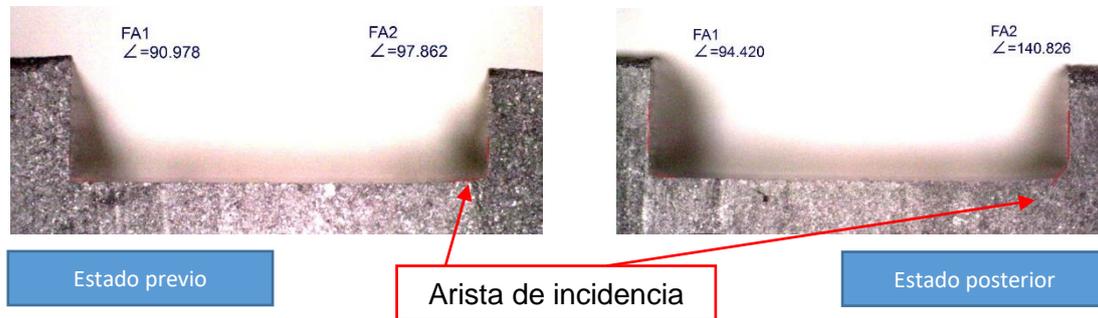


Figura 11.34: Análisis de la geometría SiC H -  $2^\circ$

## II.5. Bloque de ensayos SiC J - $2^\circ$

Este bloque de ensayos corresponde al reperfilado con moletas de carburo de silicio de dureza H y las segundas condiciones, SiC J -  $2^\circ$ . En la Figura 11.35 se puede ver el estado de la superficie de la muela antes de comenzar con los ensayos del bloque. Al mismo tiempo, en la figura viene marcado el sector que se analiza.

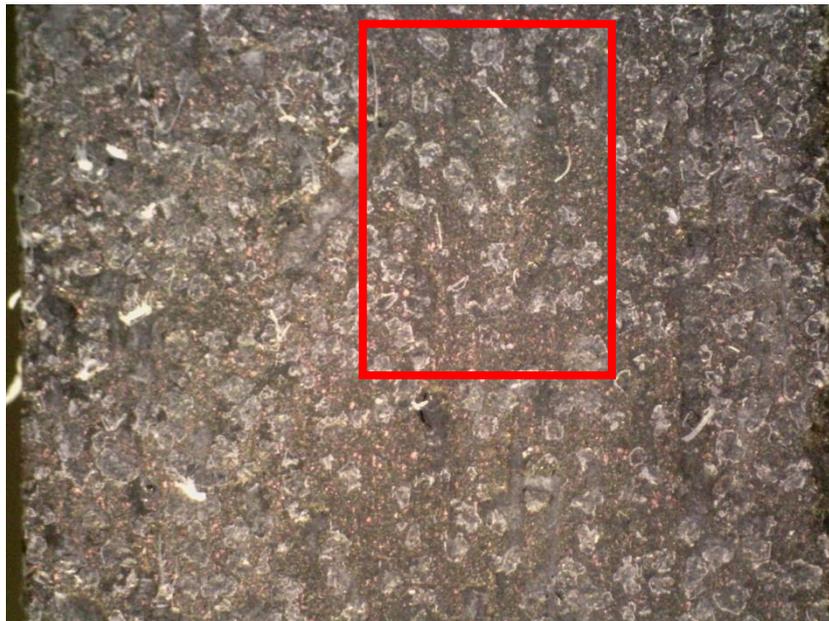


Figura 11.35: Estado inicial de la superficie bloque de ensayos SiC J -  $2^\circ$

El análisis consiste en el seguimiento de varios granos dentro del sector. Se estudia su evolución durante las diferentes pasadas de SiC J -  $2^\circ$ . Además, también se cuantifica y estudia la concentración de granos dentro del sector.

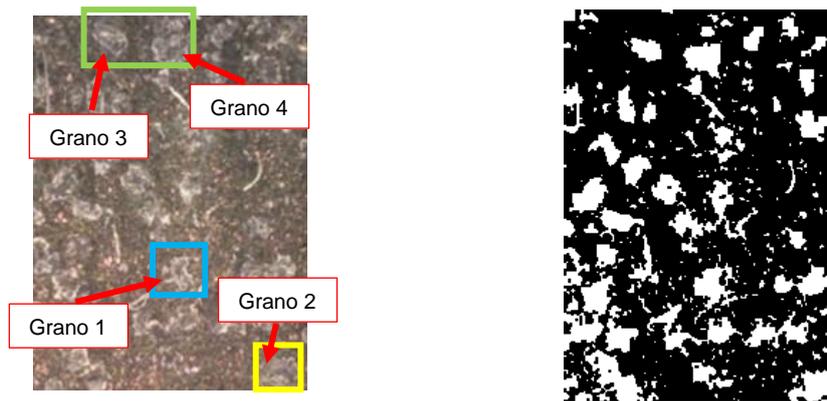


Figura 11.36: Sector de la superficie a analizar SiC J – 2°

La concentración de grano en este estado de la muela es del 23,24%. Los granos a los que se les realiza el seguimiento vienen marcados en la figura, distribuidos en diferentes zonas. Cada zona dispone de un color.

- **Zona Azul:**
  - Grano 1
- **Zona Amarilla:**
  - Grano 2
- **Zona Verde:**
  - Grano 3
  - Grano 4

#### II.5.1. Evaluación de la superficie después de 10 pasadas de SiC J – 2°

En este apartado se compara el estado de la superficie de la muela después de realizar 10 pasadas de SiC J – 2° con el estado inicial. En la Figura 11.37 se pueden ver ambos estados con los granos a analizar marcados.

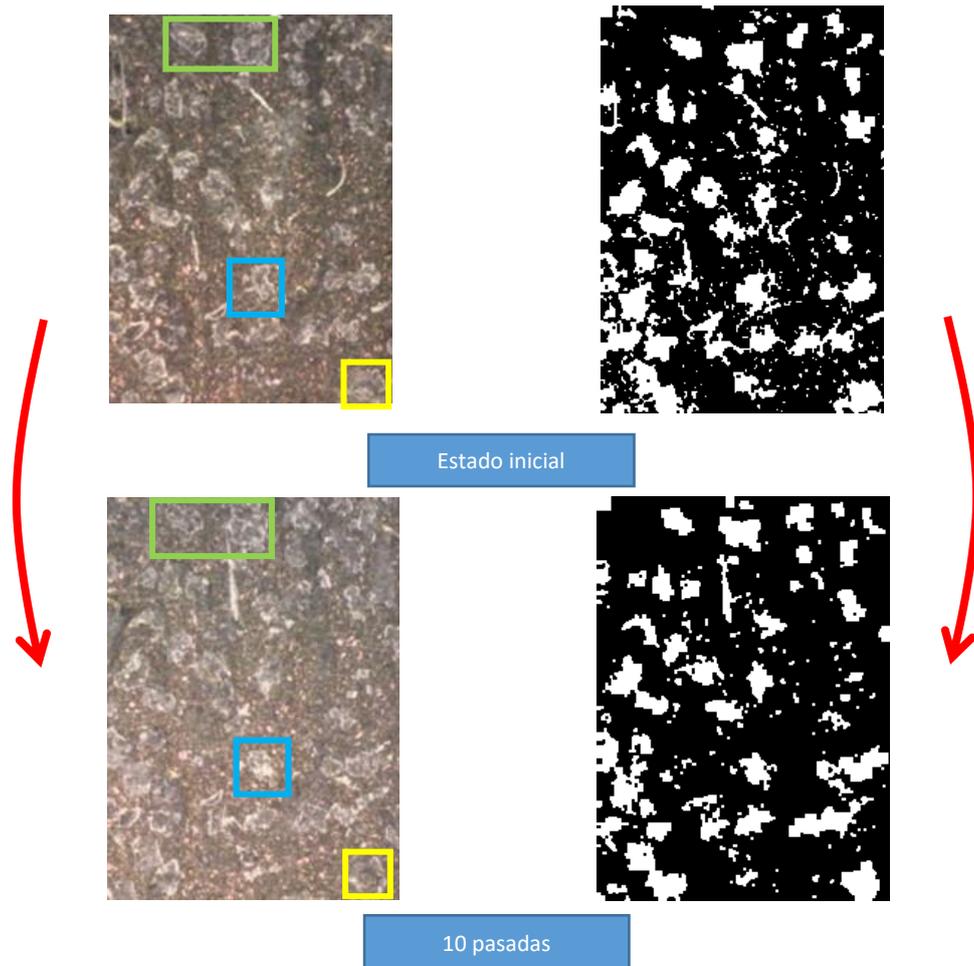


Figura 11.37: Comparativa: Estado inicial - 10 pasadas (SiC J - 2º)

La concentración de granos en este estado es del 20,76%. Por lo tanto, ha disminuido un 2,48%.

En cuanto a la evaluación de los granos seleccionados, se discute lo siguiente:

- **Zona Azul:**
  - **Grano 1:** Reduce el tamaño un 34,44%.
- **Zona Amarilla:**
  - **Grano 2:** Reduce el tamaño un 6,95%.
- **Zona Verde:**
  - **Grano 3:** Aumenta el tamaño un 0,4%.
  - **Grano 4:** Aumenta el tamaño un 0,22%.

### II.5.2. Evaluación de la superficie después de 20 pasadas de SiC J - 2º

En este apartado se compara el estado de la superficie de la muela después de realizar 20 pasadas de SiC J - 2º con el estado anterior. En la Figura 11.38 se pueden ver ambos estados con los granos a analizar marcados.

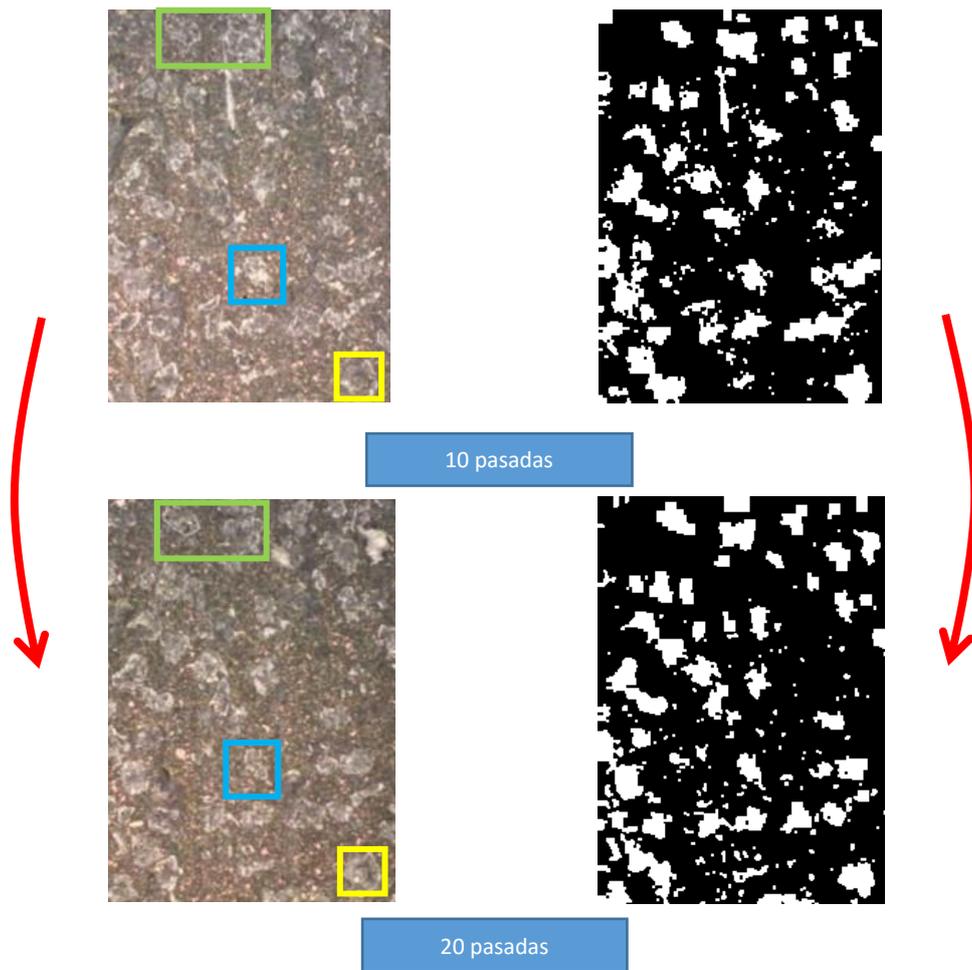


Figura 11.38: Comparativa: 10 pasadas - 20 pasadas (SiC J - 2°)

La concentración de granos en este estado es del 20,9%. Por lo tanto, ha aumentado un 0,14%.

En cuanto a la evaluación de los granos seleccionados, se discute lo siguiente:

- **Zona Azul:**
  - **Grano 1:** Reduce el tamaño un 22,95%.
- **Zona Amarilla:**
  - **Grano 2:** Reduce el tamaño 9,98%.
- **Zona Verde:**
  - **Grano 3:** Aumenta el tamaño un 37,04%.
  - **Grano 4:** Reduce el tamaño un 19,55%.

### II.5.3. Evaluación de la superficie después de 30 pasadas de SiC J - 2°

En este apartado se compara el estado de la superficie de la muela después de realizar 30 pasadas de SiC J - 2° con el estado anterior. En la Figura 11.39 se pueden ver ambos estados con los granos a analizar marcados.

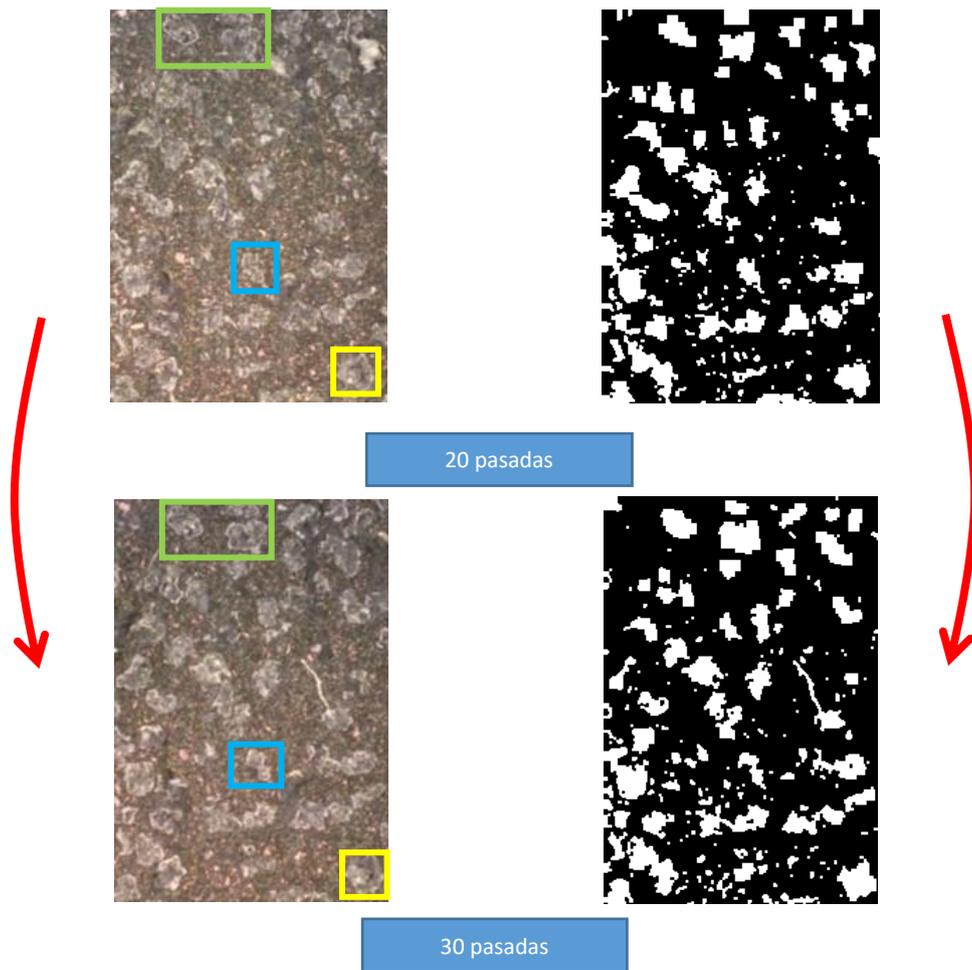


Figura 11.39: Comparativa: 20 pasadas - 30 pasadas (SiC J - 2°)

La concentración de granos en este estado es del 22,2%. Por lo tanto, ha aumentado un 1,3%.

En cuanto a la evaluación de los granos seleccionados, se discute lo siguiente:

- **Zona Azul:**
  - **Grano 1:** Reduce el tamaño un 14,28%.
- **Zona Amarilla:**
  - **Grano 2:** Aumenta el tamaño un 14,12%.
- **Zona Verde:**
  - **Grano 3:** Aumenta el tamaño un 1,62%.
  - **Grano 4:** Aumenta el tamaño un 28,85%.

#### ***II.5.4. Evaluación de la superficie después de 40 pasadas de SiC J - 2°***

En este apartado se compara el estado de la superficie de la muela después de realizar 40 pasadas de SiC J - 2° con el estado anterior. En la Figura 11.40 se pueden ver ambos estados con los granos a analizar marcados.

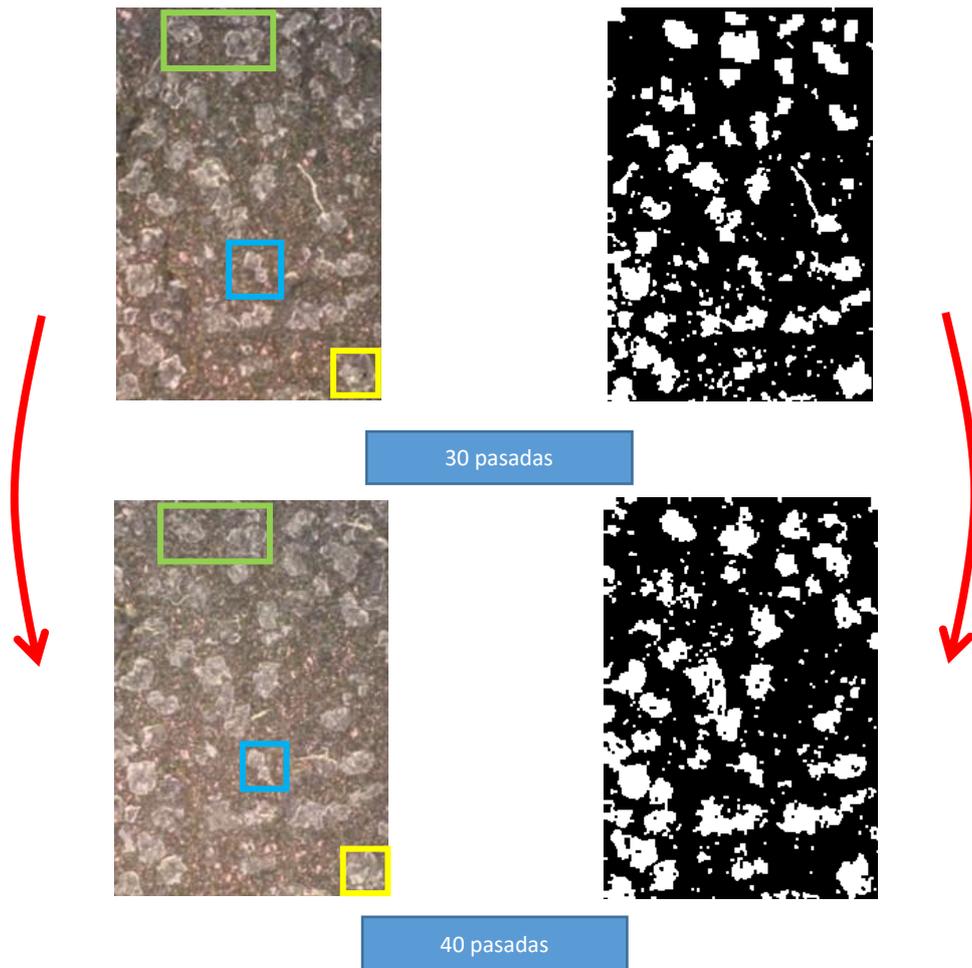


Figura 11.40: Comparativa: 30 pasadas - 40 pasadas (SiC J - 2°)

La concentración de granos en este estado es del 25,91%. Por lo tanto, ha aumentado un 3,71%.

En cuanto a la evaluación de los granos seleccionados, se discute lo siguiente:

- **Zona Azul:**
  - **Grano 1:** Aumenta el tamaño un 22,02%.
- **Zona Amarilla:**
  - **Grano 2:** Aumenta el tamaño un 2,44%.
- **Zona Verde:**
  - **Grano 3:** Aumenta el tamaño un 7,03%.
  - **Grano 4:** Reduce el tamaño un 14,08%.

#### *II.5.5. Evaluación de la superficie después de 50 pasadas de SiC J - 2°*

En este apartado se compara el estado de la superficie de la muela después de realizar 40 pasadas de SiC J - 2° con el estado anterior. En la Figura 11.40 se pueden ver ambos estados con los granos a analizar marcados.

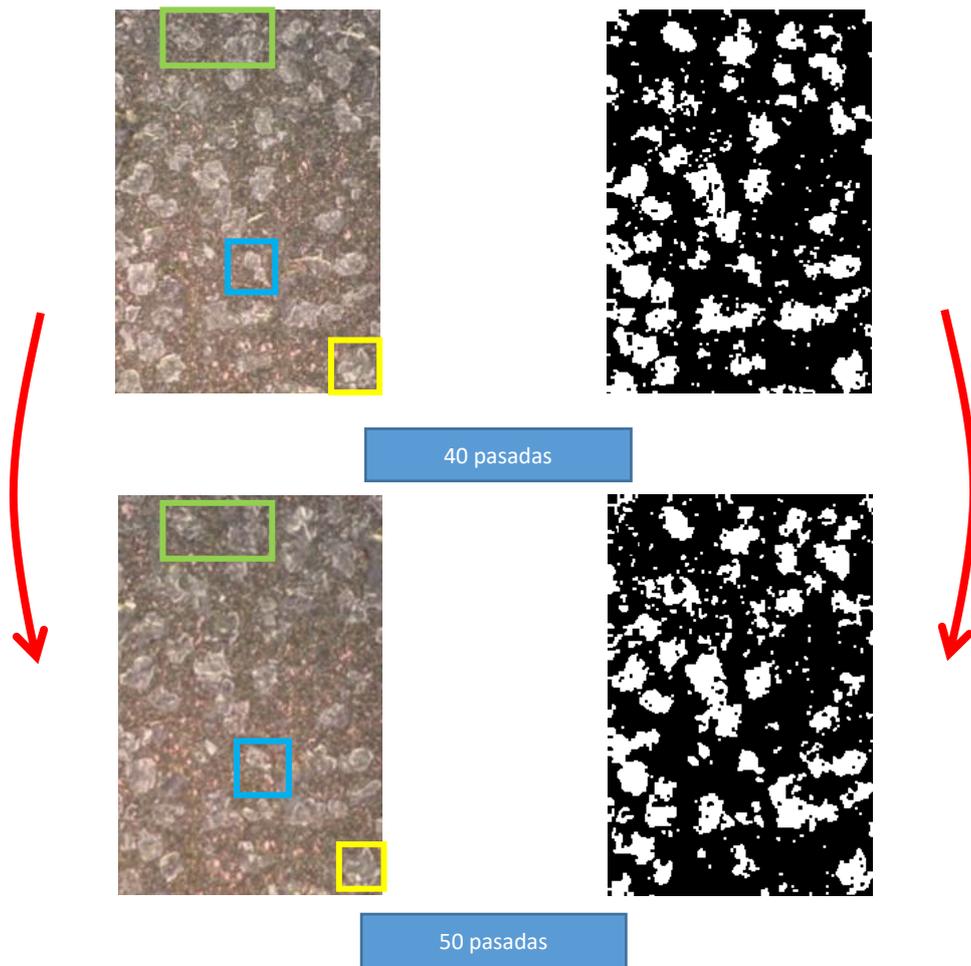


Figura 11.41: Comparativa: 40 pasadas - 50 pasadas (SiC J - 2°)

La concentración de granos en este estado es del 26,46%. Por lo tanto, ha aumentado un 0,55%.

En cuanto a la evaluación de los granos seleccionados, se discute lo siguiente:

- **Zona Azul:**
  - **Grano 1:** Reduce el tamaño un 20,65%.
- **Zona Amarilla:**
  - **Grano 2:** Reduce el tamaño un 2,02%.
- **Zona Verde:**
  - **Grano 3:** Reduce el tamaño un 0,51%.
  - **Grano 4:** Reduce el tamaño un 11,6%.

#### II.5.6. Análisis de la geometría SiC J - 2°

En este apartado se analiza la geometría del perfil de la muela. Dicho perfil corresponde con la geometría negativa del perfil del grafito.

Para realizar el análisis se estudia la Figura 11.42, donde se pueden ver estado inicial y el posterior a los ensayos. El ángulo de la arista de incidencia previo a los ensayos era de 140,86 y pasa a ser de 147,26 °. Teniendo en cuenta que el ángulo teórico es de 90°, se ha pasado de un porcentaje de error de 56,51% a uno de 63,62%. Se ha aumentado la desviación un 7,11%.

En cuanto a la arista que después entra en contacto con la muela, al comienzo de los ensayos disponía de un ángulo de  $94,42^\circ$  y pasa a ser de  $99,87^\circ$ . Teniendo en cuenta que el ángulo teórico es de  $90^\circ$ , se ha pasado de un porcentaje de error de  $4,91\%$  a uno de  $10,97\%$ . Se ha aumentado la desviación un  $6,06\%$ .

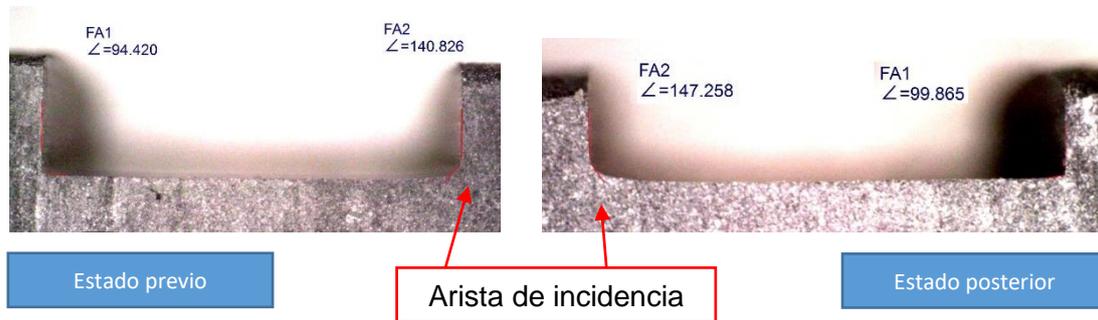


Figura 11.42: Análisis de la geometría SiC J -  $2^\circ$