

TESIS DOCTORAL

**UNA METODOLOGÍA PARA LA MEJORA DEL
PROCESO DE ROSCADO CON MACHO EN
FUNDICIONES DE ALTA RESISTENCIA**

**Presentada por:
Iñigo Elósegui Aldareguía**

**en el
Departamento de Ingeniería Mecánica**

**de la
Universidad del País Vasco – Euskal Herriko Unibertsitatea**

**para la obtención del grado de
Doctor Ingeniero Industrial**

**Dirigida por:
Prof. Dr. D. Luis Norberto López de Lacalle Marcaide**

Bilbao, diciembre de 2017

TESIS DOCTORAL

**UNA METODOLOGÍA PARA LA MEJORA
DEL PROCESO DE ROSCADO CON MACHO
EN FUNDICIONES DE ALTA RESISTENCIA**

Presentada por:

Iñigo Elósegui Aldareguía

en el

Departamento de Ingeniería Mecánica

de la

Universidad del País Vasco – Euskal Herriko Unibertsitatea

para la obtención del grado de

Doctor Ingeniero Industrial

Dirigida por:

Prof. Dr. D. Luis Norberto López de Lacalle Marcaide

Bilbao, diciembre de 2017

AGRADECIMIENTOS

Hace bastante tiempo cuando llegué al departamento de Ingeniería Mecánica siendo director Ernesto García Vadillo y secretario Eduardo Rojí, para ocupar una plaza a tiempo completo no me podía imaginar cómo sería el camino hasta llegar a este punto de presentar el trabajo de defensa de la Tesis Doctoral. Debía de realizarla, pero el cómo ha sido largo, ha tenido dificultades y muchas incertidumbres, pero aquí estamos.

En este largo camino tengo que reconocer que me han ayudado, de una forma o de otra, muchas personas, algunas que ya no están físicamente, pero a las que tengo que agradecer, desde Armando Bilbao, del que tengo una copia de su Tesis, Eduardo Sasía como jefe de taller cuando comenzamos con los ensayos, Endika, Gorka, Ricardo, Rakel, Iñigo y Sergio, alumnos que han realizado los ensayos en el taller, y otras personas que me han facilitado, ayudado, han colaborado, hemos caminado juntos durante algunos tramos y luego hemos seguido cada uno por el nuestro.

Tengo que agradecer al conjunto de compañeros y amigos del departamento, desde los profesores, a las secretarias, por el calor humano, pero en especial a dos compañeros, Unai Alonso por haberme ayudado a desatascarme en un momento crítico, y en especial a Berti, Luis Noberto López de Lacalle, porque en este camino me ha facilitado desde los primeros pasos, hasta la brújula, y ha sido quien más ha confiado, animado, sufrido, desesperado y empujado a lo largo de mucho tiempo hasta ir completándolo.

No puedo dejar de mencionar a mi familia, a Nekane, y algunos amigos que siendo de fuera de la universidad han entendido su importancia y se han interesado y me han animado, en especial a Pedro, Carlos, Sarra, .

Al equipo de Metal Estalki, Ibón y Javier, por las facilidades que me han dado y porque ha sido una gozada colaborar con ellos. También en el mismo sentido al equipo del proyecto de MANUNET, Martin Arft y Dieter Lung del WZL, Roberto Balaso de UFS y Christian Gündisch de Huvershorn, proyecto de colaboración que ha sido central en el trabajo que nos ocupa.

A la buena gente que me ha apoyado y echado una mano en estas etapas, gracias.

RESUMEN

En la búsqueda de los machos de corte más adecuados, que ofrezcan el mejor rendimiento para roscar fundiciones de alta resistencia Austempered Ductile Iron (ADI) en condiciones industriales, se expone el estado del arte del roscado de alto rendimiento, el de los recubrimientos del tipo PVD de las herramientas de corte, el de las preparaciones del filo de corte, y de las propiedades y caracterización de las fundiciones ADI, para comprender su maquinabilidad.

En el método expuesto, otros factores que se plantean son las características de material y geométricas de los machos de corte, las alternativas que hay, y se justifica porqué la elección definida en este caso es la más adecuada para el material y al tipo de agujero a producir. El último factor que se estudia, en los puntos que pueden influir en la operación de roscado, es la máquina en la que se produce, una fresadora vertical. Se repasan los puntos que afectan a la operación de roscado, la rigidez, los acoplamientos y el montaje de la herramienta y el control.

Bajo estas premisas se realizan pruebas comparativas entre machos a los que se aplica diferentes recubrimientos en una primera fase, e introducidas preparaciones superficiales previas y posterior a aplicar el recubrimiento en una segunda fase de ensayos. También se busca el radio de filo óptimo. Para la comparación de los machos se emplean imágenes de los dientes de corte tomadas al microscopio óptico, se mide el par de roscado y en algunos casos, se realiza un análisis de barrido electrónico (SEM).

Además de los factores de dimensiones micrométricas que influyen y han sido mencionados, hay otros relacionados con la máquina fresadora, el montaje de la herramienta hasta el cabezal y con el propio material, la fundición ADI empleada, que intervienen de manera relevante y pueden condicionar los resultados de las pruebas. Así se rosca en otra fresadora vertical en condiciones de montaje de la herramienta similares y se obtienen resultados diferentes. Surge un punto relevante en el roscado, la sincronización del movimiento del cabezal a lo largo de un ciclo de roscado, para estudiarlo en una de las fresadoras se ensayan distintas condiciones de roscado y se monitorizan los esfuerzos para comprender y obtener conclusiones. También se comparan las condiciones cinemáticas de las dos fresadoras, porque se a pesar de asignar la misma velocidad ésta es distinta y se obtienen resultados diferentes en los ensayos a vida de machos iguales.

Otro factor clave en estos ensayos es el propio material ADI que por ser una fundición de hierro aleada tratada térmicamente ofrece características mecánicas dispersas, que afectan a la vida de los machos de roscar. La dispersión en el comportamiento del material es corroborada con una prueba de roscado realizada en condiciones industriales en las instalaciones de una conocida empresa productora de aero generadores.

El conjunto de pruebas y ensayos se ha realizado en paralelo con el centro del WZL en Aachen (Alemania) y en colaboración con el fabricante de machos de roscar UFS (Italia), de recubrimientos Metal Estalki Platit® (España) y el proveedor de fundiciones ADI Huvershorn (Alemania), dentro de un proyecto MANUNET.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN AL ROSCADO	1.1
1.1 TIPOS DE ROSCADO	1.6
1.1.1 Roscado con macho de roscar	1.6
1.1.2 Descripción del proceso de roscado con macho de corte.....	1.8
1.1.3 Roscado por laminación o prensado de roscas.....	1.8
1.1.4 Roscado con fresa de roscar o roscado orbital	1.10
1.2 FUNDICIONES DE ALTA RESISTENCIA ADI	1.12
1.3 ROSCADO CON MACHO DE LAS FUNDICIONES ADI	1.15
2. EL ESTADO DEL ARTE	2.1
2.1 INTRODUCCIÓN	2.1
2.2 ROSCADO DE ALTO RENDIMIENTO CON MACHO	2.2
2.3 RECUBRIMIENTOS PVD	2.5
2.4 PREPARACIONES SUPERFICIALES DEL FILO DE CORTE.....	2.10
2.4.1 Las preparaciones superficiales previas o pretratamiento.....	2.10
2.4.2 Postratamiento después del recubrimiento.....	2.13
2.4.3 Efecto de la microgeometría	2.14
2.5 LAS FUNDICIONES ADI	2.15
2.5.1 Las fundiciones ADI	2.15
2.5.2 Maquinabilidad de los ADI y del ADI-900.....	2.18
2.6 CONCLUSIONES	2.22
3. UN MÉTODO PARA LA MEJORA DEL ROSCADO	3.1
3.1 INTRODUCCIÓN	3.1
3.2 LA HERRAMIENTA: EL MACHO DE ROSCAR.....	3.1
3.2.1 Sustrato del macho	3.2
3.2.2 Geometría del macho de roscar.....	3.3
3.2.3 Refrigeración y lubricación.....	3.7
3.2.4 Recubrimientos	3.8
3.2.5 Equipo de aplicación del recubrimiento de Platit®	3.10
3.2.6 Preparaciones superficiales previas y posteriores al recubrimiento.....	3.11
Se realizan antes del tratamiento térmico, después de realizarlo y también en este punto se incluye la preparación micrométrica del radio de filo.	3.11
3.2.6.1 El pretratamiento de la herramienta antes de recubrir	3.11
3.2.6.2 El postratamiento de la herramienta recubierta	3.13
3.2.6.3 Microgeometría	3.14
3.3 LA MÁQUINA: FRESADORA VERTICAL	3.15
3.3.1 Rigidez en el roscado	3.16
3.3.2 Estructura y el accionamiento del husillo	3.17
3.3.3 Montaje del cabezal.....	3.19
3.3.4 El acoplamiento de la herramienta al cabezal	3.20
3.3.5 Tipos de acoplamientos al portaherramientas	3.21

3.3.5.1 Directo y rígido.....	3.22
3.3.5.2 Dispositivo de compensación axial	3.22
3.3.5.3 Acoplamientos de autoinversión	3.23
3.3.6 Montaje de la herramienta en el acoplamiento.....	3.24
3.3.7 Medición de la rigidez.....	3.24
3.3.8 El Control Numérico	3.25
3.3.9 La influencia de la cinemática en el roscado	3.26
3.3.10 Otras características que afectan al a calidad del roscado.....	3.26
3.3.11 El taladrado previo	3.27
3.3.12 Tolerancias del roscado.....	3.29
3.3.13 Secuencia de operación en el proceso de rosado con macho de corte	3.29
3.4 EL MATERIAL: FUNDICIONES ADI-900.....	3.32
4. ENSAYOS Y MEDIOS EMPLEADOS	4.1
4.1 INTRODUCCIÓN	4.1
4.2 MATERIAL ADI-900	4.2
4.3 MACHOS PARA ROSCAR ADI-900	4.2
4.3.1 Sustrato del macho	4.2
4.3.2 Geometría de los machos de roscar.....	4.3
4.3.3 Refrigeración y lubricación.....	4.4
4.3.4 El recubrimiento del macho de corte para roscar ADI-900	4.5
4.4 MODOS Y MEDIOS PARA COMPARAR LOS MACHOS	4.6
4.4.1 Microscopio óptico Mitutoyo 176-808A®	4.6
4.4.2 Sistema de medición del par Artis DDU4®.....	4.7
4.4.3 Microscopio Electrónico de Barrido (SEM) Hitachi S-4800®.....	4.10
4.4.4 El microscopio óptico Leica Z6 APO®	4.11
4.5 PRIMERA FASE DE ENSAYOS	4.12
4.5.1 Imágenes al microscopio.....	4.12
4.5.2 Comparación del desgaste V_B	4.14
4.5.3 Comparación del par medio	4.15
4.5.4 Imágenes al SEM	4.16
4.5.5 Análisis espectral	4.17
4.5.6 Conclusiones a los primeros ensayos.....	4.19
4.6 SEGUNDA FASE DE ENSAYOS.....	4.20
4.6.1 Comparación del desgaste V_B	4.20
4.6.2 Comparación del par medio	4.21
4.6.3 Imágenes al SEM	4.22
4.6.4 Conclusiones a los segundos ensayos	4.23
4.6.5 Mejoras superficiales en los machos.....	4.24
4.7 ENSAYOS DE MACHOS MEJORADOS CON PREPARACIONES SUPERFICIALES	4.25
4.7.1 Imágenes al SEM del recubrimiento de machos nuevos.....	4.25
4.7.2 Comparación de desgastes y de par	4.26
4.8 ENSAYOS DE LA FRESADORA.....	4.27

4.8.1 Rigidez en el roscado	4.27
4.8.2 Montaje del cabezal.....	4.28
4.8.3 Acoplamiento de la herramienta al cabezal.....	4.28
4.8.4 El tipo de acoplamiento al portaherramientas	4.28
4.8.5 Montaje de la herramienta en el acoplamiento.....	4.29
4.8.6 Montaje del acoplamiento para el taladrado previo	4.31
4.8.7 Mediciones de la precisión.....	4.32
4.8.8 El Control Numérico	4.32
4.9 MEDICIONES DE LA RIGIDEZ Y DE LA SINCRONIZACIÓN DE LA FRESADORA.....	4.33
4.9.1 La mesa Kistler para medición de esfuerzos en XY y en Z.....	4.33
4.9.2 Medición de la rigidez en X e Y	4.35
4.9.3 Medición de la rigidez axial en Z.....	4.36
4.9.4 Medición de la rigidez en Z en el roscado rígido.....	4.37
4.9.5. Rigidez en Z con el dispositivo de compensación axial (Softsynchro®) ..	4.39
4.9.6 Comparación de esfuerzos en Z entre roscado rígido y con el sistema de compensación axial (Softsynchro®)	4.40
4.9.7 Efecto de la velocidad en la falta de sincronización	4.41
4.9.8 Comparación entre el roscado rígido y el roscado con un dispositivo de compensación axial en el ciclo completo a velocidades de corte de 1 m/min y 10 m/min, sobre ADI-1000 y F-1252.....	4.42
4.9.8.1 Roscado de ADI-1000	4.43
4.9.8.2 Roscado de F-1252	4.46
4.9.9 Sincronización entre el paso del cabezal y el paso del macho.....	4.48
4.9.10 Conclusiones al estudio de la rigidez en Z y de la sincronización.....	4.49
4.10 INFLUENCIA DE LA CINEMÁTICA EN EL ROSCADO	4.50
4.10.1 Cinemática de la fresadora Kondia A6®	4.51
4.10.2 Cinemática de la fresadora Ibarria ZV 25/ U600®	4.52
4.11 LA EVOLUCIÓN DEL PAR EN EL ENSAYO A VIDA.....	4.54
4.12 ENSAYOS DEL MATERIAL ADI	4.56
4.12.1 La dispersión de la dureza en el ADI.....	4.57
4.12.2 La medición de la microdureza Vickers.....	4.57
4.12.2.1 La medición de la microdureza en el ADI-1000	4.57
4.12.2.2 La medición de la microdureza en el ADI-900	4.58
4.12.3 La medición de la dureza Brinell	4.59
4.12.3.1 La medición de la dureza en el ADI-800.....	4.59
4.12.3.2 La medición de la dureza en el ADI-1000.....	4.60
4.12.3.3 La medición de la dureza en el ADI-900.....	4.60
4.12.3.4 Conclusión al estudio de las durezas	4.61
4.12.4 Análisis de la microestructura del ADI-900.....	4.61
4.12.5 Conclusiones al análisis del material ADI-900.....	4.63

4.13 ENSAYO INDUSTRIAL DE ROSCADO DE ADI-1000 EN GAMESA.....	4.63
4.13.1 Pruebas en Gamesa	4.64
4.13.2 Conclusiones a la prueba industrial:	4.66
5. RESULTADOS Y CONCLUSIONES	5.1
5.1 EL MACHO DE ROSCAR. CONCLUSIONES	5.1
5.2 LA FRESADORA	5.1
5.2.1 Conclusión al estudio de la rigidez en Z y de la sincronización	5.1
5.2.2 Conclusiones al estudio cinemático de las fresadoras.....	5.2
5.3 LAS FUNDICIONES ADI. CONCLUSIONES.....	5.3
5.4 LA PRUEBA INDUSTRIAL. CONCLUSIONES	5.4
6. APORTACIONES Y LÍNEAS FUTURAS	6.1
6.1 APORTACIONES	6.1
6.2 LINEAS FUTURAS	6.2
7. REFERENCIAS	7.1

FIGURAS

Figura 1.1: Despiece de un automóvil (BMW®)	1.1
Figura 1.2: Conjunto de un molino eólico y componentes atornillados (Siemens Gamesa®).....	1.2
Figura 1.3: Roscado con macho	1.3
Figura 1.4: Diferentes tipos de viruta en el roscado con macho (Fuente: Walter Prototyp®)	1.4
Figura 1.5: Aspectos generales en la mecanización de piezas desarrollados en la Introducción.....	1.6
Figura 1.6: Macho de roscar	1.7
Figura 1.7: Sección roscada con macho de roscar con ángulo de hélice.....	1.8
Figura 1.8: Distintos perfiles frontales de machos de laminación (Fuente: [Fer15])....	1.9
Figura 1.9: Flujo del grano en roscas mecanizadas (izq.) y laminadas (der.)	1.10
Figura 1.10: Roscado con fresa o roscado orbital	1.11
Figura 1.11: Ejemplo de piezas de ADI empleadas en automoción.....	1.13
Figura 1.12: Soporte de suspensión, coronas y piñones industriales.....	1.13
Figura 1.13: Piezas de grados elevados de ADI, de obras y de industria eólica	1.13
Figura 1.14: Desgaste de ruedas de ferrocarril para distintos materiales	1.14
Figura 1.15: Peso por unidad de resistencia para distintos materiales	1.14
Figura 1.16: Mapa de Resistencia y Ductilidad de diferentes materiales férricos (Fuente: ADI Treatments®).....	1.15
Figura 2.1: Aspectos que se desarrollan en este capítulo sobre fondo remarcado	2.1
Figura 2.2: Esquema de instalaciones de aplicación de los recubrimientos PVD (Fuente: Metal Estalki®)	2.6
Figura 2.3: Estructuras de recubrimiento PVD: a) Monocapa y monocomponente, b) Monocapa multicomponente, c) Multicapa, d) Gradiente, e) Nanocapa, f) Nanocomposites (Fuente: Platit®)	2.7

Figura 2.4: Efecto de la adición del silicio. Se distribuyen y segregan las partículas duras en la matriz de Si ₃ N ₄ (Fuente: Platit®)	2.8
Figura 2.5: Sucesión de operaciones sobre la herramienta de corte	2.10
Figura 2.6: Filo de corte antes y después de la preparación superficial [Cor09]	2.11
Figura 2.7: Cambio del radio de filo y de la rugosidad por el tratamiento de filo [Cor09]	2.12
Figura 2.8: Fragilidad del recubrimiento por el aumento de las tensiones superficiales	2.12
Figura 2.9: Efecto del redondeo del filo en el aumento de las fuerzas de corte	2.13
Figura 2.10: Modificación del sustrato por el micro chorreado (Fuente: [Bou12])	2.13
Figura 2.11: Radio de filo óptimo en el fresado de acero X166 Cr Mo 12-1 (Fuente: Platit®)	2.14
Figura 2.12: Radio de filo óptimo [Cor09].....	2.15
Figura 2.13: Diagrama de Austemperización (austenización y temple).....	2.17
Figura 2.14: Microestructura de ADI-900.....	2.18
Figura 2.15: Maquinabilidad del ADI-850 frente a otras fundiciones dúctiles y acero	2.18
Figura 2.16: Viruta segmentada de ADI y gráfica con las fuerzas de corte oscilantes (Informe interno del WZL®).....	2.19
Figura 2.17: Mecanismos de desgaste y criterio de rotura (Informe interno del WZL®)	2.21
Figura 2.18: Comparación de vida de la herramienta en seco y con refrigerante (Informe interno del WZL®).....	2.22
Figura 3.1: Los puntos que se desarrollan en el capítulo.....	3.1
Figura 3.2: Esquema de las características del macho de roscar	3.2
Figura 3.3: Macho de M8. Detalle de la punta: dientes y ángulo de chaflán y paso.....	3.3
Figura 3.4: Relación del Par y de Fuerzas en el roscado con macho (Fuente: Walter Prototyp®).....	3.4
Figura 3.5: Sección transversal de roscado con la formación de la viruta y detalle de la punta de chaflán.....	3.5
Figura 3.6: Arranque del material por los sucesivos dientes de punta	3.5
Figura 3.7: Carga por diente en función del número de dientes de chaflán y del ángulo de punta	3.6
Figura 3.8: Detalle de los ángulos de incidencia, de desprendimiento y de la zona de alivio	3.6
Figura 3.9: Corte de la viruta al llegar al final del roscado y comenzar la inversión del giro.....	3.7
Figura 3.10: Instalación de recubrimiento Platit π80®	3.10
Figura 3.11: Instalación con cátodos laterales y carrusel de herramientas rotativo LARC de Platit®.....	3.10
Figura 3.12: Esquema de funcionamiento de los equipos de recubrimiento PVD. (Fuente. Platit®)	3.11
Figura 3.13: Tensiones residuales y marcas del rectificado iniciadoras de la delaminación del recubrimiento.....	3.12

Figura 3.14: Equipos de pretratamiento superficial de herramientas de pulido orbital (drag grinding) (Fuente: OTEC®)	3.12
Figura 3.15: Pequeñas gotas de recubrimiento (droplets) procedentes del proceso de PVD	3.13
Figura 3.16: Tecnologías de las preparaciones superficiales previas y postratamiento (Fuente: Platit®)	3.14
Figura 3.17: Representación del radio de filo	3.15
Figura 3.18: Ensayos y Mediciones realizados en la fresadora	3.16
Figura 3.19: Elementos que intervienen en la rigidez del conjunto y esquema equivalente (Fuente: [Uri06])	3.17
Figura 3.20: Nomenclatura de los ejes de la fresadora	3.17
Figura 3.21: Tipos de accionamiento: a) motor exterior al husillo, b) motor directo a husillo, c) electro-mandrino (Fuente: Ibarria®)	3.18
Figura 3.22: Esquema de la transmisión del movimiento vertical tipo del cabezal	3.19
Figura 3.23: Esquema de las configuraciones de montaje del cabezal más empleadas (Fuente: [Lop09])	3.19
Figura 3.24: Zonas de comportamiento estable e inestable en función del espesor y de la velocidad (Fuente: [Lop09])	3.20
Figura 3.25: Acoplamientos al cabezal: Conos ISO y HSK	3.21
Figura 3.26: Tipos de acoplamiento: (a) rígido, (b) con dispositivo de compensación axial y (c) con acoplamiento de autoinversión	3.22
Figura 3.27: Mandril de compensación axial y detalle del muelle interno (Fuente: Walter Prototyp®)	3.23
Figura 3.28: Control de Sincronización para roscado rígido en lazo cerrado	3.25
Figura 3.29: Backlash y sistema de medición indirecto	3.27
Figura 3.30: Desalineamiento entre los ejes del macho y del agujero	3.27
Figura 3.31: Representación del runout	3.28
Figura 3.32: Área de endurecimiento del material próxima al agujero taladrado	3.28
Figura 3.33: Tolerancias del agujero roscado, del macho y de los pasa no-pasa para M8 H6	3.29
Figura 3.34: Posicionamiento del macho frente al agujero a) embocado, b) a cierta distancia de seguridad	3.30
Figura 3.35: Al comienzo del roscado el emboque de los primeros dientes de chaflán	3.30
Figura 3.36: Durante la carrera de roscado a lo largo del agujero	3.31
Figura 3.37: Al ir llegando al final del agujero	3.31
Figura 3.38: En el punto inferior de final de la carrera	3.31
Figura 3.39: La salida del macho por el agujero tallado, a) manualmente con un esfuerzo reducido, y b) con valores similares a los de entrada	3.32
Figura 3.40: Ensayos y mediciones realizados en el material ADI	3.33
Figura 4.1: Dimensiones y bloques de ADI-900 empleados	4.2
Figura 4.2: Macho de M8 empleado. Detalle de la punta: dientes y ángulo de chaflán y paso de la rosca	4.3

Figura 4.3: Macho de 4 dientes, de canales rectos, ángulo de desprendimiento de 0° y agujero axial para lubricación.....	4.4
Figura 4.4: Detalle de los ángulos de incidencia, de desprendimiento y de la zona de alivio.....	4.4
Figura 4.5: Viruta de ADI, muy corta y fragmentada	4.5
Figura 4.6: Detalle de los dientes de chaflán, del 1er diente de diámetro nominal y la medida de VB obtenidos	4.7
Figura 4.7: Detalle de los dientes de chaflán y los activos durante la rosca y diagrama del par de roscado, al roscar y al invertir el sentido de giro (Fuente: propia y Emuge®)...	4.8
Figura 4.8: Montaje del sistema de medición rotor- estátor (Artis®)	4.9
Figura 4.9: Elementos del sistema Artis DDU4® (Fuente: Emuge®)	4.9
Figura 4.10: Señal de par en el roscado y en la salida del macho y el par medio	4.10
Figura 4.11: Imágenes y espectrometría obtenidas con el microscopio de barrido electrónico Hitachi S-4800®,	4.11
Figura 4.12: Microscopio Leica Z6 APO®, evolución del desgaste y radios de filo. 4.11	
Figura 4.13: Imágenes de las caras de desprendimiento y de incidencia de los primeros dientes, por tipo de recubrimiento	4.13
Figura 4.14: Detalle de los primeros dientes después de realizar 108 roscas.....	4.14
Figura 4.15: Comparación del desgaste de flanco medio por recubrimiento a las 54 y 108 roscas	4.15
Figura 4.16: Comparación del par medio por recubrimiento hasta 108 roscas	4.15
Figura 4.17: Imágenes al microscopio electrónico de la cara de incidencia del AlTiN. Aumentos: x50, x500, x2000.....	4.16
Figura 4.18: Imágenes al microscopio electrónico de la cara de desprendimiento del AlTiN. Aumentos: x50, x500	4.17
Figura 4.19: Imágenes al microscopio electrónico de la cara de incidencia del AlTiSiN-G. Aumentos: x50, x500, x2000.....	4.17
Figura 4.20: Análisis espectral EDX de la cara de incidencia.....	4.18
Figura 4.21: Imágenes al microscopio electrónico de la cara de desprendimiento del AlTiSiN-G. Aumentos: x50, x200, x500.....	4.18
Figura 4.22: Comparación de los desgastes de flanco medios por recubrimiento hasta 216 roscas	4.21
Figura 4.23: Comparación del par medio de roscado por cada recubrimiento hasta 216 roscas	4.21
Figura 4.24: Imágenes de la cara de desprendimiento y detalle de los fillos por recubrimiento. Aumentos: x50 y x500	4.22
Figura 4.25: Imágenes de la cara de incidencia y detalle de los fillos por recubrimiento. Aumentos: x50, x500.....	4.23
Figura 4.26: Delaminación en la parte trasera del diente y modificación del chamfer relief (zona de alivio) en un diente nuevo.....	4.24
Figura 4.27: Radio de redondeo menor con el que no se produce desconchado del recubrimiento.....	4.25
Figura 4.28: Machos nuevos recubiertos con AlTiSiN-G (a) sin preparación, (b) con preparaciones superficiales.....	4.26

Figura 4.29: Evolución del par medio y del desgaste según la preparación.....	4.27
Figura 4.30: Dispositivo de compensación axial Softsynchro 3® y detalle (Fuente: Emuge)	4.29
Figura 4.31: Montaje para roscado rígido con el adaptador HSK y con la anilla del Artis DDU®	4.30
Figura 4.32: Montaje de elementos que intervienen en el roscado con compensación axial	4.30
Figura 4.33: Portaherramientas y boquilla hidráulica calibrada.....	4.31
Figura 4.34: Bloque de ADI con agujeros roscados.....	4.32
Figura 4.35: Roscado sobre la mesa dinamométrica Kistler 9255B®	4.33
Figura 4.36: Mesa dinamométrica Kistler 9255B® y sistema de adquisición de datos (Fuente: Kistler).....	4.34
Figura 4.37: Señales de Par obtenidas con los sistemas Artis® y Kistler® al producir la misma rosca	4.35
Figura 4.38: Fuerza en 6 desplazamientos en XY	4.36
Figura 4.39: Fuerza axial en el roscado + Desplazamientos del cabezal de 0,1 mm (4 Tracción +4 Compresión).....	4.37
Figura 4.40: Fuerza axial en el roscado de 10 mm + Desplazamientos de 0,1 mm (4 Compresión +4 Tracción).....	4.38
Figura 4.41: Fuerza axial en roscado con compensación axial de 10mm + Desplazamientos de 0,1mm (5Compresión + 5Tracción)	4.40
Figura 4.42: Fuerza axial en roscado rígido y con dispositivo de compensación axial	4.41
Figura 4.43: Fuerza axial en roscado rígido a distintas velocidades	4.42
Figura 4.44: Fuerza axial y par en roscado rígido y con dispositivo de compensación axial a $V_c=1$ m/min	4.43
Figura 4.45: Fuerza axial y par en roscado rígido y con dispositivo de compensación axial a $V_c=10$ m/min	4.44
Figura 4.46: Rotura de dos machos al roscar en rígido con las instrucciones G84 y G63 a $V_c=10$ m/min	4.45
Figura 4.47: Macho de M8 para roscar F-1252	4.46
Figura 4.48 Ejemplo de viruta embotada en el macho, al roscar acero dúctil F-1252	4.46
Figura 4.49: Fuerza axial y par en roscado rígido y con dispositivo de compensación axial a $V_c=10$ m/min	4.47
Figura 4.50: Fuerza axial en roscado rígido según el avance.....	4.49
Figura 4.51: Número de roscas realizadas por dos machos sobre ADI-900 en la Kondia A6®	4.51
Figura 4.52: Señal del osciloscopio, muestra la velocidad de giro (rojo) y la posición del cabezal en Z (rosa) de la fresadora Kondia A6®	4.51
Figura 4.53: Imagen del osciloscopio que muestra el cambio de la velocidad de corte en la fresadora Ibarria®	4.52
Figura 4.54: Evolución del valor del par medio desde la rosca 1 hasta la 996.....	4.55
Figura 4.55: Secuencia tipo de señales de par al roscar sucesivos agujeros	4.55

Figura 4.56: Las tres señales de par, en la rosca 1, la 996 y la 997 cuando se rompe el macho	4.56
Figura 4.57: Bloques de material ADI-900 y ADI-1200.....	4.57
Figura 4.58: Los puntos de toma de microdurezas.....	4.58
Figura 4.59: Sección, detalle entre dos roscas y puntos en que se miden las microdurezas	4.58
Figura 4.60: Rango de valores de las microdurezas tomadas en 20 puntos	4.59
Figura 4.61: Durezas y pares medios de 432 agujeros roscados	4.61
Figura 4.62: Rango de durezas y valor mínimo de la norma EN-1564 para el ADI-900 (280 HB).....	4.61
Figura 4.63: Microestructura de ADI en, a) se aprecian los nódulos de grafito y la ferrita filiforme con la austenita. En b) la microestructura no se corresponde con la de los ADI.	4.62
Figura 4.64: Puntos representativos de dónde se miden las durezas	4.63
Figura 4.65: Muestra de los machos de roscar ensayados, de M52 y M8.....	4.64
Figura 4.66: Número de roscas realizadas en la prueba en Gamesa.....	4.65
Figura 4.67: Detalle del desgaste en la cara de desprendimiento y el brillo en la cara de incidencia.....	4.66

TABLAS

Tabla 2.1: Especificaciones de las fundiciones ADI s/ normas ASTM y EN	2.16
Tabla 3.1: Propiedades mecánicas de los recubrimientos empleados (Fuente: Metal Estalki®).....	3.9
Tabla 4.1: Condiciones cinemáticas y de vida de los machos en las dos fresadoras...	4.53

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN AL ROSCADO

Entre los diversos modos que hay para unir y fijar piezas para formar conjuntos y máquinas se emplean las uniones permanentes (por soldadura, remachado, pegado,) y las desmontables (como las atornilladas, o a presión,). Entre estas últimas, tienen especial relevancia por su volumen, universalidad, estandarización y particularidad las que se realizan por atornillamiento, que permiten realizar uniones desmontables y reversibles entre elementos. En este trabajo se estudia la producción de roscas sobre una pieza, una de las operaciones necesarias para facilitar las uniones.

Entre los muchos ejemplos de conjuntos de piezas y de subconjuntos, en los que las uniones se realizan por atornillamiento y requieren de la realización de roscas se encuentra el despiece de un automóvil de la Figura 1.1:



Figura 1.1: Despiece de un automóvil (BMW®)

Otro ejemplo son los componentes de un molino eólico, cuyas piezas son de dimensiones mucho mayores en que muchas uniones se realizan por atornillamiento como puede apreciarse en la imagen de la Figura 1.2:

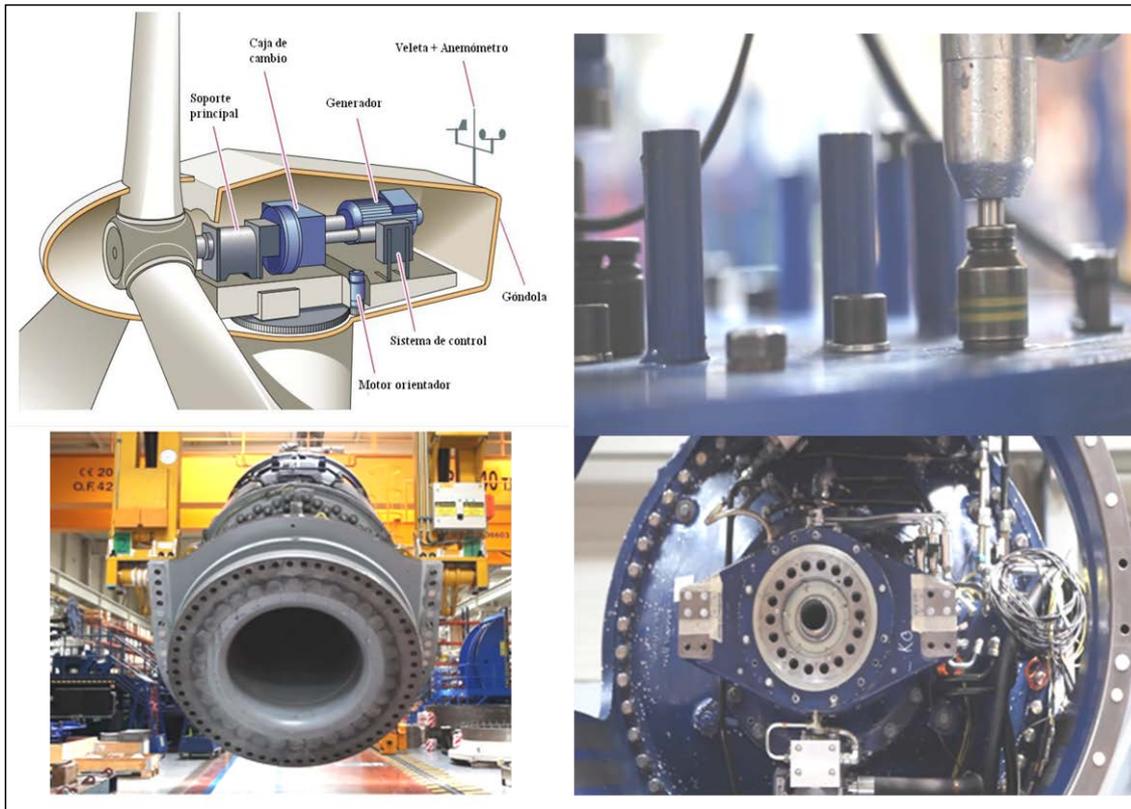


Figura 1.2: Conjunto de un molino eólico y componentes atornillados (Siemens Gamesa®)

Una muestra de la importancia del roscado, es el volumen de elementos de fijación que, por ejemplo, en Europa en el año 2008 se produjeron 2.060.000 Tm de piezas de fijación y el volumen de su comercio fue de 3.010.000 Tm (añadidas importaciones y exportaciones).

La operación de roscado consiste en el tallado de un perfil helicoidal, en general de sección triangular, sobre una superficie cilíndrica, cuya función es permitir la sujeción de dos elementos complementarios, en el que uno tiene el perfil exterior como en los tornillos y el otro el complementario interior como las tuercas.

Además de la función de unión, los tornillos son conocidos también para transporte, y movimiento por ejemplo, el tornillo de Arquímedes datado en el 300 a.C. Pero en esta tesis interesa el roscado para uniones atornilladas, que también son conocidas desde hace cientos de años. A pesar de ser una operación madura, sobre la que puede parecer que está todo estudiado, por ser una de las operaciones de mecanizado más complejas, aún hay campo para su análisis y mejora. Sobre todo, en el caso de la producción de las roscas interiores, porque en el mismo espacio concurren la formación de un perfil helicoidal y la evacuación de la viruta que se forma.

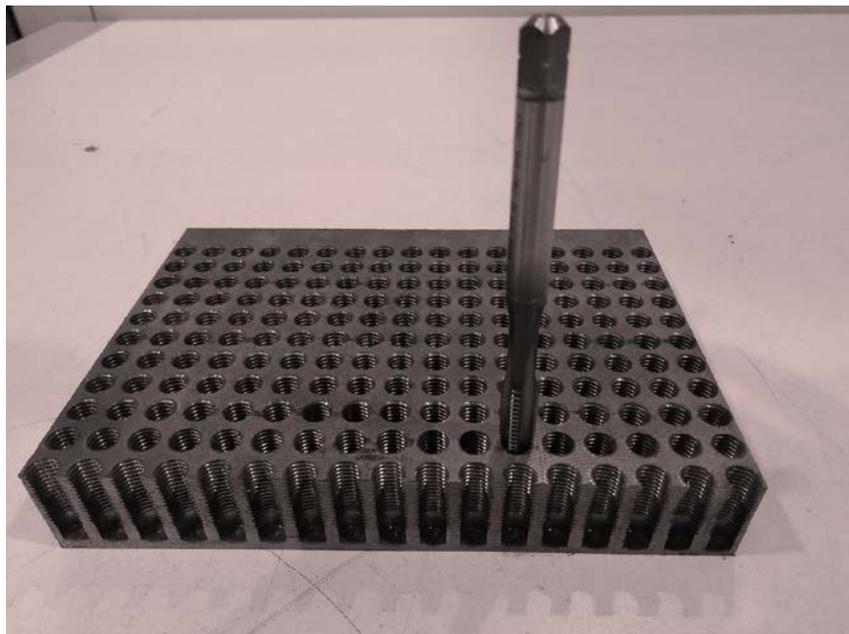


Figura 1.3: Roscado con macho

La producción de roscas interiores, como las estudiadas, consiste en la realización de un perfil triangular helicoidal en la pared cilíndrica de un agujero que previamente, en la mayoría de los casos ha sido taladrado.

El roscado es una operación que tiene la particularidad de que se suele realizar al final del proceso de fabricación de las piezas, cuando están casi acabadas y tienen gran parte del valor añadido incorporado. Debido a las dificultades de ejecución del roscado, los problemas más destacados suelen ser la falta de calidad de las roscas, su inconsistencia, e incluso el riesgo de que se rompa la herramienta y que la pieza se invalide, o que se inmovilice un tiempo para retirar el resto del macho de la pieza. Por todo ello, se considera una operación crítica. Así además del coste de producción de la rosca es muy importante la fiabilidad del proceso.

Respecto al factor económico, se estima que en general, el tiempo de operación de roscado es del orden del 30% del tiempo total de arranque de viruta, mientras que el coste de las herramientas asociadas a la operación es sólo del orden del 3% del coste de las herramientas. De forma que existe un gran interés en aumentar la velocidad de producción y la duración de las herramientas aun aumentando su coste, dado que éste es despreciable frente a los costes totales de mecanización, siempre que se consiga reducir el tiempo asociado al roscado. Para aumentar la productividad en el roscado, se suele plantear aumentar la velocidad de corte, la vida de la herramienta, unidos a la fiabilidad de operación, que se consiguen adecuando la herramienta y el proceso a cada material y aplicación.

A pesar del tremendo desarrollo en la industria de mecanización, de las máquinas herramientas para mejorar la productividad, en gran parte de la producción de roscas se

emplean métodos convencionales que requieren la intervención manual de los operarios. Se debe a la dificultad del roscado de agujeros interiores, que en la mayor parte de los casos se realiza de forma manual en máquinas roscadoras de columna, y en taladros, con la asistencia directa de operarios, con lo que ello conlleva de costes, falta de calidad, por la poca repetitividad y la baja productividad. En producciones a gran escala, en determinadas industrias, se rosca de forma más automatizada en fresadoras verticales y horizontales.

Los aspectos a tener en cuenta en la mejora de la productividad del roscado abarcan la calidad de las roscas, la precisión dimensional, la reducción del tiempo de operación, y en evitar las roturas y los errores humanos. Así para mejorar la productividad a través de la reducción del tiempo de operación, se habla de roscado de alta velocidad para velocidades de corte del orden de 50 m/min, pero es un valor que depende del material.

El material a roscar condiciona por sus exigencias el proceso de roscado que puede emplearse. Las principales propiedades del material que determinan el proceso de roscado a emplear son la resistencia del material y su ductilidad.

También es muy importante el tipo de la viruta que forme, que está relacionado con la ductilidad. Según la forma que adquiera o de la capacidad que tenga de fragmentarse, que sea larga o corta impondrá unas exigencias u otras a la geometría de la herramienta de corte y limitaciones a la operación de roscado. En la Figura 1.4 se muestran ejemplos de roscado en que las virutas son cortas, y dúctiles y largas con evacuación por la hélice o en que se colmata.

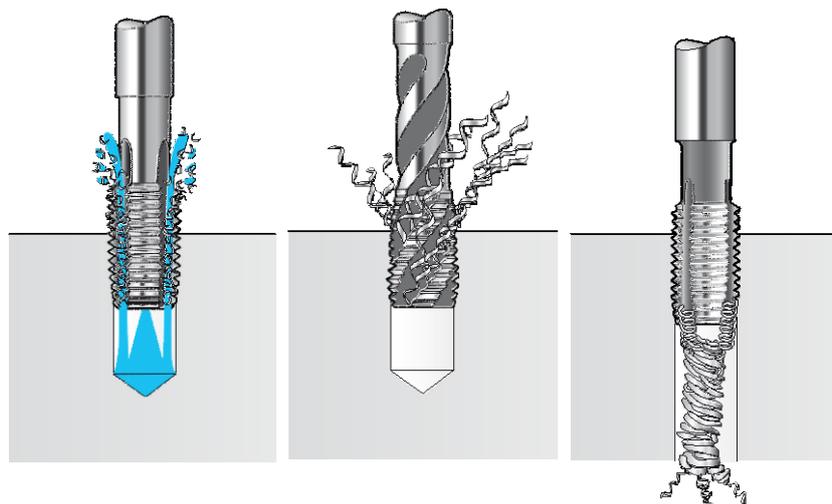


Figura 1.4: Diferentes tipos de viruta en el roscado con macho (Fuente: Walter Prototyp®)

Existen también aplicaciones de roscas que por motivos de seguridad no pueden realizarse de determinadas formas (no se puede roscar por laminación en elementos para la industria aeronáutica y alimentación, por el riesgo de desprenderse las rebabas).

La energía requerida para arrancar un volumen determinado de material en un tiempo dado depende de la resistencia del material, para arrancar la viruta, de la fricción entre la herramienta de corte y la pieza, y de las condiciones de trabajo como la velocidad de corte, la lubricación, el tipo de viruta, etc. En torneado y en fresado la fuerza puede estimarse con mayor o menor facilidad, pero en el caso del roscado esta aproximación es más difícil dada la geometría del corte, el número de dientes que arrancan material, el espesor de corte que interviene, la velocidad, la fricción de corte y de la viruta, el lubricante, etc.

Respecto del material, existen aproximaciones en las que se acota la fuerza específica de corte que opone el material. Unos datos aproximados de los materiales de mecanización más usuales son los siguientes:

- Aceros estructurales:	1600-1800	N/mm ²
- Aceros aleados:	1900-2900	“
- Fundiciones de acero:	900-1100	“
- Aleaciones de Titanio:	1300-1400	“
- Aleaciones de Aluminio:	400- 700	“

Otras características a destacar del material son además de la ductilidad, el coeficiente de rozamiento con la herramienta, la afinidad de tenga con la herramienta de corte, la homogeneidad, la microestructura que lo compone, etc.

Entre los defectos que afectan a la calidad de las roscas hay que incluir los de la falta de precisión dimensional, y los errores en la forma de los hilos de la rosca, por sobredimensionamiento, la formación de rebabas, etc. De ahí que suelen emplearse utillajes calibrados del tipo pasa no-pasa en la verificación de las roscas producidas.

Se ha definido la operación de roscado para roscas internas como el proceso de máquina herramienta más complejo y desconocido en la práctica.

La mejora de productividad del roscado debe de ir asociada a la mejora de la calidad, al aumento de la consistencia del proceso y a la reducción de la intervención manual de los operarios.

A continuación, en la Figura 1.5 se muestra un esquema general de las partes que intervienen en la producción de piezas por mecanizado, que se desarrollan en el presente trabajo y se destacan con color de fondo los puntos desarrollados en la Introducción.

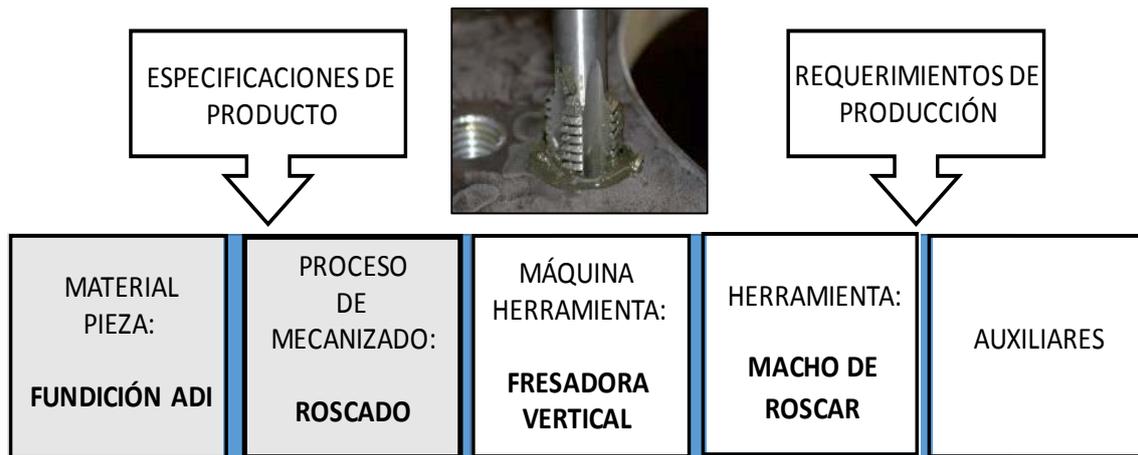


Figura 1.5: Aspectos generales en la mecanización de piezas desarrollados en la Introducción

En este capítulo se desarrollan los aspectos que corresponden a los tipos de roscado y al tipo de material de las piezas, las fundiciones ADI.

1.1 TIPOS DE ROSCADO

Los distintos tipos de operaciones posibles para producir un agujero roscado en un centro de fresado son el roscado con macho de roscar, la realización de la rosca por laminación o prensado y por fresado orbital. Su elección depende del material a roscar, de la seguridad del proceso y de los costes de fabricación.

1.1.1 Roscado con macho de roscar

Es el procedimiento de roscado más frecuentemente empleado. El roscado con macho es simple y, en principio el menos exigente. Puede ser realizado en un amplio rango de máquinas a velocidades convencionales. Es el proceso tradicional de roscado. Consiste en roscar un agujero previamente taladrado mediante el arranque progresivo de viruta mientras avanza el macho. Se arranca el material desde el diámetro taladrado hasta el diámetro exterior nominal de la rosca, éste grabado en el macho. El macho se empotra y avanza en el agujero del que tiene que evacuarse la viruta generada en sentido contrario al de avance. El arranque de material lo realizan sucesivos filos de corte en una secuencia radial escalonada. Se suele asimilar al brochado, pero con los dientes de corte progresivos colocados a lo largo de la hélice, tal como se puede apreciar en la Figura 1.6:

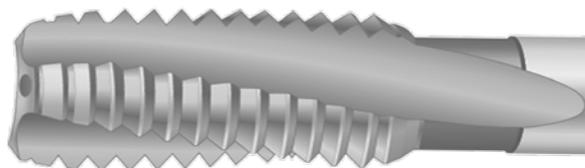


Figura 1.6: Macho de roscar

Tiene el inconveniente de que la operación se realiza con una geometría de dientes compleja y en la que intervienen numerosos dientes. A medida que se desgastan los filos de corte de los dientes se requiere más esfuerzo, y la formación de la viruta es más dificultosa, pudiendo llegar al extremo de producirse la rotura de los dientes.

Es un proceso de producción de un solo grado de libertad, en el que el giro y el avance de operación tanto de la máquina y como del macho deben de ser iguales, estar sincronizados.

Ventajas: Es apropiado para casi todos los materiales.

Inconvenientes:

- Surgen problemas con la evacuación de virutas largas en roscados de agujeros ciegos y profundos. La formación de viruta no es visible.
- Existe el riesgo de rotura del macho por la colmatación de las ranuras de evacuación de la viruta. La viruta debe de salir en sentido contrario al del avance del macho.
- Se produce una gran superficie de contacto y por tanto rozamiento, entre los filos del macho y los flancos del agujero roscado.
- Para cada aplicación se requiere una herramienta ajustada, hay poca flexibilidad.
- La utilización de refrigerante-lubricante es necesaria para evacuar la viruta formada dentro de agujeros ciegos. Se puede emplear la emulsión de las máquinas herramientas como medio refrigerante económico.
- El proceso puede ser sensible a los cambios de propiedades del material de la pieza. Existe el peligro de destrozos en la pieza casi acabada en caso de que se produzca la rotura del macho en la pieza.

1.1.2 Descripción del proceso de roscado con macho de corte

El corte del material lo realizan los dientes en su giro por la aplicación del par. De modo que la componente de la fuerza que interviene directamente en el arranque del material es la tangencial. En función de la inclinación del diente respecto del eje del agujero, la fuerza de corte también se inclina y adquiere una componente axial mayor. Así el ángulo de la hélice que forma el frente de los dientes es el que al cortar provoca que sea mayor la componente axial de la fuerza.

En la Figura 1.7 se muestra un macho alojado en una sección roscada, se puede ver el ángulo de la hélice que tendrá la cara de desprendimiento del diente y que dará lugar a esfuerzos axiales:



Figura 1.7: Sección roscada con macho de roscar con ángulo de hélice

La producción de roscas internas es un proceso de mecanizado importante, típico de piezas para automoción. Por ejemplo, las roscas de diámetro pequeño y mediano en piezas de suspensión o de transmisión, generalmente se producen por roscado con macho. El roscado también se emplea de forma intensiva para obtener roscas internas en componentes de transmisión de fundiciones de aluminio-silicio en automoción. Entre otros muchos sectores, está muy implantado en la industria aeronáutica en el roscado de componentes aleados, como por ejemplo en gamma ti al (γ -TiAl), en los que la UPV/EHU tiene mucha experiencia.

1.1.3 Roscado por laminación o prensado de roscas

Se produce la deformación del material progresivamente hasta obtener la forma de la rosca requerida. Es un proceso altamente productivo, sin creación de virutas. Su aplicación en los últimos años ha aumentado con la mejora de los materiales del sustrato del macho, la geometría de los perfiles de conformación, los recubrimientos y de la lubricación y refrigeración y la calidad de trabajo de las máquinas herramientas.

En la Figura 1.8 se muestra el perfil frontal de los machos, hexagonal y pentagonales, que producen la deformación del agujero en el caso de roscado por laminación:

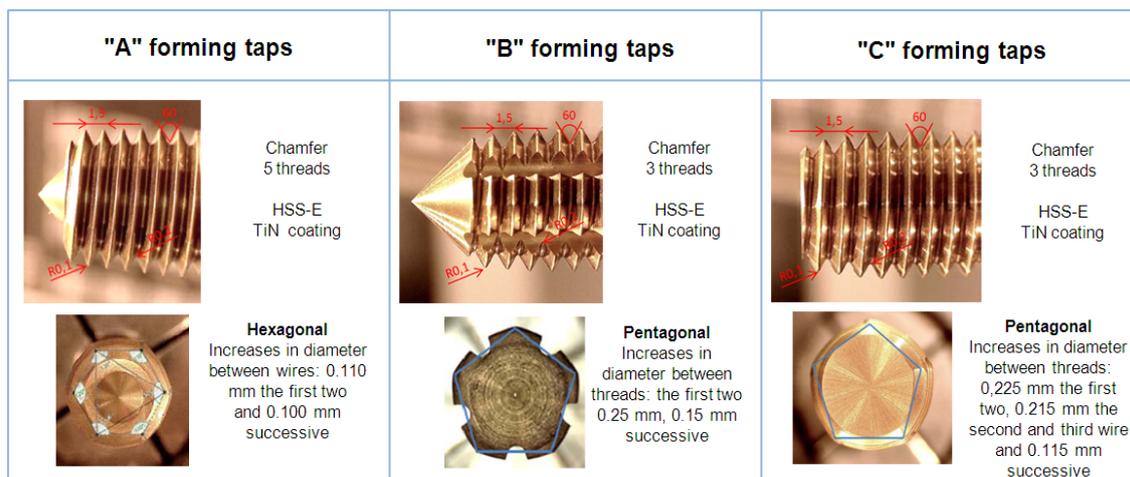


Figura 1.8: Distintos perfiles frontales de machos de laminación (Fuente: [Fer15])

Ventajas:

- Se requiere menor tiempo de mecanización en comparación con los procesos de corte. Es el método más rápido.
- Pueden fabricarse roscas en todos los materiales dúctiles en frío sin formación de virutas, lo cual aumenta la seguridad del proceso durante la producción y puede ahorrar espesor de material.
- La conformación del perfil no es tan precisa como en los casos de corte del material. Tras la conformación de la rosca al desaparecer la presión el agujero se contrae.
- Mejora del acabado superficial con mejores características mecánicas. Aumenta la resistencia estática y dinámica gracias a que no se cortan las fibras del material y se produce el endurecimiento en frío, pero se fragiliza el material. Ambos casos pueden apreciarse en la Figura 1.9, el resultado de las fibras en el roscado por corte y en el roscado por laminación, se aprecia el posible defecto en la formación del perfil del diente.

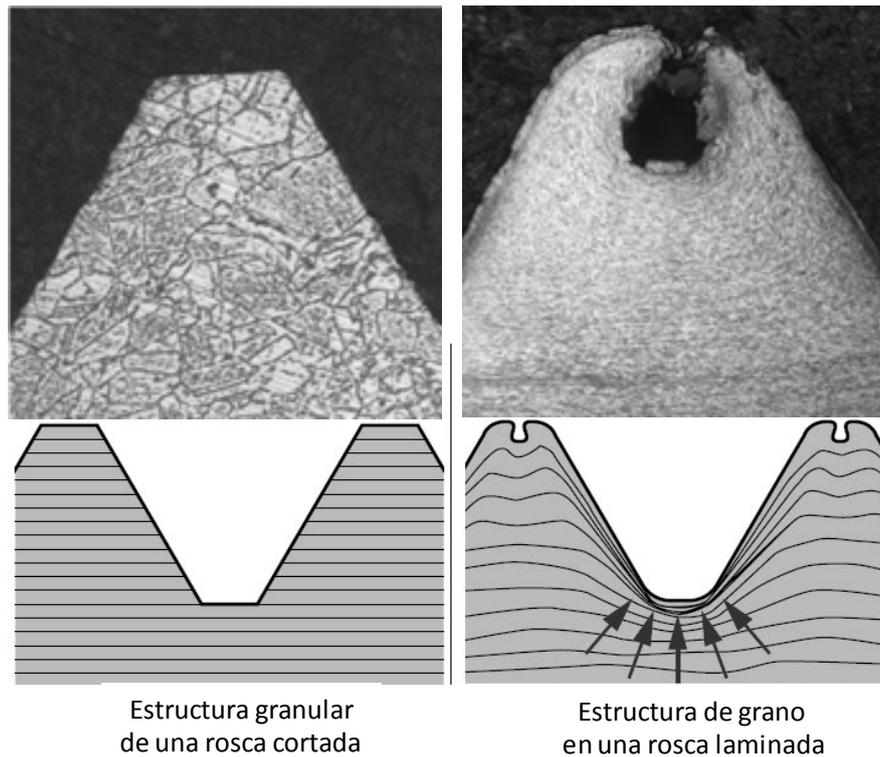


Figura 1.9: Flujo del grano en roscas mecanizadas (izq.) y laminadas (der.)

Inconvenientes:

- Sólo se puede realizar con materiales dúctiles a temperatura ambiente y aplicaciones autorizadas.
- El campo de aplicación abarca todos los materiales con un mínimo del 5 al 10% de alargamiento y una resistencia máxima de 16.000 Pa por encima de la cual no se puede aplicar. La pared de la pieza no debe de ser endeble. (Está limitado por el alargamiento de rotura, la resistencia a la tracción y el paso de rosca).
- El roscado por laminación del material genera considerables fuerzas de fricción. Por tal motivo, debe existir siempre una lubricación suficiente de modo que se forme una ligera película lubricante sobre la superficie de la herramienta. Se usan aceites o pastas, lo que supone un coste adicional para su adquisición, el tratamiento de reciclaje y la limpieza de la pieza.

1.1.4 Roscado con fresa de roscar o roscado orbital

En el fresado de roscas se reducen considerablemente los costes de herramientas, ya que se pueden mecanizar prácticamente todos los materiales. Se pueden fresar diferentes medidas de roscas con el mismo paso y conseguir cualquier tolerancia de la rosca. En la Figura 1.10 se muestra el modo fresar una rosca:

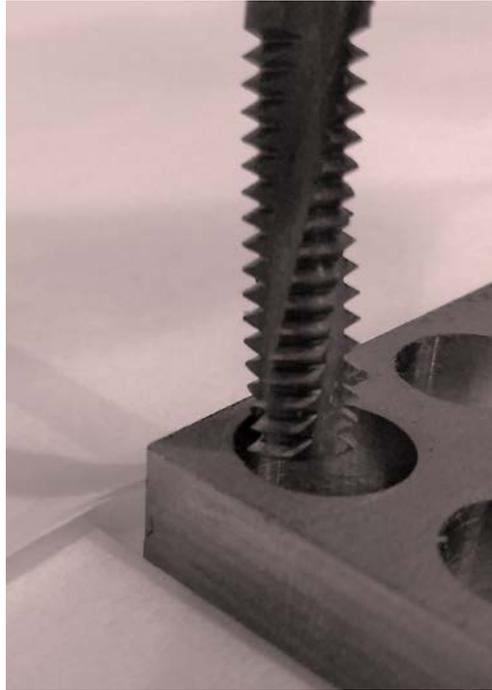


Figura 1.10: Roscado con fresa o roscado orbital

Ventajas:

- Es el proceso de roscado que ofrece más seguridad y calidad de la rosca. La misma fresa de roscar realiza roscas ciegas y pasantes, así como roscas a derecha e izquierda.
- Se pueden realizar con una fresa de roscar diferentes diámetros de rosca con el mismo paso.
- Se puede roscar hasta las proximidades del fondo de la rosca y roscas interiores muy profundas con seguridad del proceso.
- El uso es universal en prácticamente todos los materiales de viruta larga y corta, resistencia mecánica baja o alta.
- Evita que las virutas se enreden.
- Se requiere un par de giro bajo incluso con roscas de grandes medidas.
- El fresado puede ser utilizado en materiales muy resistentes de hasta 60 HR.
- No se requiere de la refrigeración interior.

Inconvenientes:

- El centro de mecanizado debe poseer una unidad de mando 3D-CNC, como disponen en general los centros de mecanizados modernos para realizar la interpolación helicoidal.
- Es el modo de roscado más lento. En producciones a gran escala pierde competitividad frente a los otros dos procesos.
- La herramienta es más cara que en otros procesos.

1.2 FUNDICIONES DE ALTA RESISTENCIA ADI

Son una evolución de las fundiciones dúctiles que se idearon hacia 1940 y extendido su uso industrial a partir de los años 80. Las fundiciones dúctiles austemperizadas (ADI) poseen gran parte de las ventajas de las fundiciones dúctiles, su facilidad de producción y bajo coste y unas características mecánicas superiores, resultado del proceso de austemperización.

Dada la enorme presión industrial que hay por emplear materiales más ligeros, las ADI son un material que tiene gran interés por aunar unas propiedades mecánicas como la resistencia, la ductilidad y la tenacidad, e incluso mejor resistencia al desgaste que los aceros, pero son más ligeras ya que tiene un 10% de menor densidad. También el coste de producción es menor que el de los aceros forjados con los que compite. Además, las fundiciones ADI como fundiciones ofrecen mayor facilidad de producción piezas de formas complejas con menos exceso de material que las forjadas. El campo de aplicación de las ADI es principalmente donde se requiere un buen comportamiento al desgaste, a la fatiga, a amortiguamiento y a impactos Klo et al. [Klo07], Sah et al. [Sah10], Bar et al. [Bar15]. Así se emplean en automoción como engranajes, en elementos de suspensión y de transmisión, en árboles de levas, cigüeñales, etc., en la industria eólica como porta satélites, en transporte, en ferrocarriles, agricultura, minería, etc.

A continuación, las Figuras 1.11, 1.12 y 1.13 se muestran ejemplos de algunas piezas de ADI empleadas en automoción, en aplicaciones industriales, en obras públicas e industria eólica, respectivamente:



Figura 1.11: Ejemplo de piezas de ADI empleadas en automoción



Figura 1.12: Soporte de suspensión, coronas y piñones industriales

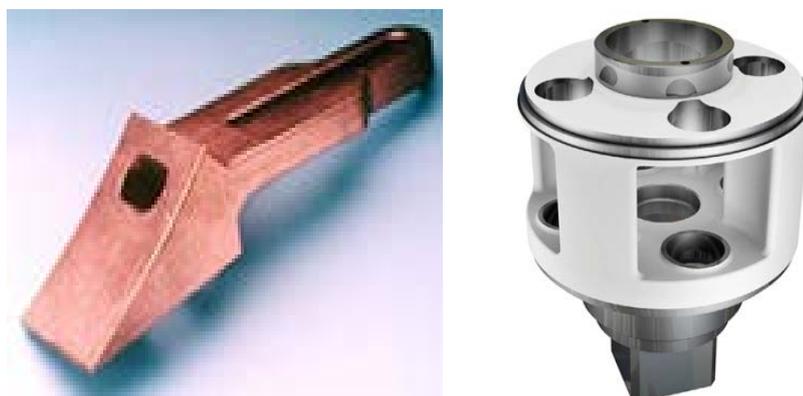


Figura 1.13: Piezas de grados elevados de ADI, de obras y de industria eólica

Ejemplo de la buena resistencia al desgaste abrasivo es el estudio sobre la pérdida de masa por desgaste en ruedas de ferrocarril y de vía, en el que el ADI-900 es el de menor desgaste. Estudio comparativo realizado en los ferrocarriles alemanes, cuyo resultado se recoge en la Figura 1.14:

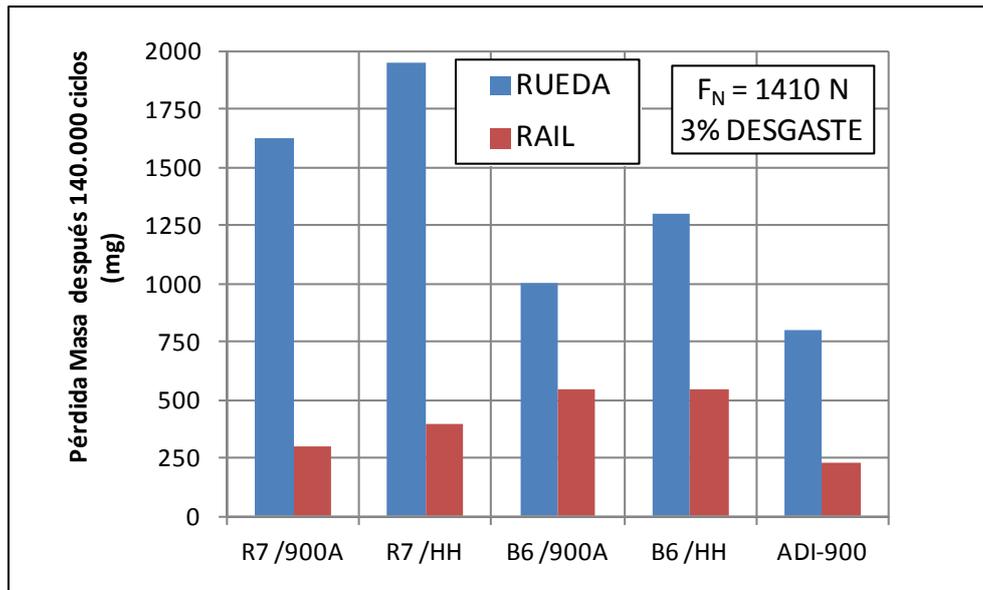


Figura 1.14: Desgaste de ruedas de ferrocarril para distintos materiales

Los ADI tienen muy buenas características mecánicas por unidad de peso, o de forma inversa, el peso por la unidad de resistencia comparado con otros materiales es muy bajo. La baja densidad de los ADI se debe a que la mayor parte del volumen, el de la austenita es una estructura cúbica centrada en la cara.

El ADI es el material que requiere el menor valor de ratio de peso frente a la resistencia, tal como se muestra en la Figura 1.15:

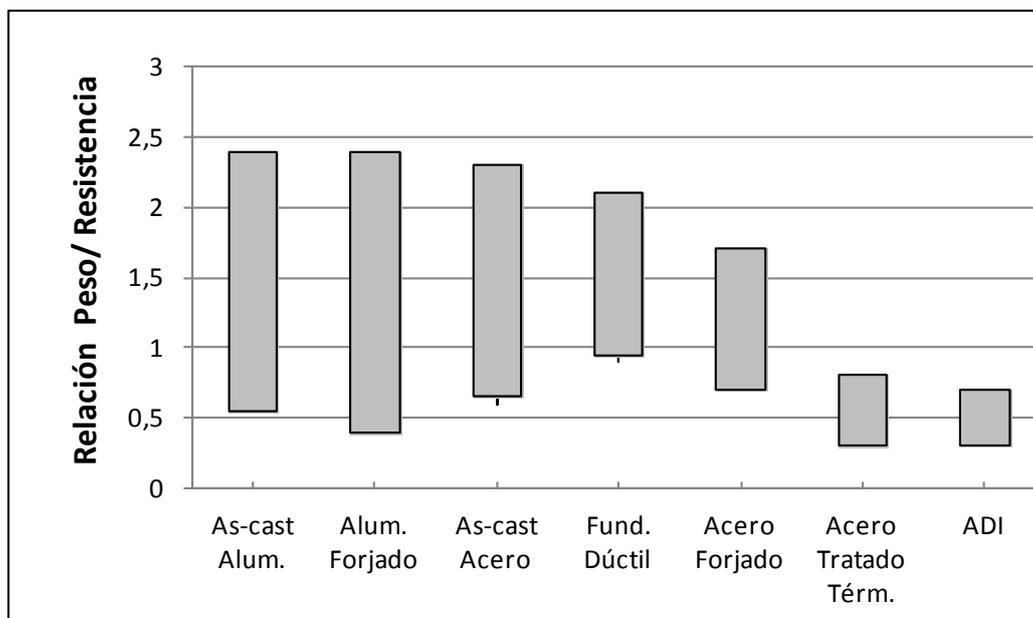


Figura 1.15: Peso por unidad de resistencia para distintos materiales

La relación de la resistencia frente a la ductilidad en comparación con otros materiales también es elevada como puede verse en la Figura 1.16:

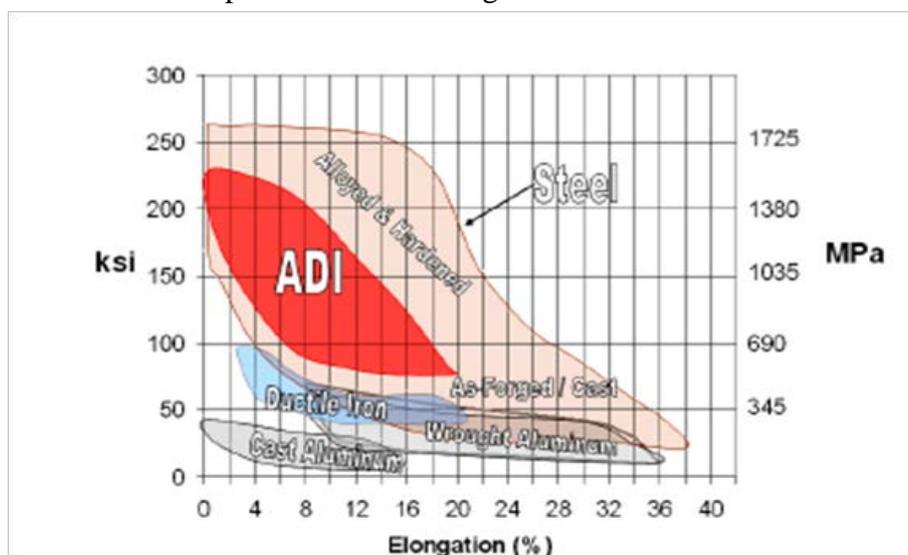


Figura 1.16: Mapa de Resistencia y Ductilidad de diferentes materiales férricos (Fuente: ADI Treatments®)

1.3 ROSCADO CON MACHO DE LAS FUNDICIONES ADI

El tipo de roscado elegido ha sido el roscado con macho porque el material, la fundición ensayada es del tipo ADI-900 cuya ductilidad (del orden del 8%) no es suficientemente alta como para roscar por laminación (se requiere que sea mayor del 10%) y porque es un modo de roscado más rápido y de mayor productividad que con fresa de roscar. Las condiciones de trabajo han sido para aplicación industrial en automoción, a una velocidad de corte impuesta relativamente alta, $V_c=30$ m/min, con las particularidades de material, de las herramientas y de la máquina fresadora y de trabajo impuestas por las condiciones iniciales. También el diámetro y la longitud de roscado, M8 y 20 mm han venido impuestas desde el origen del estudio, porque estos valores se han considerado los más representativos de aplicación en automoción.

Además del material a roscar y el proceso de roscado elegido, en este caso con macho, en el proceso influyen las propiedades de la máquina en la que se produce. La máquina es una fresadora vertical, un tipo de máquina muy versátil de gran implantación en los talleres de mecanización de roscado de agujeros. Se han estudiado las características más relevantes de la fresadora vertical con la que se han realizado los ensayos.

El punto de partida del estudio ha sido la búsqueda de los machos de roscar más adecuados para producir roscas en fundiciones de alta resistencia ADI, en un proyecto europeo MANUNET, en el que han participado empresas alemanas, italianas y españolas, que se ha completado con el estudio de los requerimientos de la máquina fresadora para producir roscas con una mayor fiabilidad. Teniendo en cuenta los parámetros que definen el mejor macho de roscar, las características de la máquina en la que se rosca y las del

material empleado, se ha desarrollado una metodología que sirve para aplicar lo aprendido y poder extrapolar a otros casos de roscado con fresadora.

CAPÍTULO 2

2. EL ESTADO DEL ARTE

2.1 INTRODUCCIÓN

Los puntos desarrollados corresponden al material a roscar, en este caso las fundiciones de alta resistencia ADI. El proceso de roscado, que aunque es una operación conocida y madura, para aumentar su productividad requiere conocer y reducir los problemas relativos a la falta de calidad del agujero roscado, de precisión dimensional, de alineación entre el agujero taladrado y el roscado, de operación de la máquina, etc. En la medida en que se controlan y minimizan unos problemas y se mejoran unos aspectos, se plantea resolver nuevas necesidades que van surgiendo para conseguir el roscado de alto rendimiento. Respecto a los machos de roscar también se plantea la situación de los recubrimientos, que en las últimas dos décadas han sufrido una tremenda evolución. Y finalmente, se plantea el estado de las mejoras en la preparación del filo de corte de las herramientas de corte a nivel de microgeometría, que se puede abordar al mejorar los medios de producción y de control.

En la Figura 2.1 se muestra el mapa de los puntos desarrollados en el Estado del arte, el material de la pieza, el proceso de roscado, la herramienta y dentro de ella, las preparaciones del filo y el recubrimiento.

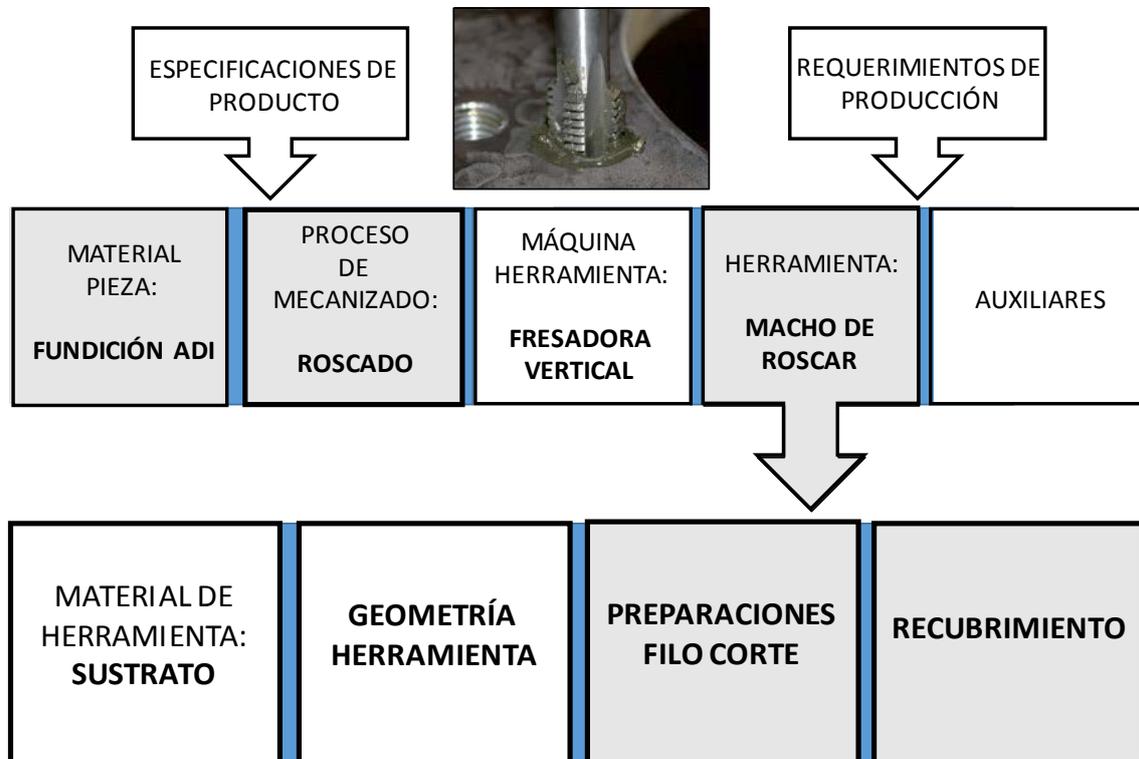


Figura 2.1: Aspectos que se desarrollan en este capítulo sobre fondo remarcado

2.2 ROSCADO DE ALTO RENDIMIENTO CON MACHO

El estudio del roscado con macho se ha realizado a partir de los años 70 y 80 del pasado siglo y especialmente se ha profundizado en los últimos 15 años, hay que tener en cuenta que aún hoy en día, en muchos casos sigue siendo un proceso manual.

Comenzando por el trabajo de Doy et al. [Doy74] analizaron el roscado con macho en máquinas de operación manual en que debido al proceso y a la geometría de los machos se generaban esfuerzos axiales sobre la herramienta, que daban lugar a imprecisiones dimensionales en la rosca (forma inadecuada, sobredimensión, etc.), por lo que diseñaron un acoplamiento que les permitió reducir la fuerza axial que actuaba sobre el macho, y así consiguieron producir roscas más precisas, y mejorar la calidad.

Respecto de la geometría de los machos [Lor80] estudió el efecto de la geometría de los dientes, como el chaflán, el ángulo de desprendimiento, en la zona de alivio de los dientes y el efecto de la velocidad, en el valor del par de roscado. El aumento del espacio de alivio y la reducción de la velocidad de operación tenían su efecto en la reducción del par.

Posteriormente, Pat et al. [Pat87] experimentaron sobre el efecto de las vibraciones torsionales controladas en el roscado. De modo que reportaron que, seleccionando adecuadamente la frecuencia y la amplitud de las vibraciones, al roscar aluminio y fundición de hierro se reducía el par en un 8 y un 16%, respectivamente. Las vibraciones torsionales también tenían un efecto beneficioso en la reducción de parte de la viruta que no se arranca al invertir el sentido de giro del macho al final de los agujeros ciegos.

DeY et al. [DeY98] dieron con un punto clave en el roscado de materiales difíciles como las aleaciones de titanio, el de la fricción en la zona de alivio entre los dientes y el material roscado. Explicaron de forma teórica y práctica la razón del efecto beneficioso de las vibraciones en la reducción del par de roscado.

Los primeros trabajos de modelización del roscado los realizaron Arm et al. [Arm01] que desarrollaron modelos matemáticos sobre las fuerzas y el par que se producen al roscar con machos de ranuras rectas, y así poder entender mejor los mecanismos de corte que intervienen. Aplicaron los modelos matemáticos en simuladores computacionales y realizaron programas de ensayos prácticos. Les permitió llegar a un entendimiento más profundo de la acción básica del corte y a emplear modelos predictivos de las fuerzas.

Ahn et al. [Ahn02] incorporaron un punto novedoso en el roscado, estudiaron el error de sincronización que se producía entre la hélice que describe el cabezal al interpolar el giro con el avance en z. Este error aumentaba muy sensiblemente al aumentar la velocidad de corte y al disminuir la ganancia del control del avance, y que en caso de producirse errores de sincronización los incrementos de la fuerza en z y del par se producían en la carrera de

retroceso y salida del macho. El error en la sincronización causaba la rotura de los machos o la producción de roscas imprecisas.

Ten et al. [Ten02] desarrollaron un modelo mecánico para predecir el esfuerzo axial y el par de roscado. Descubrieron que el par de roscado total se compone del par para la formación de la viruta, de la fricción entre la herramienta y la pieza, y en correspondiente a la colmatación de la viruta en los canales de evacuación. Observaron que la rotura de los machos es una fractura a torsión en la que el factor más determinante es el de la colmatación de la viruta en los canales de evacuación, que es el factor más aleatorio, porque su estado es poco predecible. Este factor depende de la geometría del macho y se reduce con la mejora del acomodo y de la evacuación de la viruta.

Ensayaron el efecto de roscar en seco y con lubricantes y descubrieron que es beneficioso en la reducción del par porque afecta a la reducción del coeficiente de fricción, pero no resulta tan crítico en la rotura de los machos cuando se produce por la colmatación de la viruta.

Así Mez et al. [Mez02] desarrollaron un modelo de detección de errores basado en el análisis del par de roscado y de la fuerza radial, método que les permitió identificar la influencia de algunos errores como los de la desalineación axial, de run-out del macho y la rotura de algún diente. La identificación de los errores la obtuvieron experimentando con ellos y comparando las señales. Consiguieron una elevada concordancia entre el modelo de simulación y los valores experimentales.

Li et al. [Li03] presentaron un método basado en la medición de la señal del motor del cabezal con el que diagnosticaban el estado del proceso de roscado. Emplearon datos estadísticos experimentales en el diagnóstico.

En el roscado de pequeñas dimensiones Zha et al. [Zha03] estudiaron el efecto en el roscado asistido por vibraciones en el roscado de diámetros pequeños (M3), en que acertando con la frecuencia de excitación adecuada se rosca con el par mínimo. Los dos mecanismos responsables de la reducción del par en el roscado asistido por vibraciones fueron la reducción del par de fricción y el cambio de las propiedades del material. También concluyeron que el tipo de vibración que mejor rendimiento ofrecían para una frecuencia determinada correspondió a señales de excitación cuadradas, daban mejor resultado que las sinusoidales.

Ada et al. [Ada05] emplearon un sistema de roscado auto sensible con macho HSS en acero endurecido (50 HRC) y en rosca pequeña de M3. El empleo de roscado asistido por vibración facilitaba la operación.

[Kuo07] demostró que el proceso completo de roscado se puede dividir en seis etapas características. A cada una le corresponde una fuerza axial y un esfuerzo de par determinados. Confirmó el mejor resultado del roscado asistido por vibraciones

ultrasonicas en el caso de roscar titanio y que excitando a la frecuencia de resonancia el par requerido era mínimo. Y que el efecto de emplear fluido refrigerante es beneficioso para reducir el par, pero su influencia es menor que el de las vibraciones.

Además, Fro et al. [Fro10] estudiaron el efecto beneficioso de la lubricación con aceites que contienen componentes aditivos de alta presión con los que se podía reducir de manera muy considerable el par de roscado. Lo aplicó al roscado por laminación en el que la fricción y por tanto la lubricación es crítica.

[Har12] realizan el estudio sobre la situación de la operación de roscado, teniendo en cuenta a lo largo del tiempo la evolución de la detección de los errores, por desalineamientos, rotura de dientes, la influencia de la geometría de los machos, etc., y cómo se van relacionando con los esfuerzos axiales y en el par de roscado. Hay que destacar cómo en la evolución de la operación de roscado, en la pretensión de su mejora, además de en evitar errores se plantea la reducción del par de roscado con la asistencia del roscado por vibración mecánica o ultrasónica, o por medio del roscado neumático.

Respecto a los trabajos en que se analizan señales asociadas al roscado, los hay que emplean elementos de medición intrusivos en máquina (dinamómetros externos) y los que analizan una señal, por ejemplo, de potencia, obtenidos de la propia máquina [Gil13], [Gil15]. El objetivo de estos análisis suele ser monitorizar el desgaste del macho (detectar otros errores) y anticiparse a la producción de roscas no válidas y que no llegue a producirse su rotura, para lo cual se analiza y procesa la señal de la potencia en tiempo real.

Existen modelos analíticos que tienen en cuenta variables y defectos de situaciones reales. Así Dog et al. [Dog02] en su modelización incorporaron al esfuerzo de roscado, defectos como el error de desalineación de los ejes del cabezal y del agujero taladrado, y también la diferencia entre el corte con macho de canales rectos y de canales con hélice. Che et al. [Che90], Liu et al. [Liu91], [Li et al. Li02] modelizaron la repercusión de algunos defectos como la desalineación de los agujeros taladrado y roscado, el tamaño de los agujeros en las señales de par y de la fuerza axial, para lo cual emplearon distintas estrategias de análisis y de aprendizaje. Modelizaciones que luego contrastaron con los defectos y mediciones reales. Pop et al. [Pop16] llegaron más lejos y modelizaron la influencia de los distintos valores de algunos ángulos de los machos como el de chaflán y el de desprendimiento, en el par.

Ahn et al. [Ahn02] y Gil et al. [Gil13] estudiaron en el roscado de alta velocidad la influencia de la sincronización entre el giro y el avance en Z, esto es la de la trayectoria del cabezal. En caso de que se produzcan diferencias de sincronización es un defecto que a bajas velocidades resulta poco relevante, pero a altas es crítico. Gil et al. [Gil13] en sus ensayos emplearon un dispositivo de compensación axial-radial que minimizaba los errores de sincronización.

En el estudio de Gil et al. [Gil15] profundizaron en el análisis de los dientes que por su desgaste afectaban más al aumento del par y al deterioro de los machos, y los mecanismos de desgaste que se producían en las caras de desprendimiento y de incidencia. Recogieron la secuencia de desgaste por adhesión, la pérdida del recubrimiento y el fenómeno del chipping (desconchado del filo de corte), al roscar fundición gris nodular a alta velocidad con machos recubiertos de TiN. En su estudio, emplearon imágenes de gran calidad obtenidas en un microscopio Leica, imágenes obtenidas al microscopio SEM (Scanning Electron Microscope) y el análisis de Espectrometría (Energy Dispersion Spectroscopy) para justificar la evolución de la señal de par de roscado que obtenían y procesaban en tiempo real, con un mínimo coste, en condiciones de uso industrial reales de máquina.

2.3 RECUBRIMIENTOS PVD

El recubrimiento de las herramientas de corte está justificado porque con él resisten mejor las exigencias mecánicas y térmicas originadas en el corte y la fricción del paso de la viruta por la cara de la herramienta, además de que proporcionan aislamiento térmico. Por todo ello ofrecen mejores resultados a vida de la herramienta que las que carecen de recubrimiento [Bou12].

Entre los tipos de recubrimientos más empleados se encuentran los del tipo CVD (Chemical Vapour Deposition) y los PVD (Physical Vapour Deposition). Estos segundos son los más empleados ya que se aplican a menor temperatura y ofrecen mayor calidad dimensional. Entre los de PVD los más empleados son los que usan la técnica de deposición por arco catódico. Se realizan en cámaras a baja presión (de 10^{-2} - 10^0 bar) y a temperaturas comprendidas entre 300° - 600° C. Al condensarse una fase de vapor procedente de un cátodo sobre la herramienta que es el ánodo, se forma el recubrimiento. Tienen el inconveniente de que se forman gotitas (droplets) que quedan en la superficie del recubrimiento y son origen de la rugosidad superficial de la herramienta, que da lugar a una mayor fricción posterior. En general, los recubrimientos de PVD ofrecen una gran precisión y estabilidad dimensional a elevadas temperaturas y un bajo coeficiente de fricción entre la herramienta y la viruta [Fer15]. El valor de los espesores que se consiguen suele estar comprendidos entre 1 y 20 μ m.

En la Figura 2.2 se expone el esquema de funcionamiento de los recubrimientos de PVD de tecnología Platit®:

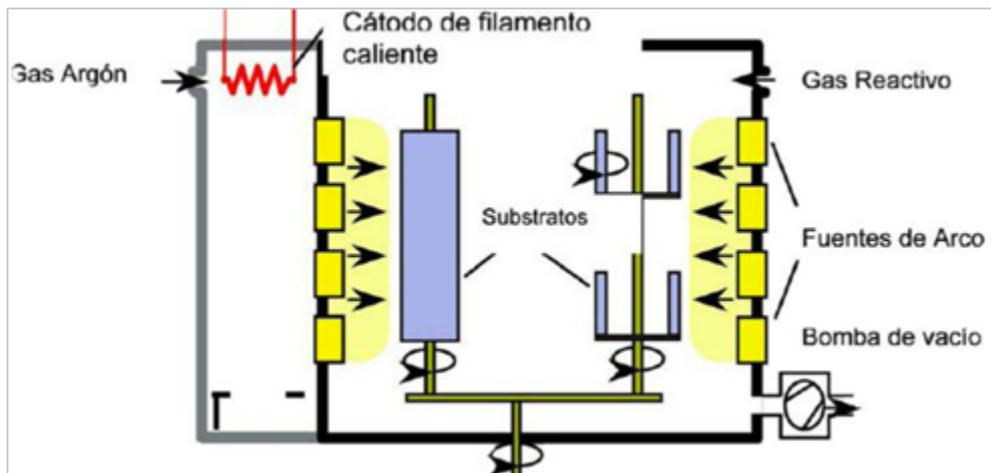


Figura 2.2: Esquema de instalaciones de aplicación de los recubrimientos PVD (Fuente: Metal Estalki®)

La rápida evolución de la tecnología de los recubrimientos de PVD ha permitido el desarrollo de una gran variedad de composiciones de recubrimientos y estructuras mucho más precisas [Ins14], [Mat10]. Así, se pueden clasificar los recubrimientos del tipo PVD según el tipo de capa aplicado:

Los monocapa: de un solo componente. Corresponden al proceso de recubrimiento más sencillo. La misma fase que se adhiere al sustrato es la exterior. Una aplicación muy habitual es la del recubrimiento TiN.

Los recubrimientos multicomponente: por ejemplo los que tienen base de nitruro de titanio, TiN, o de ZrN. Son muy empleados ya que pueden configurarse a medida según los elementos que se adicionen. A la capa de adherencia al sustrato se añade otro elemento dopante como el aluminio o el cromo, y se forma una capa con mejor rendimiento que la capa de un solo componente, se mantiene la buena adhesión al sustrato y aumentan las tensiones internas y la dureza del recubrimiento. Como ejemplo están los AlTiN y los AlCrN. Los recubrimientos de AlTiN (y TiAlN) son los de alto rendimiento más utilizados, en los que el aluminio ofrece una mayor dureza y resistencia a la oxidación a altas temperaturas.

Los multicapa o Multi Layers: Son una sucesión de capas de más dureza y tenacidad colocadas entre otras más blandas y de mejor adherencia, en forma de sándwich. La sucesión de diferentes capas es adecuada para minimizar la propagación de grietas y favorecen la relajación de las tensiones del recubrimiento. En los multicapa (como el AlTiSiN-ML ensayado) se alternan distintas capas, de distintas composiciones (AlSiN y TiSiN), de modo que se reduce la conductividad térmica y la propagación de grietas. Se emplean habitualmente en la mecanización de materiales en que se induce el endurecimiento por trabajo y se acelera el desgaste de cráter, como son los aceros inoxidables y las aleaciones de alta temperatura, materiales con un comportamiento similar a los ADI [Fer14],[Ins14b].

Con una estructura gradual o Gradiente: en la que un componente de mejor adherencia y otro más duro varían su contenido inversamente a lo largo del espesor de la capa, de modo que tiene muy buena adherencia al sustrato y más dureza y tenacidad en la capa exterior. Tiene la ventaja frente a los multicapa de que el coeficiente de dilatación térmica es único y las tensiones debidas a los choques térmicos son menores, lo cual proporciona mayor vida a estos recubrimientos. En el AlTiSiN-G ensayado, el contenido de AlN aumenta de forma continua a lo largo del recubrimiento hasta obtener la capa exterior más dura, alternándose y en detrimento del TiN que tiene muy buena capacidad adherente al sustrato [Pal03],[Pal03b].

Los nanocapa o Nanolayer (Nanocoatings): son estructuras convencionales de capas finas o multicapas de espesores inferiores a 20 μm . Su desarrollo ha abierto la posibilidad de diseñar recubrimientos exclusivos para ciertas aplicaciones. Se suelen obtener mejoras adicionales controlando la nanoestructura durante la fase de deposición. Se aumenta la dureza con la dispersión de una fase de nano-cristales duros en una matriz amorfa que restringe su movilidad [Bou12], [Ins14].

Los Nanocomposites: son los recubrimientos más modernos. En éstos se aplican granos nanocristalinos finos y duros (TiAlN or AlCrN) en estructuras amorfas del tipo Si₃N₄. Se combinan las características más interesantes anteriormente citadas, capas de adhesión al sustrato, gradientes intermedias y exteriores especialmente duras. Ofrecen elevada dureza, tenacidad y estabilidad, características que en otros casos son contradictorias.

En la Figura 2.3 se recogen los esquemas de los distintos tipos de estructuras mencionadas:

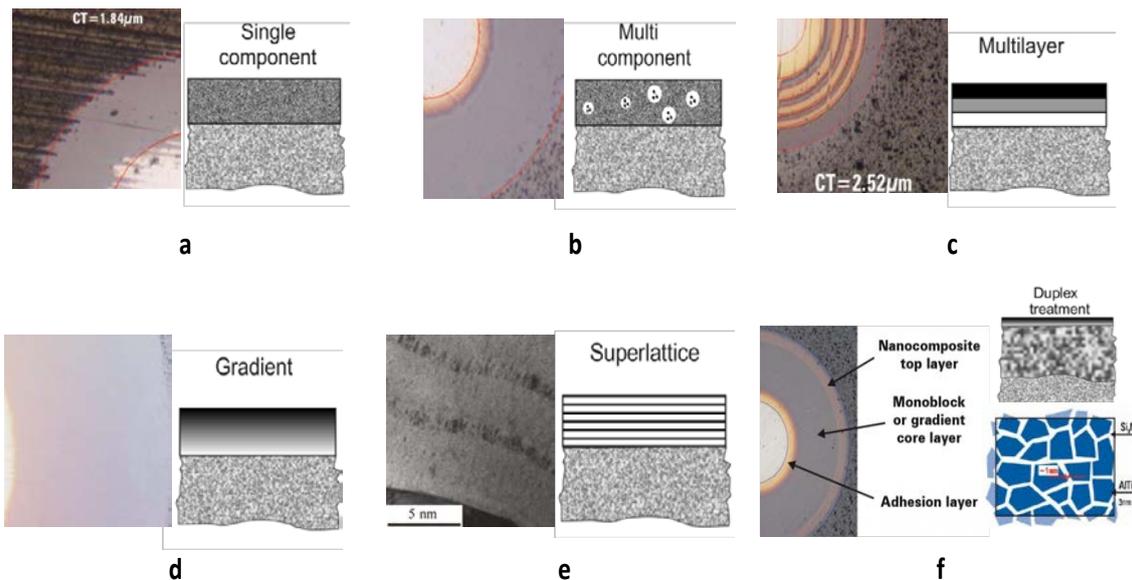


Figura 2.3: Estructuras de recubrimiento PVD: a) Monocapa y monocomponente, b) Monocapa multicomponente, c) Multicapa, d) Gradiente, e) Nanocapa, f) Nanocomposites (Fuente: Platit®)

Hay que mencionar la influencia del contenido del silicio en la microestructura de los recubrimientos. Componentes como el Ti, Cr, y Al en una matriz amorfa de Si_3N_4 no se mezclan y se segregan en fases. Por ejemplo, los granos de TiAlN nanocristalinos (o de AlCrN), se embeben en la matriz amorfa de Si_3N_4 y se obtienen estructuras nano compuestas como las denominadas nACo^\circledast , nACRo^\circledast , $\text{nATCRo}^\circledast$ (de Platit $^\circledast$), etc. en las que aumentan la tenacidad y disminuyen las tensiones residuales internas del recubrimiento. El efecto del silicio es proporcionar estabilidad a la nanoestructura a elevada temperatura (hasta 1200°C). Se obtiene también una estructura de elevada dureza. Cómo afecta su presencia en la estructura del recubrimiento se puede ver en la Figura 2.4:

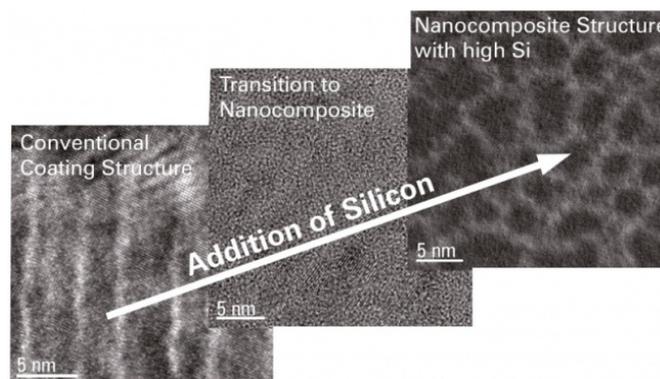


Figura 2.4: Efecto de la adición del silicio. Se distribuyen y segregan las partículas duras en la matriz de Si_3N_4 (Fuente: Platit $^\circledast$)

Así el AlCrSiN es particularmente duro y resistente al desgaste por abrasión y a la oxidación a elevadas temperaturas por la adición del cromo que mejora la adhesión al sustrato [Lop11], [Cse09], [Bou12].

A continuación, se repasa la influencia de los recubrimientos PVD en los machos de roscar materiales de difícil mecanizabilidad, como los aceros inoxidables y las aleaciones de titanio, en los que hay una gran tendencia a adherirse a la superficie de corte como ocurre con las fundiciones ADI:

Sil et al. [Sil15] investigaron el rendimiento de los recubrimientos de tipo Diamond Like Carbon (DLC) al taladrar fundiciones de aluminio aleado. La deposición de la capa de recubrimiento se realizó por plasma, aplicando en forma de CVD y una capa intermedia de silicio que favorecía la adhesión. El análisis mostró que el desgaste de la herramienta ocurría principalmente en el filo de corte donde el recubrimiento no permanecía adherido. En esa zona el desgaste de flanco y el desgaste de cráter eran evidentes.

Así mismo, Mee et al. [Mee11] estudiaron en el taladrado de los ADI con herramientas recubiertas con TiN/AlTiN , la evolución de los mecanismos de desgaste y de las fuerzas de corte. Respecto del mecanismo de desgaste los resultados mostraron que, al comenzar a taladrar la capa de recubrimiento se desgastaba en el filo, y según se seguía taladrando

la fuerza de rozamiento aumentaba y comenzaba a formarse filo recrecido, Built-Up Edge (BUE). Este fenómeno junto con el desgaste de cráter provoca el fallo de la broca.

En los ensayos de roscado sobre aleaciones de Al-Si con herramientas de carburo de tungsteno y diferentes recubrimientos TiCN, CrN, SiCN-TiCN, TiB₂ y DLC que Ste15 et al. [Ste15] realizaron, el mejor rendimiento se obtuvo empleando la herramienta recubierta con DLC. La comparación se realizó midiendo el par de roscado y analizando el filo recrecido y la morfología de la viruta. La viruta producida por las herramientas de DLC mostró una superficie más suave, los filos quedaron más rectos y las líneas de desgaste más reducidas.

También se ha realizado el estudio del roscado de las aleaciones de aluminio 319 en seco y con Minimum Quantity Lubrication (MQL), como alternativas a la lubricación por refrigeración masiva como es el caso de Bho et al [Bho10]. En una primera fase de los ensayos se estudiaron machos de acero rápido, High Speed Steel (HSS) sin recubrimiento y con recubrimiento DLC al roscar en seco. La adhesión del aluminio y los elevados pares llevaron al macho de acero rápido sin recubrimiento a fallar en menos de 20 agujeros. El uso de los machos recubiertos con DLC aumentó la vida a más de 100 agujeros y se requirió menos par ($\approx 50\%$). Los autores reportaron que el bajo coeficiente de fricción entre el DLC y el aluminio es el responsable de prevenir la formación del filo recrecido. En una segunda tanda de experimentos se observó que la aplicación del MQL prevenía la adhesión del material a la herramienta de HSS sin recubrimiento.

Sobre el estudio de roscado de aceros inoxidables austeníticos usando machos de HSS con recubrimientos tales como TiCN, TiAlN, CrN, CrC y DLC rei et al. [Rei06] concluyeron que los recubrimientos con el menor coeficiente de fricción, los de DLC mostraron el menor par de roscado medio. De todas formas, observaron con el recubrimiento DLC más desgaste adhesivo que con los recubrimientos TiCN o TiAlN.

Sobre los mecanismos de corte y de desgaste de la herramienta Klo et al. [Klo10] estudiaron el mecanismo de desgaste que sufrían los insertos de carburos recubiertos con Al₂O₃ en la capa exterior y de titanio Ti(CN) en las de enlace, al torneado ADI. Tornearon dos grados diferentes el ADI-900 y el ADI-1200 bajo condiciones de refrigeración en seco y refrigeración masiva. El primero es un grado de elevada ductilidad y resistencia, mientras que el segundo tiene una elevada dureza y resistencia al desgaste. Al mecanizar en seco el ADI-900, se observó desgaste de cráter en la zona próxima al filo de corte. Este modo de desgaste puede explicarse por el comportamiento adhesivo de la matriz austenítico-ferrítica y el deslizamiento discontinuo de la viruta por la cara de desprendimiento. Al utilizar refrigerante, aumentó la vida de la herramienta y el criterio de vida vino dado por el desgaste de flanco.

Según experiencias anteriores, en el torneado de materiales con microestructura austenítico-ferrítica, la de los ADI, el mejor resultado se obtuvo con recubrimientos del tipo PVD en los que destacaba una elevada resistencia al desgaste a altas temperaturas y

la buena adhesión al recubrimiento [Kle00], [Bou12]. Se ha sugerido el empleo de recubrimientos de TiAlN en el roscado de ADI [Klr06].

Para roscar ADI es crítica la buena adhesión del recubrimiento al sustrato para soportar los elevados esfuerzos de tipo dinámico que se producen, por tener una microestructura discontinua y alternarse partes duras con otras blandas.

A pesar de la importancia del proceso, no se han encontrado investigaciones relativas al estudio de los recubrimientos más adecuados para aplicar a los machos en el roscado de los ADI.

2.4 PREPARACIONES SUPERFICIALES DEL FILO DE CORTE

Dentro de las preparaciones superficiales del filo se incluyen las previas y las posteriores a la aplicación del recubrimiento, con las que se produce la mejora de rendimiento a vida de las herramientas. Además, con las preparaciones superficiales adecuadas después del rectificado se consigue un elevado grado de calidad y reproducibilidad del acabado, que afecta a la fiabilidad de la herramienta. En la Figura 2.5 se recoge la secuencia de operaciones de producción de las herramientas de corte:

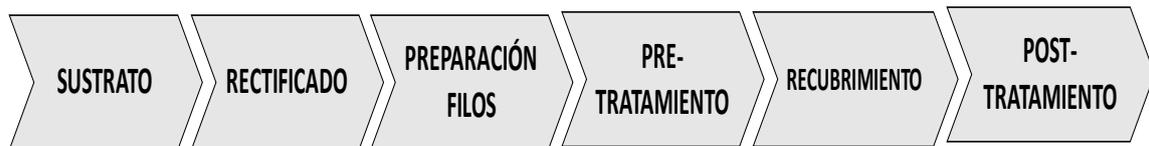


Figura 2.5: Sucesión de operaciones sobre la herramienta de corte

2.4.1 Las preparaciones superficiales previas o pretratamiento

Con el tratamiento superficial se reducen los defectos en el filo de corte y en las superficies contiguas a él de desprendimiento y de incidencia. Se eliminan pequeños defectos superficiales que puede haber tras el mecanizado y rectificado. El filo de corte después del rectificado tiene un filo más afilado, pero con una considerable rugosidad, que puede facilitar el “chipping” (desconchado del filo). Las preparaciones superficiales aumentan el radio de filo, pero reducen la rugosidad del filo y de las caras contiguas, como se explica en la Figura 2.6:

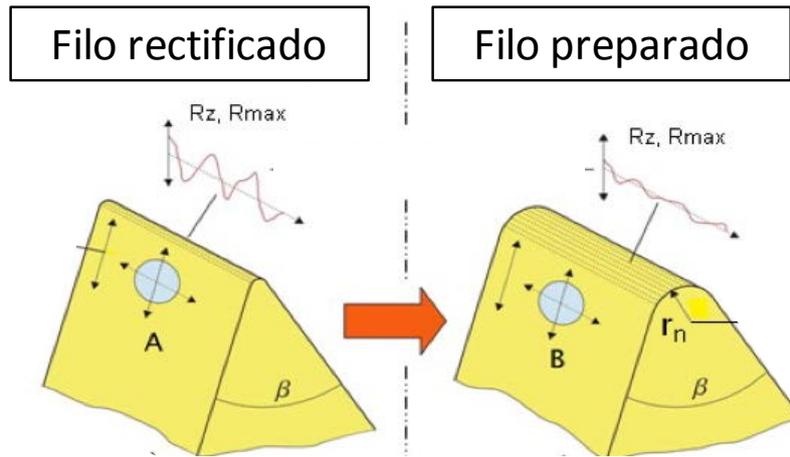


Figura 2.6: Filo de corte antes y después de la preparación superficial [Cor09]

Uno de los objetivos del tratamiento previo es el de mejorar la micro rugosidad con lo que mejora la adhesión del recubrimiento a los carburos de tungsteno del sustrato. Otros son aumentar las tensiones residuales de compresión con el sustrato de forma que mejore la adhesión y la estructura del recubrimiento. La finalidad es aumentar la micro rugosidad y la posterior adherencia del recubrimiento a los carburos de tungsteno del sustrato [Rec05].

En la Figura 2.7 se aprecia cómo afecta la preparación superficial al radio del filo y a la rugosidad en las zonas contiguas:

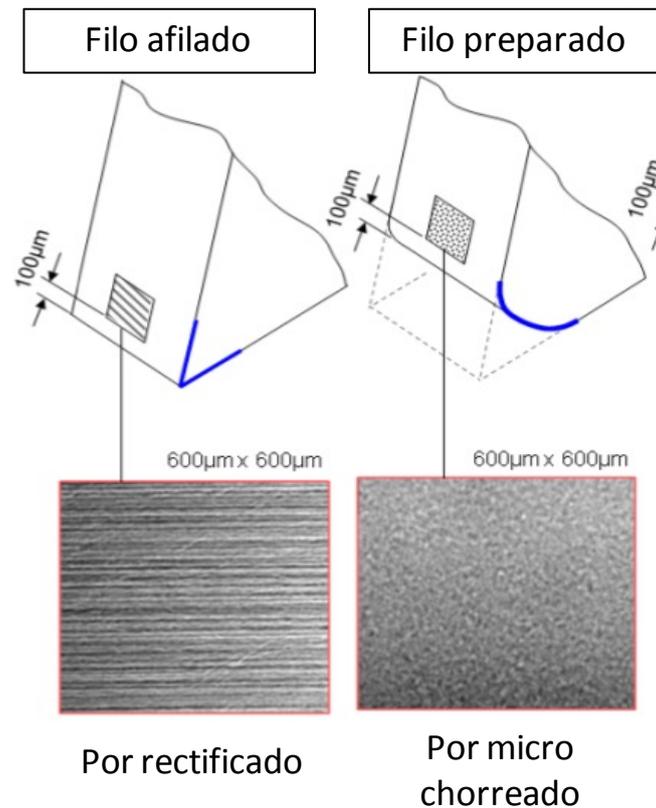


Figura 2.7: Cambio del radio de filo y de la rugosidad por el tratamiento de filo [Cor09]

Estos tratamientos también tienen efecto en la microgeometría del filo de corte, porque suavizan el radio de filo de forma que se reduce el riesgo de chipping del filo recubierto además de fiabilizar y aumentar la repetibilidad del acabado. En la Figura 2.8 se muestra el aumento de las tensiones superficiales al reducir el radio de filo:

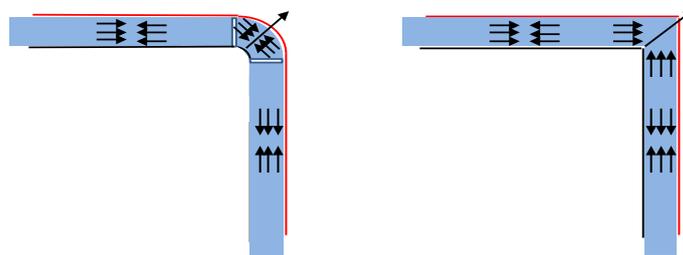


Figura 2.8: Fragilidad del recubrimiento por el aumento de las tensiones superficiales

El radio del filo condiciona la robustez o fragilidad del recubrimiento. Sobre un filo más redondeado se producen menores tensiones residuales del recubrimiento que sobre un filo más agudo, pero el agudo corta mejor, requiere menos esfuerzo para cortar. Con el más romo se requiere más energía específica de corte y por tanto se genera más calor, tal como se explica en la siguiente Figura 2.9:

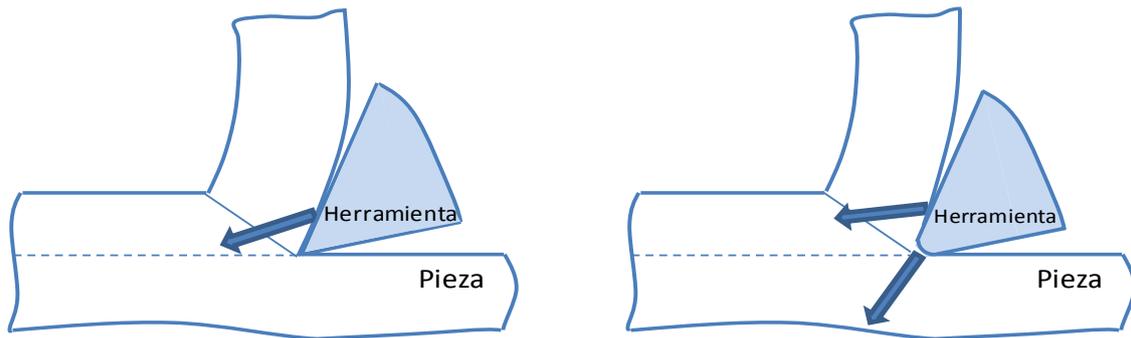


Figura 2.9: Efecto del redondeo del filo en el aumento de las fuerzas de corte

Interesa que el filo sea lo más agudo posible, pero sin que se produzcan excesivas tensiones superficiales y se pierda el recubrimiento con facilidad.

En las preparaciones previas por micro chorreado [Bou02], tras el rectificado, se produce el pulido de las aristas de las partículas de carburos WC duras, también la retracción del cobalto aglomerante del sustrato, porque es más dúctil y se introducen tensiones de compresión sobre los granos del carburo de tungsteno (WC) y aumenta la superficie de contacto del recubrimiento sobre el sustrato [Tus02], tal como se recoge en la Figura 2.10:

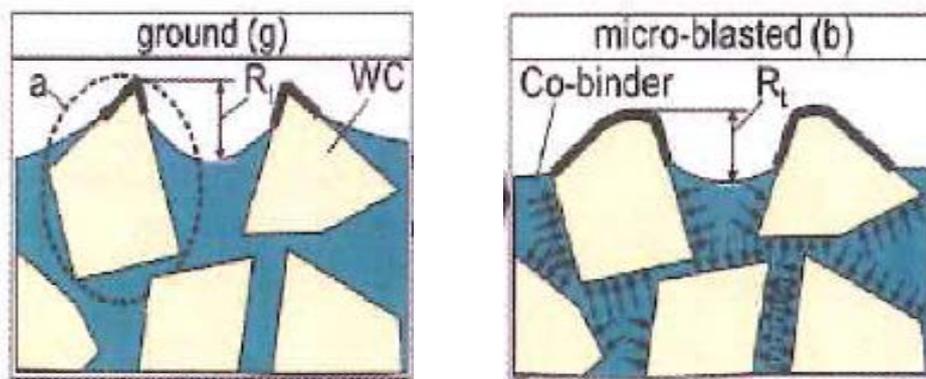


Figura 2.10: Modificación del sustrato por el micro chorreado (Fuente: [Bou12])

2.4.2 Postratamiento después del recubrimiento

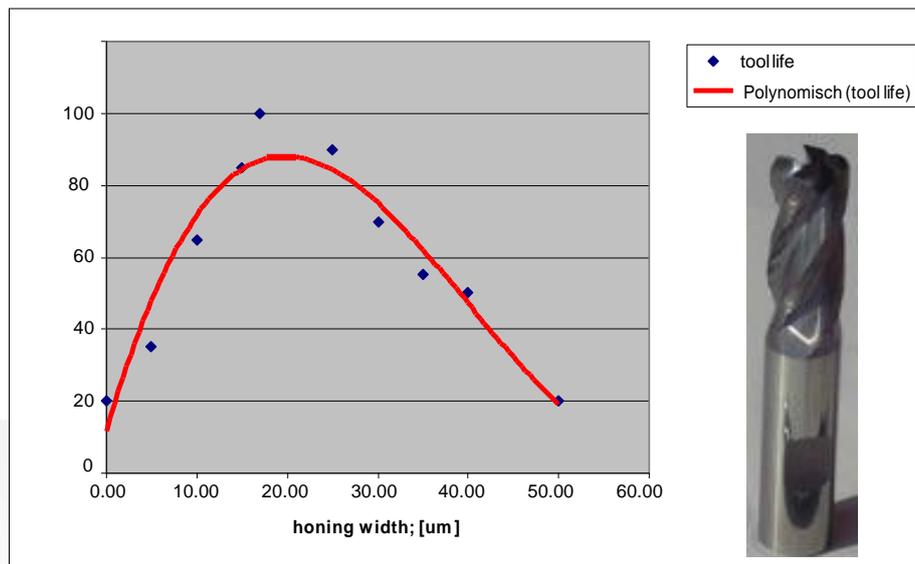
Se suele realizar el postratamiento para reducir la rugosidad superficial que puede quedar después de aplicar el recubrimiento de la herramienta, característicos de los recubrimientos del tipo PVD y también para introducir tensiones de compresión superficiales en el recubrimiento. Se eliminan los defectos superficiales, y se mejora la suavidad del recubrimiento, de modo que se reduce el coeficiente de fricción y se facilite el flujo de la viruta. Como consecuencia se reduce el desgaste por abrasión del recubrimiento [Bou12], [Fer15]. También interesa que el recubrimiento quede a

compresión en la zona del filo de corte, lo que da lugar a que las herramientas sean más tenaces [Sad09], [Cse09], [Bou12].

2.4.3 Efecto de la microgeometría

Se han desarrollado trabajos en los que se busca el radio de filo óptimo de las herramientas recubiertas con el que se obtiene la mayor vida de la herramienta, para materiales y operaciones concretas. Por ejemplo, para el fresado de 27MnCr5, con fresas con distintos radios de filo, y distintos sustratos se realizaron ensayos a vida en las mismas condiciones salvo el radio de filo, con valores comprendidos entre 5 y 40 μm y se obtuvieron curvas con una zona de máximos. Se repitió para diferentes sustratos, y se concluyó que se produce una curva con un valor de vida máxima para un radio intermedio, el radio de filo óptimo. La explicación es que el esfuerzo de corte con un radio reducido es menor, pero si es excesivamente afilado se producen elevadas tensiones superficiales en el recubrimiento en la zona del filo de corte y éste resulta frágil y se desprende, salta [Fer15], [Bou02]. Existe un radio de filo óptimo, experimental para cada aplicación de sustrato, material, proceso, etc.

La búsqueda del radio de filo óptimo se realiza sobre aplicaciones concretas. Son trabajos experimentales en los que intervienen el material, las condiciones de operación, de acabado, profundidad de pasada, el recubrimiento, etc. En la Figura 2.11 se recogen los resultados de la influencia de diferentes radios de filo en la vida de la herramienta, en el fresado de acabado de aceros altamente aleados:



Material: 1.2379 - X155CrVMo12-1
End mill: nACRo coated - d=10mm, z=4, ae=0.25 x d - ap=1.5 x d - vc=150 m/min - fz=0.05 mm/z

Figura 2.11: Radio de filo óptimo en el fresado de acero X166 Cr Mo 12-1 (Fuente: Platit®)

Otro ejemplo de obtención del radio de filo óptimo, es el mostrado en la Figura 2.12 en el que se tornea material CK45 con herramientas cuyo radio de filo se obtiene de tres modos diferentes, por microchorreado, por pulido con cepillo y por pulido contra filamentos de nylon. De cualquiera de las tres formas se obtiene que el radio que ofrece el menor desgaste de flanco es el de 12 μm .

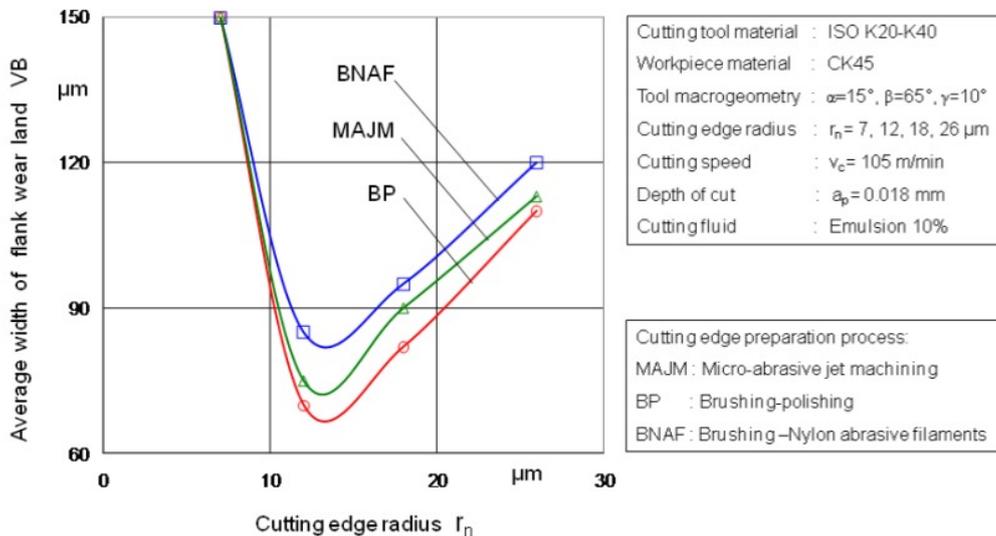


Figura 2.12: Radio de filo óptimo [Cor09]

2.5 LAS FUNDICIONES ADI

Dentro de estas fundiciones se desarrolla su modo de obtención y sus características mecánicas en función de los distintos grados en que se clasifican. Las propiedades macro y microestructurales determinan su maquinabilidad.

2.5.1 Las fundiciones ADI

El material a roscar las fundiciones ADI, que se clasifican en distintos grados en función de las propiedades mecánicas que ofrecen. Los grados más empleados son los de los valores más bajos. En todos los casos, la resistencia a la tracción es superior a 800 MPa y para el grado más bajo la elongación mínima del 8%. En los grados superiores el valor de la resistencia a la tracción es más elevada, pero por el contrario tienen una menor elongación mínima. A continuación, en la Tabla 2.1 se recogen las propiedades mecánicas, según las dos normas de estandarización más empleadas, la americana ASTM y la europea EN:

ASTM A 897M-90	EN 1564 NORM				
QUALITY	QUALITY	Tensile Strength (MPa) min	0.2% Offset Yield Strength (MPa) min	Elong. min (%)	Brinell HBW 10/3000/30
	EN-GJS-800-8	800	500	8	260-320
Grade 1					
	EN-GJS-1000-5	1000	700	5	300-360
Grade 2					
	EN-GJS-1200-2	1200	850	2	340-440
Grade 3					
	EN-GJS-1400-1	1400	1100	1	380-480
Grade 4 & 5					

Tabla 2.1: Especificaciones de las fundiciones ADI s/ normas ASTM y EN

Son fundiciones dúctiles altamente aleadas a las que se realiza un tratamiento térmico en dos etapas muy precisas en temperaturas y tiempo, denominadas de austenización y de austemperado. Como se muestra en la Figura 2.13, la primera consiste en la austenización del material a una temperatura entre 840 y 930°C, estabilizado un tiempo, en la que se obtiene una microestructura homogénea austenítica con alto contenido en carbono. A continuación, en el austemperado se temple a unos entre 250°-400°C en sales y se mantiene a dicha temperatura. En esta fase se forma ferrita acicular y el carbono libre va al contorno de la austenita. Finalmente se deja enfriar a temperatura ambiente de forma que se obtiene la microestructura matricial característica de los ADI, la ferrita acicular entre la austenita estable a temperatura ambiente y cantidad de nódulos de grafito que dan estabilidad a la austenita e impiden la formación de la martensita.

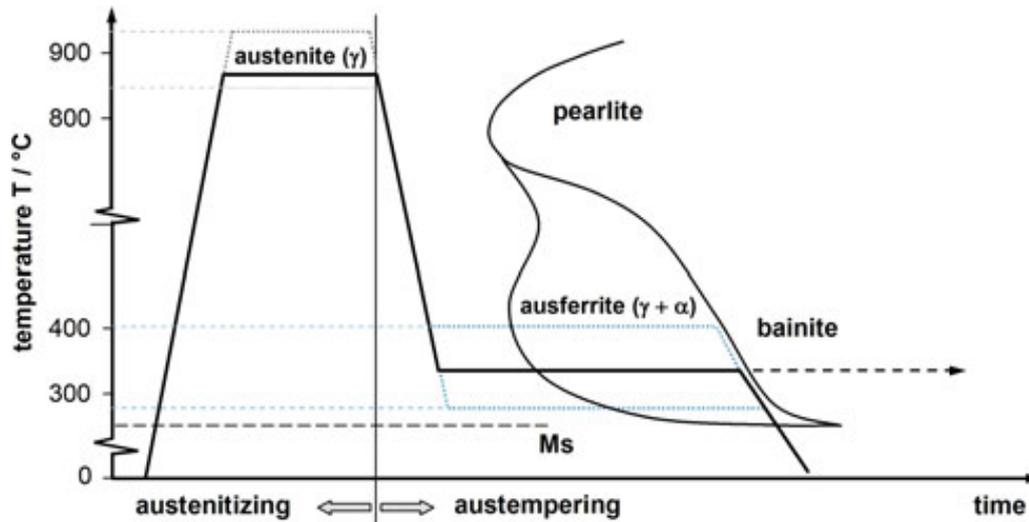


Figura 2.13: Diagrama de Austemperización (austenización y temple)

La obtención de los distintos grados, de propiedades diferentes, se realiza empleando mayor o menor cantidad de elementos aleantes (Cr, Mo, Ni,), y según la temperatura de temple (templando a las más bajas se obtienen los grados más altos) y adecuando la velocidad de enfriamiento. Por tanto, la obtención del grado en una pieza también depende de la forma y del espesor de material en cada punto de la pieza.

Otra característica muy destacada de las fundiciones ADI es su microestructura, que está compuesta por grafito, ferrita acicular y austenita finamente entremezclados, pero dependiente en cada punto, del proceso metalúrgico que se produce en éste. El resultado no es una microestructura uniforme con características homogéneas en todo el material, sino heterogénea con propiedades mecánicas dispersas.

El proceso de producción de la fundición es muy exigente, con unas condiciones de composición química precisa y consistente de los aleantes: carbono 3,6% (+/- 0,20%), Silicio 2,5% (+/- 0,20%), manganeso 0,95 (+/- 0,05%), cobre 0,8% (+/- 0,05%), níquel 2% (+/- 0,10%), tungsteno 0,3% (+/- 0,03%). Además, en la fase de fundición se tienen que haber producido más de 100 nódulos de grafito /mm²; una nodularidad de más del 90% [Bra01] y una cantidad de carburos inferior al 1,5%, mínimas inclusiones y porosidad, y una mínima relación de perlita vs ferrita. En la Figura 2.14 se muestra la microestructura del ADI a dos escalas:

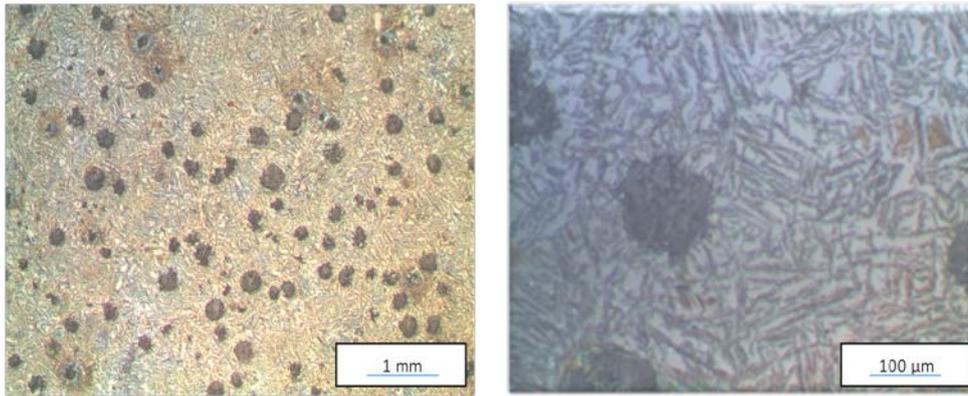


Figura 2.14: Microestructura de ADI-900

La buena resistencia al desgaste de los ADI se debe a que la austenita, estable a temperatura ambiente, bajo los esfuerzos de compresión, que se producen superficialmente en la zona de mecanización, se convierte en martensita, la forma más dura del acero, con lo que con el uso y desgaste mejoran las características mecánicas superficiales de las piezas.

2.5.2 Maquinabilidad de los ADI y del ADI-900

Una de las características más destacables de las fundiciones ADI, son las buenas propiedades mecánicas que ofrecen, pero también hay que destacar las dificultades de mecanización que presentan porque limitan su aplicación práctica. Como muestra de las dificultades de mecanización, en la Figura 2.15 se compara con otros materiales férricos, si la mecanizabilidad del AISI 1110, un acero al carbono, es 100, la del ADI-850 es del orden del 50%, cuando la de las fundiciones, dúctiles estimada sería de 120 [Bra01]:

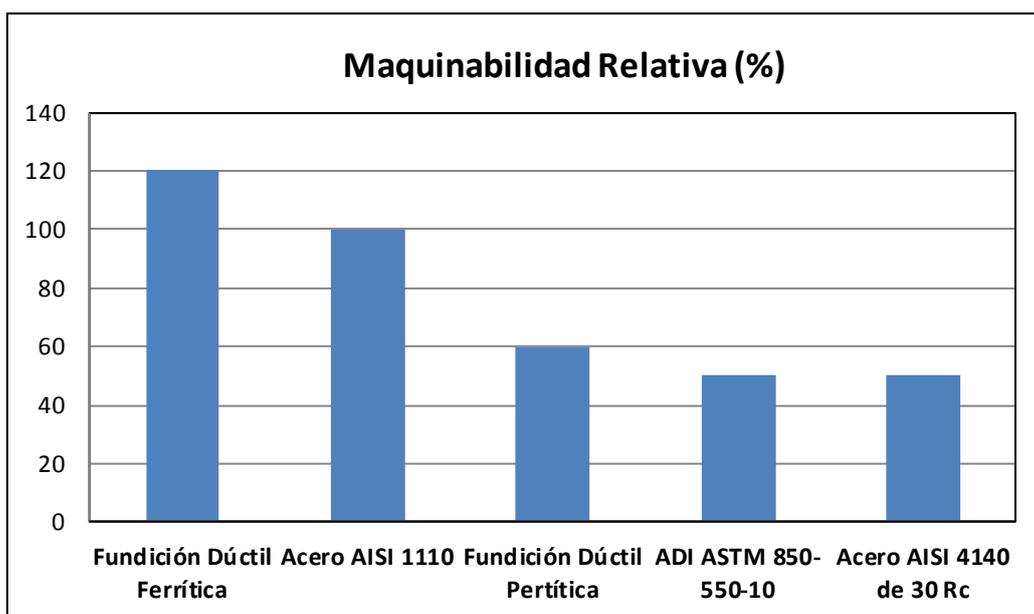


Figura 2.15: Maquinabilidad del ADI-850 frente a otras fundiciones dúctiles y acero

¿A qué se debe la dificultad para mecanizar ADI? Hay estudios [Klo07] en los que se describe que al mecanizar ADI se produce una combinación de desgaste por adhesión y por abrasión en las herramientas de corte, que provoca que su vida sea significativamente más breve que la de los aceros de propiedades mecánicas similares.

En general, la viruta de ADI es segmentada y muy corta, fluye y se adhiere en la cara de desprendimiento de la herramienta de corte y da lugar a esfuerzos elevados y muy fluctuantes, de alta frecuencia, según se adhiere y se libera. Este efecto está causado por la inusual micro-estructura austenítico ferrítica discontinua de los ADI. Durante la formación de la viruta, la austenita, con alto contenido en carbono, experimenta un fuerte cambio que conlleva una viruta más segmentada y a fuerzas de corte que exceden las de los aceros fundidos y templados. Los picos alternos de las fuerzas de corte son los responsables del aumento del desgaste y de la rotura de las herramientas en la zona próxima a los filos de corte [Arf13]. En la Figura 2.16 se recoge la formación fragmentada de la viruta de ADI que producen esfuerzos oscilantes:

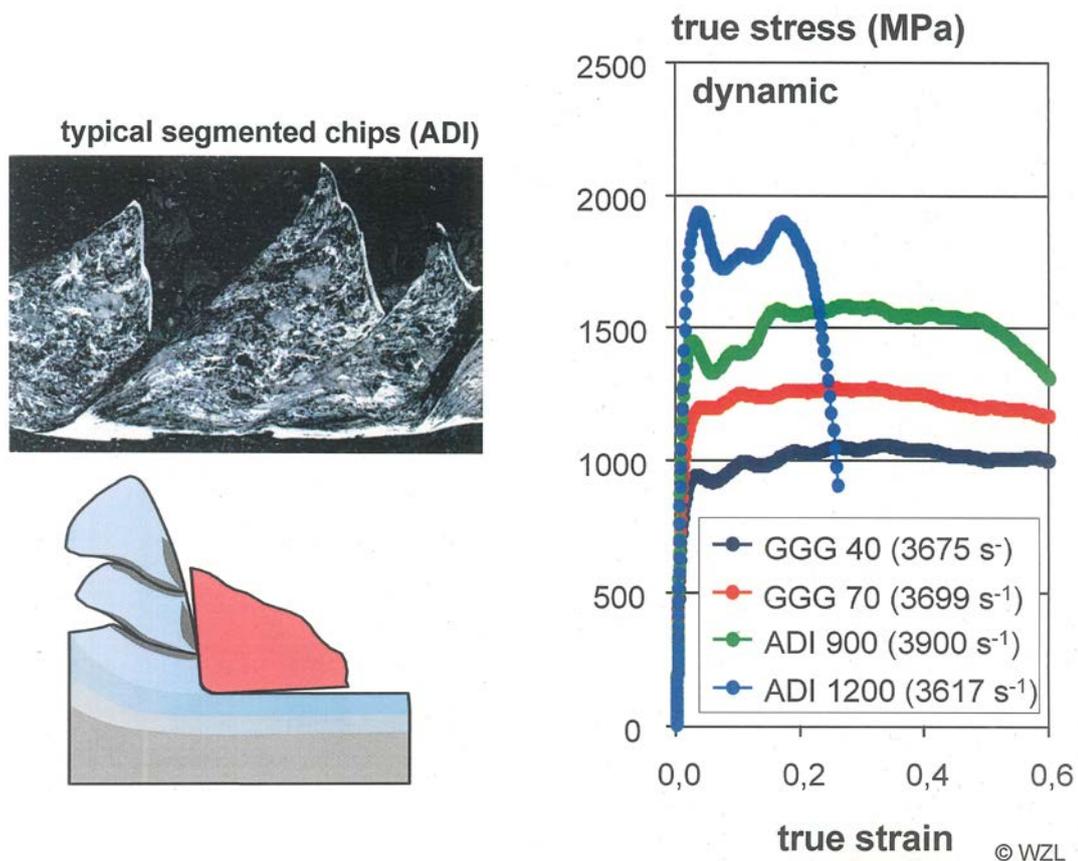


Figura 2.16: Viruta segmentada de ADI y gráfica con las fuerzas de corte oscilantes (Informe interno del WZL®)

A pesar de que la ferrita y la austenita individualmente no son duras, los átomos de carbono difundidos por la austenita y los de silicio en la ferrita los hacen un 75% y un

25% más duros respectivamente, de lo que suelen serlo [Klo07]. Además, siendo fundiciones altamente aleadas se suelen formar carburos, lo cual aumenta las dificultades para su mecanización.

Como se ha mencionado, la austenita retenida bajo la acción de esfuerzos de compresión de corte (por ejemplo, de torneado) se transforma superficialmente en martensita, forma que es especialmente dura y difícil de mecanizar. Este fenómeno se localiza en la pieza frente a la herramienta de corte, para reducirlo [Bra01] sugiere mecanizar más profundo y a menor velocidad.

El tipo de desgaste de las herramientas al mecanizar los ADI menos duros (ADI-900: 900 MPa, 290 HB) es principalmente por adhesión, mientras que en los ADI más duros (ADI-1500: 430 HB) es más relevante el desgaste por abrasión, debido a la mayor presencia de carburos y por tanto, al aumento de la dureza [Vas13]. En el caso de los ADI más duros se aconseja mecanizar antes de realizar el tratamiento térmico de austemperizado, mientras el material es aún hierro dúctil, y posteriormente tratarlos térmicamente en que adquirirán las propiedades mecánicas definitivas. Si fuera necesario se realizaría una operación final de acabado sobre el ADI definitivo, operación que sería de poco volumen. En el caso de roscado de ADI-900 no se alcanza tal grado de dificultad de mecanizado y se rosca una vez completado el tratamiento térmico de austemperizado sobre la microestructura final ausferrítica.

Los ADI tienen una gran tendencia a adherirse a los carburos de tungsteno que se usan habitualmente para mecanizar fundiciones de hierro. Se suele producir la adhesión del material cortado sobre las herramientas que tienen como sustrato carburo de tungsteno, en este proceso se forman microdurezas que aceleran el desgaste de la herramienta [Klo07].

Según estudios realizados al torneado ADI en comparación con otras fundiciones, dúctiles ferríticas y perlíticas, el mecanismo de desgaste y rotura de la herramienta es por desgaste de cráter hasta llegar a la rotura, como se recoge en la Figura 2.17:

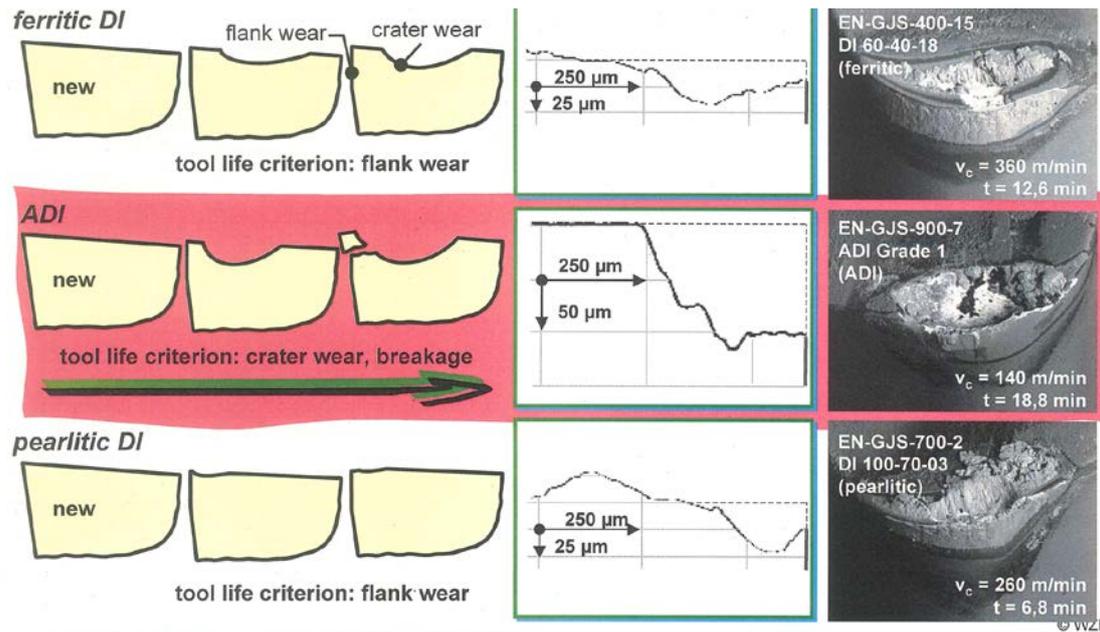


Figura 2.17: Mecanismos de desgaste y criterio de rotura (Informe interno del WZL®)

Las fundiciones ADI tienen baja conductividad térmica, por lo que se aconseja la aplicación de refrigerante para evacuar el calor generado durante el corte, ya que sino aumentan los modos de desgaste. Además del empleo de refrigerante, las herramientas con las que se obtienen los mejores resultados son las herramientas recubiertas [Klo10b].

Sobre la influencia de refrigerante al mecanizar ADI, en estudios realizados al torneado ADI-900 en seco y con refrigeración, los mejores resultados se obtuvieron en el caso de refrigerar con taladrina estándar, tal como se muestra en la Figura 2.18:

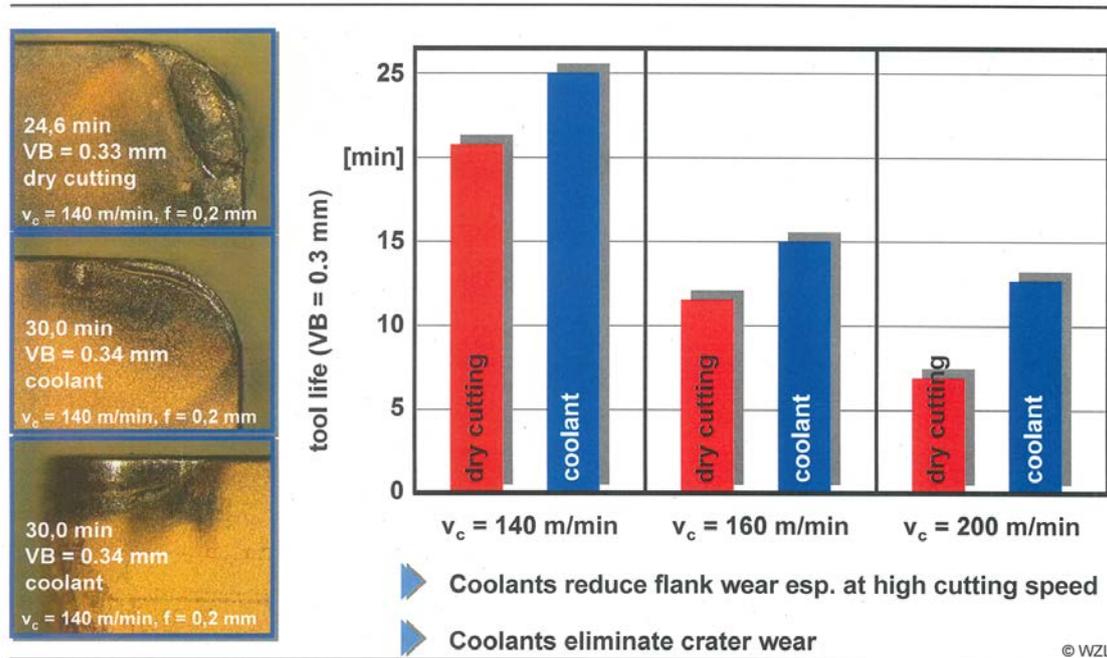


Figura 2.18: Comparación de vida de la herramienta en seco y con refrigerante (Informe interno del WZL®)

Respecto a las características geométricas de las herramientas que han de mecanizar ADI tienen que tener un filo de corte afilado y ser también robustos, tenaces para soportar los picos de las fuerzas fluctuantes y además tener una buena resistencia al desgaste abrasivo y adhesivo.

En el estudio de la herramienta más adecuada para torneado de ADI-900, teniendo en cuenta la formación de la viruta a elevada frecuencia y su efecto en los elevados picos de las fuerzas de corte fluctuantes, Arf et al. [Arf13] aconsejan el uso de herramientas con filos de corte robustos, acondicionados en su microgeometría a un radio de punta $r_n = 0,8$ mm.

Particularizado para el caso del roscado con macho, éstos deben de cumplir que la herramienta tenga un buen sustrato para que el recubrimiento no falle por el sustrato, y que la geometría del macho y de los dientes que realizan el corte esté acondicionada al ADI y sea de calidad. El recubrimiento debe de estar bien adherido al sustrato para soportar las fuerzas de corte fluctuantes, dinámicas que se producen en trabajo en el filo de corte [Klr06], [Klo07].

2.6 CONCLUSIONES

El material a roscar el ADI presenta particularidades de mecanizabilidad debidas a su microestructura discontinua formada por ferrita, austenita retenida y nódulos de grafito, y a cómo se forma y fluye la viruta, que es corta y discontinua, lo que provoca picos en los esfuerzos de corte, con valores elevados y sobre todo muy fluctuantes, de elevada

frecuencia, lo cual produce en las herramientas de corte el desgaste por adhesión y por abrasión. Estas características del corte exigen a la herramienta unas propiedades geométricas adecuadas y una calidad elevada.

Debido a las dificultades de mecanización que presentan los ADI se emplean herramientas de corte recubiertas por ofrecer mejor rendimiento que las no recubiertas. Así para roscar ADI es crítico que la herramienta de corte presente una buena adhesión del recubrimiento al sustrato, para que pueda soportar los elevados esfuerzos de tipo dinámico que se producen, de carácter discontinuo y alternarse partes de la viruta duras con otras dúctiles y de elevada adherencia.

Se han realizado esfuerzos considerables en la investigación del comportamiento de las herramientas recubiertas para torneado, fresado y para taladrar ADI, pero a pesar de la importancia del proceso de roscado con macho, no se han encontrado investigaciones relativas al estudio de los recubrimientos más adecuados para el roscado de los ADI.

En el presente trabajo, las herramientas han sido recubiertas con recubrimientos del tipo PVD por deposición de arcos catódicos laterales rotatorios (LRCAD®) y se les ha aplicado tratamientos de preparación superficial, previos y posteriores a recubrir. Los recubrimientos en principio más adecuados son los más evolucionados, como los Multi Layer, los gradiente, los de contenido en Si, y los nano compuestos.

En lo que respecta a la operación de roscado, hay que destacar que es una operación compleja a la que afectan muchas variables de geometría de los machos, como es la forma de los dientes, que sean rectos o helicoidales, la forma de la punta, esto es los dientes de chaflán, la zona de alivio, etc. y las características de operación de máquina, como son las velocidades de trabajo, si existen errores de alineación, o de runout, la refrigeración, etc.

Lo más destacable, en los estudios sobre roscado de materiales concretos, es que a medida que se ha elevado el nivel de exigencia, de rendimientos y de velocidades, han surgido nuevos problemas experimentales que se han tratado de resolver y solucionar, como son los asociados a la máquina, a la geometría de los machos específica para cada material, las particularidades del proceso, o buscando el recubrimiento más adecuado a cada aplicación.

CAPÍTULO 3

3. UN MÉTODO PARA LA MEJORA DEL ROSCADO

3.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se han desarrollado especialmente los aspectos relativos a la herramienta y de la máquina que intervienen en el roscado, y que en los capítulos posteriores se han definido y ensayado en la aplicación concreta del roscado de ADI. Entre los relacionados con la herramienta destacan la geometría y los recubrimientos de los machos de roscar. Entre los de la máquina, se plantean las características de la fresadora con la que se realiza la operación, y también del propio material con el que tiene que trabajar, que en este caso impone una serie de condiciones por su naturaleza. Se desarrollan los puntos de cada una de las mencionadas partes tal como se recoge en la Figura 3.1:

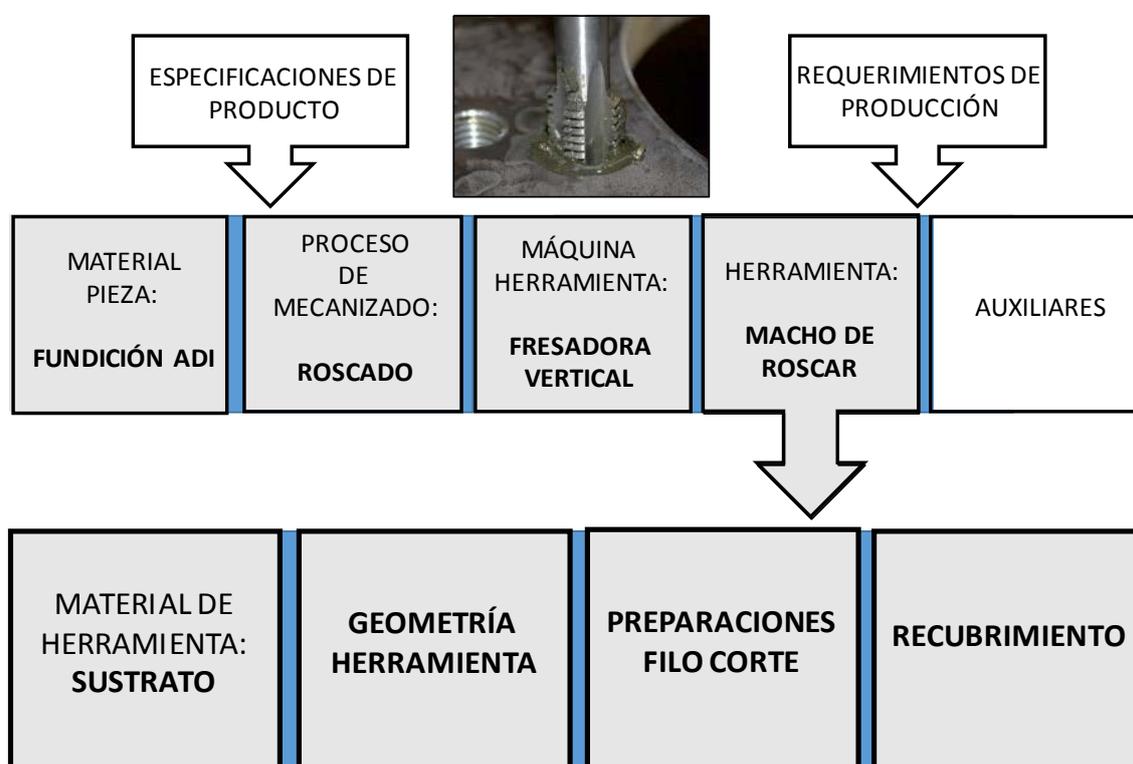


Figura 3.1: Los puntos que se desarrollan en el capítulo

3.2 LA HERRAMIENTA: EL MACHO DE ROSCAR

Se recogen a continuación, en la Figura 3.2 las partes tenidas en cuenta del macho de roscar y los ensayos realizados:



Figura 3.2: Esquema de las características del macho de roscar

3.2.1 Sustrato del macho

En general, las propiedades que ha de cumplir el sustrato de la herramienta de corte, en este caso del macho suelen ser las siguientes:

- Debe de ser estable física y químicamente a altas temperaturas.
- Debe de ser duro y resistente al desgaste que le produce la viruta incluso a elevadas temperaturas. Y ser suficientemente tenaz para evitar su fractura por el desgaste. Todo ello para satisfacer los requerimientos mecánicos y térmicos.

Entre los tipos de material del sustrato para machos de roscar se encuentran:

- *Los Aceros rápidos, HSS y HSS-PM:* (admiten trabajar hasta 500°C). - Los aceros rápidos se forman con polvo-sinterizado. Se trata de aceros con alto contenido en carbono con un elevado contenido en elementos de aleación como el wolframio, molibdeno, cromo, vanadio y cobalto. Su principal característica es que combinan una buena tenacidad con una elevada dureza, aunque inferior a los de metal duro. Los aceros rápidos son un buen sustrato para combinar con recubrimientos del tipo TiN, TiAlN, TiCN, etc.

- *Metal Duro*: se obtienen por el sinterizado de microgranos de carburo de wolframio con cobalto a alta temperatura y presión. También se pueden añadir pequeñas cantidades de otros carburos como titanio y vanadio. Por ser una mezcla se debe de tener en cuenta la presencia de partículas frágiles, o la existencia de porosidad lo cual aumenta la posibilidad de fractura de los filos tras el recubrimiento. La dureza que pueden alcanzar es mucho más elevada que la de los aceros rápidos, pero son menos tenaces y más frágiles, y por tanto tienen más riesgo de romperse al roscar. Esta mayor fragilidad es la razón por la que no estén aconsejados para roscar materiales difíciles. La rotura del macho de corte durante el roscado supondría que parte quedara en la pieza, de forma que la podría invalidar.

Empleando machos de metal duro en el roscado de aceros de baja aleación se puede trabajar a velocidades de corte de 50 m/min.

Es conveniente que el sustrato sobre el que se realice el recubrimiento tenga una dureza superior a 58 Rockwell C para que la adhesión del recubrimiento al sustrato sea buena.

3.2.2 Geometría del macho de roscar

Se definen las características geométricas más adecuadas que deben de tener los machos para roscar agujeros ciegos. En la Figura 3.3 se ve un macho de dientes rectos, refrigeración interna y el detalle de la punta de chaflán:



Figura 3.3: Macho de M8. Detalle de la punta: dientes y ángulo de chaflán y paso

El número de canales por vuelta, corresponde también con el número de dientes en cada vuelta. Las fuerzas de corte y el desgaste se distribuyen entre el número de dientes o filos de corte por vuelta, teniendo en cuenta que entre dientes debe de haber suficiente espacio para poder evacuar la viruta sin que se colmaten los canales de evacuación.

El ángulo de hélice de los canales de evacuación de viruta. El macho de la Figura 3.3 es de canales rectos, por lo que la hélice es de 0°. Cuanto mayor es el ángulo de hélice más

se facilita la evacuación de la viruta cuando es larga como ocurre con los materiales dúctiles. En el caso de materiales de viruta fragmentada, no se requiere que los canales tengan hélice para evacuar la viruta con facilidad. Por otro lado, los dientes de canales rectos son más robustos y adecuados para trabajar con materiales duros.

La punta de chaflán, afecta al número de hilos por los que se pasa del diámetro del agujero taladrado y el diámetro de la rosca. En el caso mostrado, en 3 hilos y con ángulo de chaflán de $15^{\circ} 30'$ se completa la diferencia de diámetros entre el del agujero taladrado y el del diámetro exterior de los dientes.

Hay que destacar que la fuerza de corte es perpendicular a la cara de los dientes del canal de evacuación, tal como se muestra en la Figura 3.4. El aumento del ángulo de hélice favorece la evacuación de las virutas largas, pero provoca que aparezcan fuerzas de corte con componente axial que habría que tener en cuenta para la sujeción de la herramienta.

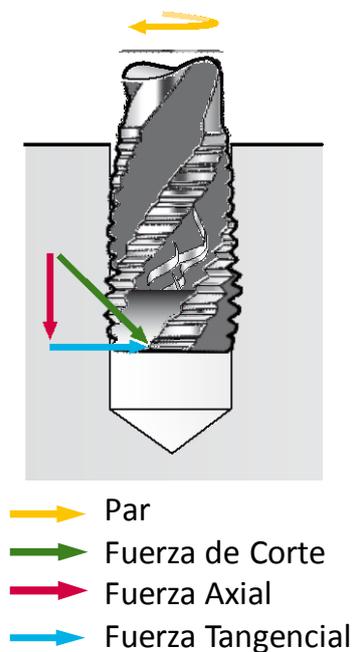


Figura 3.4: Relación del Par y de Fuerzas en el roscado con macho (Fuente: Walter Prototyp®)

En la Figura 3.5 se muestra una sección transversal con la representación del modo de corte de la viruta y la geometría de los dientes de chaflán que son los que lo realizan:

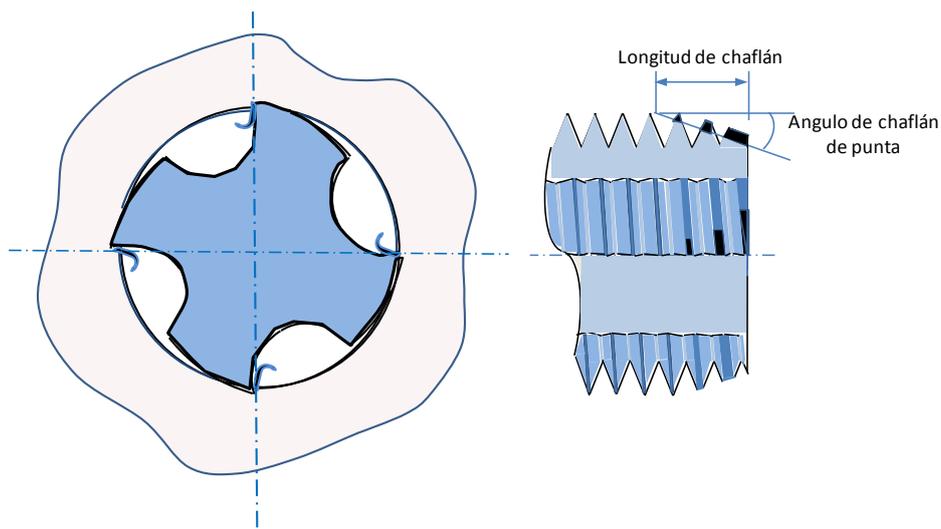


Figura 3.5: Sección transversal de roscado con la formación de la viruta y detalle de la punta de chaflán

La geometría de la punta afecta a la vida de la herramienta porque ésta define el número de dientes entre los que se distribuye el arranque de material. Hay que destacar que los dientes que arrancan el material son los de la punta de chaflán. En la Figura 3.6 se muestra la sucesión de secciones que cortan los dientes de chaflán:

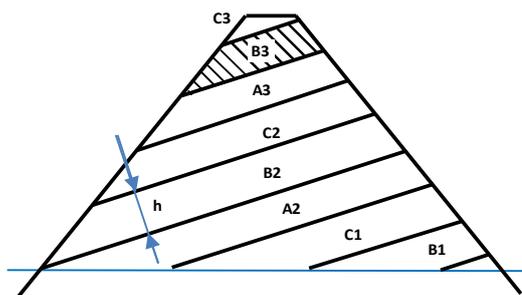
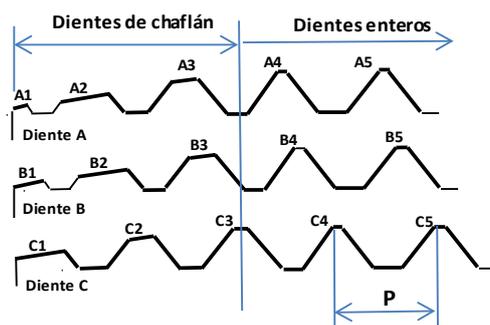
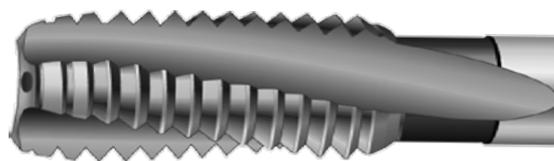


Figura 3.6: Arranque del material por los sucesivos dientes de punta

Y en la Figura 3.7 la influencia del número de dientes de chaflán y del ángulo de punta. Por ejemplo, 4 dientes por vuelta x 3 dientes de chaflán = 12 dientes de trabajo.

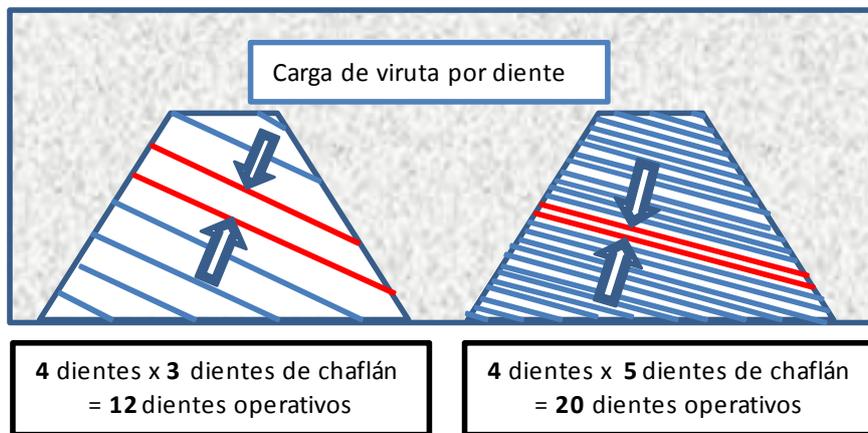


Figura 3.7: Carga por diente en función del número de dientes de chaflán y del ángulo de punta

El desgaste de los dientes depende del número de dientes operativos. Entradas más largas reducen la carga de la arista de corte, y aumentan la vida de la herramienta, pero producen el aumento del par de giro. Las entradas largas suelen ser adecuadas para materiales menos resistentes. Para roscar agujeros ciegos se emplean machos con entradas cortas, porque producen virutas de mayor sección, más fáciles de romper y de evacuar que las de entradas más largas, que producen virutas de menos sección y más finas.

La longitud de chaflán viene definida por la diferencia entre la longitud del agujero taladrado y la longitud de roscado (el número de dientes de punta de chaflán x paso entre dientes).

Los ángulos de los dientes. El ángulo de desprendimiento representado en la Figura 3.8 es de 0° , es adecuado para conseguir un flanco de diente robusto. El ángulo de desprendimiento para trabajar con materiales duros suele ser cero de modo que aumente la robustez de los primeros dientes, ver el detalle de los ángulos de desprendimiento, de incidencia y la zona de alivio en la Figura 3.8:

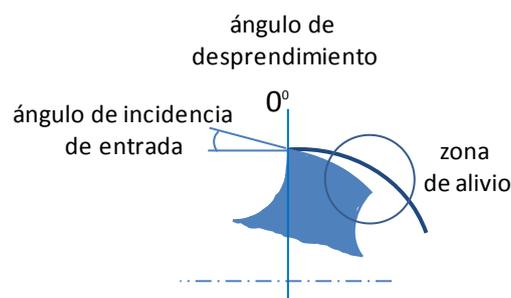


Figura 3.8: Detalle de los ángulos de incidencia, de desprendimiento y de la zona de alivio

El ángulo de alivio entre la cara de incidencia y la pared del agujero, tiene la función de guiar al macho axialmente en el giro, para que el corte radial sea preciso, pero sin que se produzca una elevada fricción. Un menor ángulo de alivio proporciona un diente más robusto como se requiere al roscar materiales duros.

Al roscar agujeros ciegos y llegar al final de la carrera de roscado y comenzar el retroceso por el agujero roscado, interesa que el macho arranque los restos de viruta medio cortada, por lo que el ángulo de alivio suele ser menor y los dientes más robustos, que con agujeros pasantes. En el momento en se produce la inversión del giro, la parte trasera del diente se enfrenta a la viruta medio seccionada, por lo que es deseable que la viruta tenga cierta sección, que sea consistente para poder romperla. En la secuencia de la Figura 3.9 se recoge en la inversión de sentido de giro y el efecto de corte que tiene sobre la viruta:

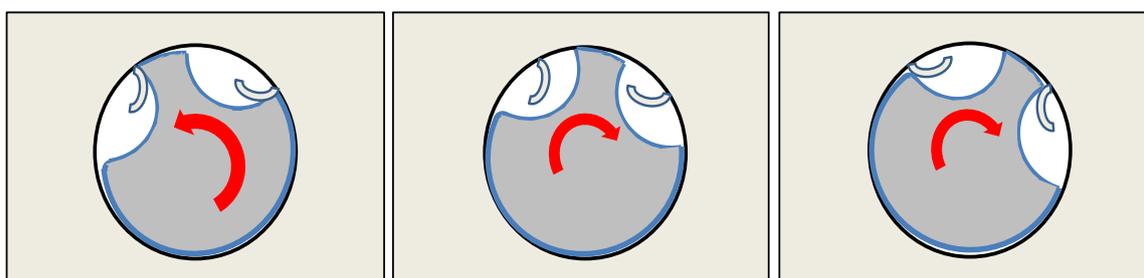


Figura 3.9: Corte de la viruta al llegar al final del roscado y comenzar la inversión del giro

En el roscado a elevadas velocidades se suelen emplear adaptadores, acoplamientos intermedios que tienen cierto juego axial. Para el roscado a alta velocidad, por una parte, se requiere que la punta de chaflán sea corta (supone menor par de corte, favorable para alta velocidad), y por otra, que el ángulo de incidencia de los flancos sea elevado para que el macho admita cierta holgura axial, y se permita el trabajo axial del acoplamiento.

El roscado de agujeros ciegos y de viruta corta aconseja emplear machos con orificio axial interior para aplicar refrigeración interna y evacuar más fácilmente la viruta.

3.2.3 Refrigeración y lubricación

Las funciones que tiene que cumplir el refrigerante son evacuar el calor de la pieza y de la herramienta, y como lubricante facilitar a la herramienta el arranque de la viruta. En el caso de que la herramienta trabaje a elevadas temperaturas, el deterioro será mayor y aumentará su desgaste, por tanto, con el refrigerante se reducirá la temperatura de la herramienta, se reducirán los desgastes y aumentará su vida útil.

En el roscado con macho, el aspecto más relevante es la refrigeración, mientras que en el roscado por laminación sería más importante la lubricación. El modo de refrigeración

puede ser con cantidades mínimas (MMS y MQL) o con fluido de corte. A pesar de las desventajas que tiene la refrigeración con fluido de corte frente a la refrigeración con cantidades mínimas, por el mayor coste de mantenimiento, por los inconvenientes medioambientales, el mayor coste energético, etc., un material de baja conductividad térmica aconseja que el tipo de refrigeración empleado sea con fluido de corte porque es el modo por el que se prioriza la mejor refrigeración. Además, la refrigeración con cantidades mínimas no es aconsejable para agujeros de más de $1,5x\varnothing$. Para longitudes de roscado mayores se aconseja la refrigeración con fluido refrigerante.

En general, la función del refrigerante en el caso de roscado con macho, además de la evacuación del calor y de la viruta, es reducir el coeficiente de rozamiento, que en el caso de roscar en seco sería muy elevado.

La aplicación de refrigeración interna axial a lo largo del macho hasta la punta requerirá realizar un agujero a todo lo largo del macho de un diámetro suficiente para el paso del refrigerante.

3.2.4 Recubrimientos

A continuación, se describen las características de los recubrimientos ensayados en este caso, que son del tipo PVD (Physical Vapor Deposition) por aplicación de la técnica de deposición de arco catódico de Platin®. Pero la selección del recubrimiento depende del material y de las condiciones en las que vaya a trabajar la herramienta de corte.

Los recubrimientos PVD empleados son el AlTiN, AlCrSiN, AlTiSiN-MultiLayer, AlTiSiN-Gradiente, en la primera tanda de ensayos, y en la segunda una preparación denominada AlTiSiN-18 y el TiAlCN-CBC. Sus características son las que siguen:

- AlTiN es el recubrimiento de alto rendimiento más universal, que se usa para taladrar y roscar aceros y fundiciones. En este caso la matriz de AlTiN tiene un elevado contenido en aluminio (>67%). Se forma una capa de unos 2,5 μm de espesor que se deposita en la herramienta.
- AlCrSiN: comercialmente conocido como nACRo, es un recubrimiento nanoestructurado con cristales duros de AlCrN insertados en la estructura amorfa de nitrato de silicio (Si_3N_4). Con esta configuración, el recubrimiento obtiene una elevada resistencia a alta temperatura y buena adhesión. Se utiliza en la mecanización de materiales difíciles como los aceros aleados y las superaleaciones.
- AlTiSiN: sobre la base del AlTiSiN se ensayan dos configuraciones estándares de AlTiSiN, una multi-capa o Multi-Layer (ML) y otra Gradiente (G), y otra especialmente diseñada por Metal Estalki® denominada AlTiSiN-18. El

recubrimiento Multi-Layer (ML) combina una fase de elevada dureza AlTiSiN con otra tenaz TiN. El AlTiSiN es un nanocompuesto de una fase de granos de AlTiN en una matriz de Si₃N₄. En la configuración de gradiente (AlTiSiN-G) el contenido de aluminio aumenta linealmente desde el sustrato hasta la superficie dando como resultado una superficie con una elevada microdureza. El AlTiSiN-18 es una estructura similar al AlTiSiN, pero con más contenido en silicio.

- **TiAlCN-CBC:** es el recubrimiento Diamond-Like-Carbon (DLC) de Platit®. Por su bajo coeficiente de fricción es una capa que facilita el flujo de la viruta, y adecuado para mecanizar materiales en los que se produce el fenómeno de filo recrescido como sucede en los ADI. Para mejorar la adhesión y mejorar la tenacidad se combina con un TiAlCN gradiente.

Las propiedades mecánicas de estos recubrimientos se recogen en la Tabla 3.1:

	Espesor (µm)	Micro estructura	Nano Dureza (GPa)	Coeficiente Fricción (seco, acero)	Max. Temperatura de uso (°C)	Rugosidad (µm)	Test Scratch Adhesión	
							Primer Crack (N)	Delamin. (N)
AlTiN	2.5	Monoblock	38	0,7	900			
AlCrSiN	2.5	Nanolayer	40	0,35	1100	0.1	97.9	>200
AlTiSiN -ML	3	Multilayer	38	0,45	1200 / 900	0.06	102	188
AlTiSiN -G	3	Nanolayer Gradient	45	0,45	1200	0.08	89	188
AlTiSiN -18	3	Nanolayer	48	0,45	1200			
TiAlCN	3	Nanolayer	33	0,30	500			
CBC			20	0,15	450			

Tabla 3.1: Propiedades mecánicas de los recubrimientos empleados (Fuente: Metal Estalki®)

3.2.5 Equipo de aplicación del recubrimiento de Platit®

En la propia máquina de recubrimiento previamente a aplicar el recubrimiento, se completa la limpieza previa sometiendo a las herramientas a un plasma iónico en atmósfera de gas argón. El equipo empleado en la aplicación de los recubrimientos ha sido una instalación de Platit $\pi 80$ ® del que se recogen las características generales en la Figura 3.10:

Información General:

- Unidad compacta de recubrimiento duro
- Basada en tecnología Platit LARC® (2 cátodos laterales rotativos)

Recubrimiento:

- Recubrimientos principales estándar: TiN, AlTiN, nACO®

Hardware:

- Volumen uso de plasma: $\varnothing 300 \times H 400$ mm
- Carga Máx.: 50 kg
- Tiempo de ciclo para herramientas ($2\mu\text{m}$): $\varnothing 10 \times 70$ mm, 162 piezas en 3,5 h.



Figura 3.10: Instalación de recubrimiento Platit $\pi 80$ ®

La instalación dispone internamente de los cátodos rotativos de ubicación lateral y central como se muestra en el esquema de la Figura 3.11:



Figura 3.11: Instalación con cátodos laterales y carrusel de herramientas rotativo LARC de Platit®.

En la siguiente Figura 3.12 se explica con un esquema su principio de funcionamiento:

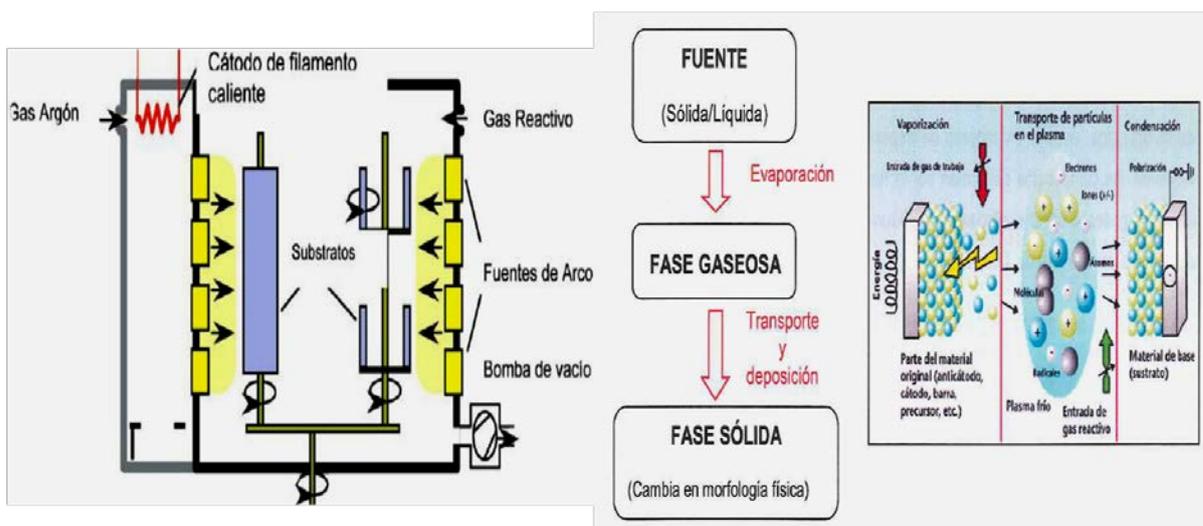


Figura 3.12: Esquema de funcionamiento de los equipos de recubrimiento PVD. (Fuente: Platit®)

En una atmósfera de gas reactivo a muy baja presión y a una temperatura de entre 400 y 500°C se aplica una diferencia de potencial entre la fuente (el cátodo), las barras del metal emisor y la herramienta, el receptor (el ánodo), de modo que los átomos del cátodo (Al, Ti, Cr) se evaporan y transportan a través de la fase gaseosa en forma de plasma y se depositan en la superficie del sustrato de la herramienta. El espesor de los depósitos suele ser del orden de unas micras (entre 2 y 15). Es una técnica de recubrimiento ampliamente empleada por fácil, simple, de bajo coste y rápida que proporciona una muy buena adhesión por la alta tasa de ionización.

3.2.6 Preparaciones superficiales previas y posteriores al recubrimiento

Se realizan antes del tratamiento térmico, después de realizarlo y también en este punto se incluye la preparación micrométrica del radio de filo.

3.2.6.1 El pretratamiento de la herramienta antes de recubrir

Se realiza a los machos antes de aplicar el recubrimiento. Se preparan las superficies para mejorar la adherencia del recubrimiento al sustrato, y también con las preparaciones se eliminan pequeños defectos superficiales que puede haber tras el mecanizado y rectificado del macho. Se consigue aumentar la rugosidad del sustrato a nivel micro e introducir tensiones superficiales de compresión en el sustrato con lo cual mejora la adhesión del recubrimiento.

Las líneas superficiales que quedan en el macho de roscar tras el tallado de los canales, en la cara de desprendimiento de los dientes, son líneas en las que se acumulan tensiones

residuales, y al fluir la viruta sufren desgaste abrasivo. Cierta rugosidad es beneficiosa para mejorar la adhesión del recubrimiento, pero sin que sea excesiva. En la Figura 3.13 se aprecian las líneas horizontales de la cara de desprendimiento que son iniciadoras de la delaminación del recubrimiento. Estas líneas se reducen por medio del pulido previo a recubrir.

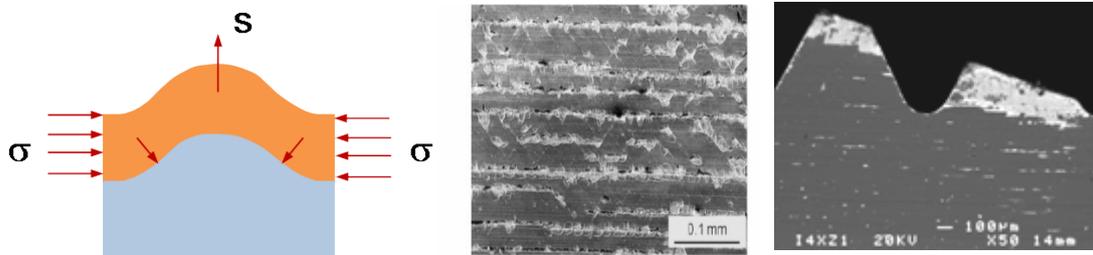


Figura 3.13: Tensiones residuales y marcas del rectificado iniciadoras de la delaminación del recubrimiento

El pretratamiento de pulido suele realizarse por micro granallado (o microchorreado) o por pulido orbital (drag grinding). En el pulido orbital las herramientas se cuelgan de un planetario y se mueven girando en un medio abrasivo. Como abrasivo se puede emplear arena fina, cáscara de cereales de pequeño tamaño, por ejemplo, cáscara de arroz, etc. El pulido por micro granallado se realiza por la proyección de granalla, también de pequeño tamaño (entre 3 y 40 μm). Ésta se puede realizar en seco o en medio húmedo. En la Figura 3.14 se muestra una instalación satelital de pulido orbital:



Figura 3.14: Equipos de pretratamiento superficial de herramientas de pulido orbital (drag grinding) (Fuente: OTEC®)

3.2.6.2 El postratamiento de la herramienta recubierta

Se realiza un postratamiento para reducir la presencia de gotitas superficiales (droplets) asociadas a la evaporación por la acción del arco eléctrico, característico de los recubrimientos del tipo PVD y también para introducir tensiones de compresión superficiales en el recubrimiento. Tiene que ser un proceso muy preciso para no llegar a dañar el recubrimiento. Además de reducir la rugosidad superficial, también se consigue aumentar la tensión superficial del recubrimiento a compresión. Gotitas de recubrimiento características del proceso de PVD, se pueden ver en la Figura 3.15:

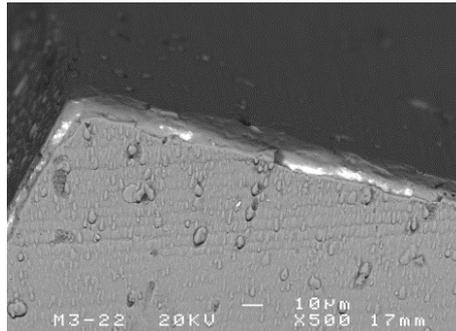


Figura 3.15: Pequeñas gotas de recubrimiento (droplets) procedentes del proceso de PVD

A continuación, en la Figura 3.16 se muestran algunos de los equipos de tratamiento superficial más habituales, sus características y campos de aplicación:

Principales métodos de pre-tratamientos							
Criterios/ Características	Afilado a mano con lima de diamante	Cepillado	Drag Grinding (Pulido)	Micro- chorread o seco	Micro- chorreado húmedo	Chorro de agua	Acabado magnético
Calidad	La mejor	Medio	Buena	Medio	Bueno	Bueno	Bueno
Constancia	Depende de la persona	Bueno	Buena	Medio	Bueno	Bueno	Bueno
Flexibilidad	Muy alta	Alta	Media	Alto	Bueno	Medio	Bueno
Productividad	Baja	Medio	Media	Medio	Alto	Muy alto	Bueno
Precio	Sólo sueldo	Alto	Medio	Bajo	Medio	Muy alto	Alto
Disponibilidad de máquinas estándar		Si	Si	Si	Si		Si
Posibilidad de pulir canales		Limitación en profundidad	Si	Si	Si		Limitación en profundidad
Posibilidad de eliminar droplets		Si	Si	Si	Si		Si
Característica especial	Típico para pequeños rectificados	Comúnment e usado para operaciones de acabado	Difícil eliminación de droplets en pequeños diámetros	Residuos de material en la superficie	No queda material después del chorreado. Se consume alta cantidad de aire	Sólo para grandes produccion es, se necesita protección contra la corrosión	Usado en micro-htas. Se necesita desmagnetiz ar



Figura 3.16: Tecnologías de las preparaciones superficiales previas y postratamiento (Fuente: Platit®)

3.2.6.3 Microgeometría

Trata de la búsqueda del radio de filo óptimo con el que se obtiene la mayor vida de la herramienta, para materiales y operaciones concretas. Suele ser experimental y corresponder a radios de filo comprendidos entre 5 y 40 μm . Requiere de un proceso de obtención y de medición del radio de redondeo muy precisos.

Se define como radio de filo, en general, el que une los planos de incidencia y de desprendimiento. Existe un radio de filo óptimo, experimental para cada aplicación de sustrato, material, proceso, etc. En la Figura 3.17 se muestra el radio de filo:

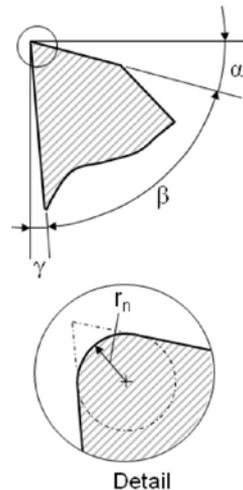


Figura 3.17: Representación del radio de filo

La búsqueda del radio de filo óptimo se realiza sobre aplicaciones concretas. Son trabajos experimentales en los que intervienen el material, las condiciones de operación, de acabado, la profundidad de pasada, el recubrimiento, etc.

3.3 LA MÁQUINA: FRESADORA VERTICAL

Al cambiar de máquina surgen diferencias en el roscado que se asocian a ella, de modo que la vida de los machos de roscar se puede ver afectada por la máquina empleada. Los factores que intervienen en la calidad de operación de roscado son principalmente la rigidez del conjunto de la máquina, la precisión y la sincronización de los movimientos. En el esquema de la Figura 3.18 se recogen los elementos y características analizados de una fresadora vertical:

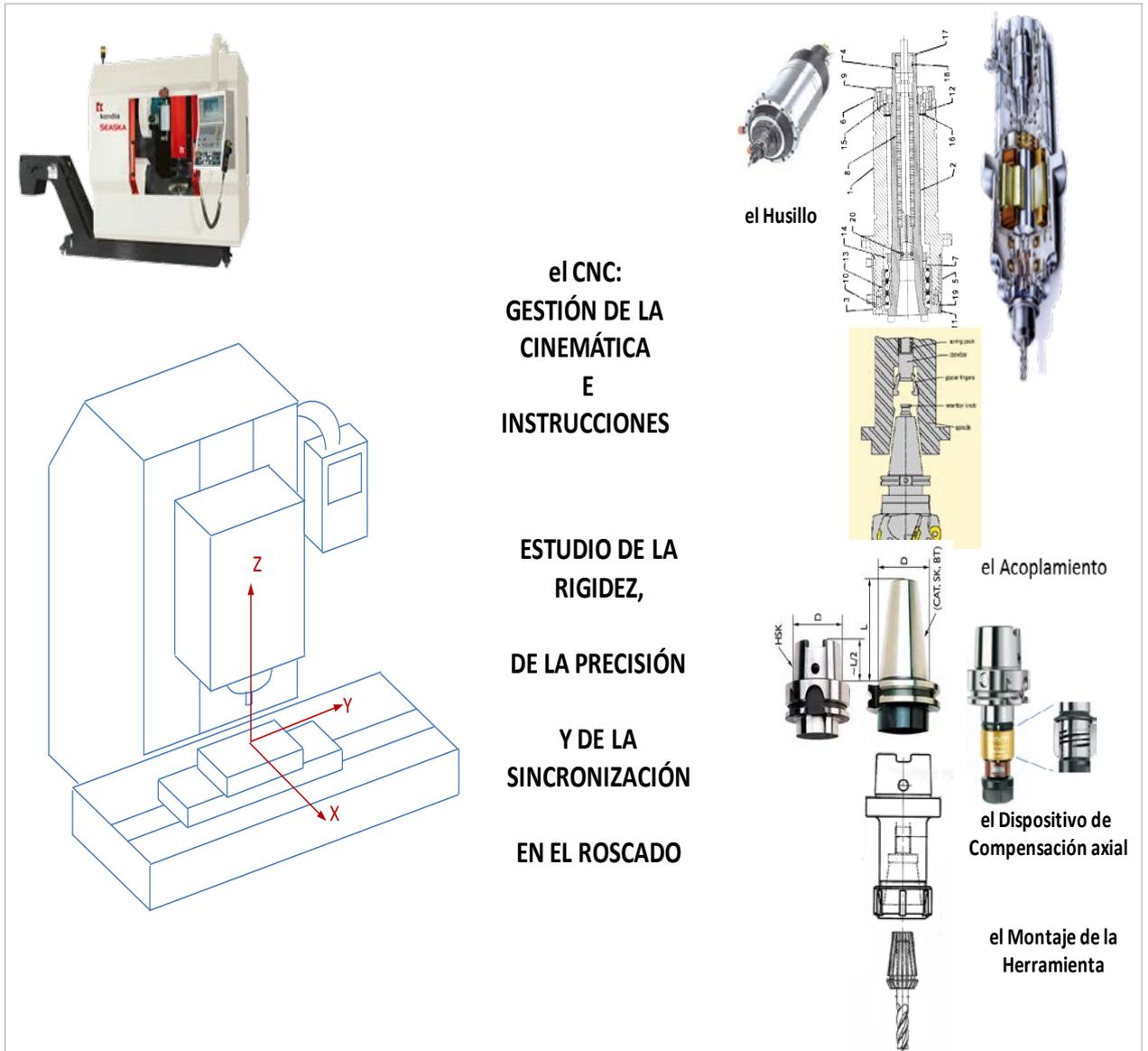


Figura 3.18: Ensayos y Mediciones realizados en la fresadora

En el caso de la operación de roscado con macho, los esfuerzos de corte y la velocidad de operación de la herramienta son muy inferiores a los de las operaciones de fresado, por lo que las fresadoras en cuanto a rigidez y respuesta estática y dinámica suelen cumplir con las exigencias del roscado. Las exigencias asociadas a la operación de roscado son sobre todo, la precisión y la sincronización de los movimientos a alta velocidad del cabezal. Así los elementos de la máquina a considerar son los relacionados con el posicionamiento y los movimientos del cabezal.

3.3.1 Rigidez en el roscado

Las mediciones de rigidez se realizan midiendo la de toda la cadena del conjunto de elementos que interviene desde la cimentación hasta la punta de la herramienta. La forma

de obtener la rigidez ha sido aplicando un desplazamiento determinado y midiendo el esfuerzo asociado, de forma que la rigidez es la relación del esfuerzo respecto del desplazamiento.

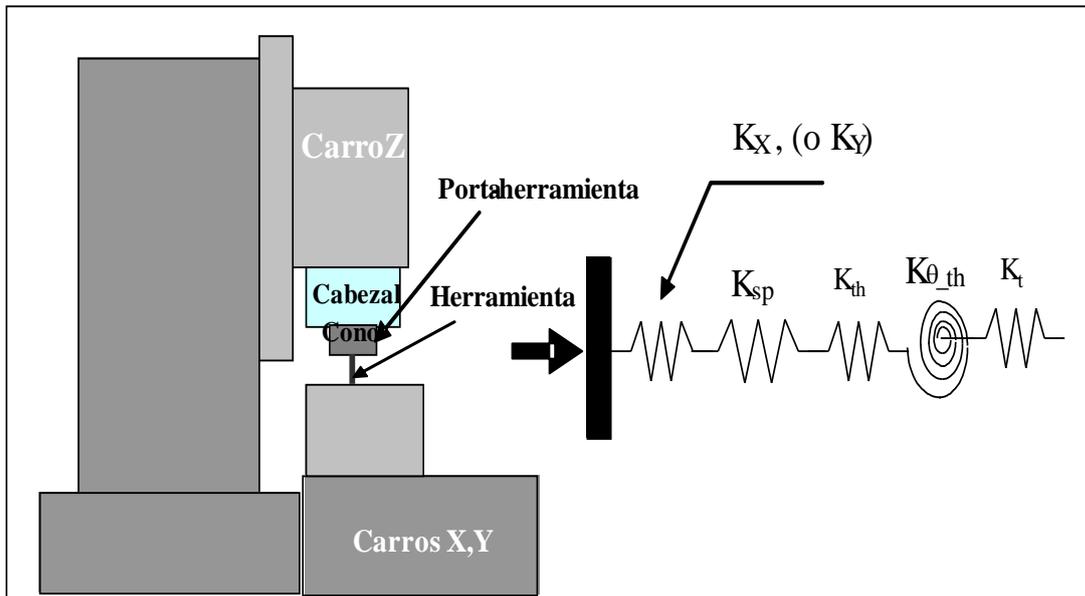


Figura 3.19: Elementos que intervienen en la rigidez del conjunto y esquema equivalente (Fuente: [Uri06])

3.3.2 Estructura y el accionamiento del husillo

Las características que se exigen a las fresadoras son las de ofrecer una respuesta robusta ante los esfuerzos asociados al proceso de mecanizado. A su estructura se le requiere, sostener los componentes y los periféricos y proporcionar movimientos con precisión a la velocidad requerida. En la Figura 3.20 se define el sistema de referencia de los ejes de la máquina:

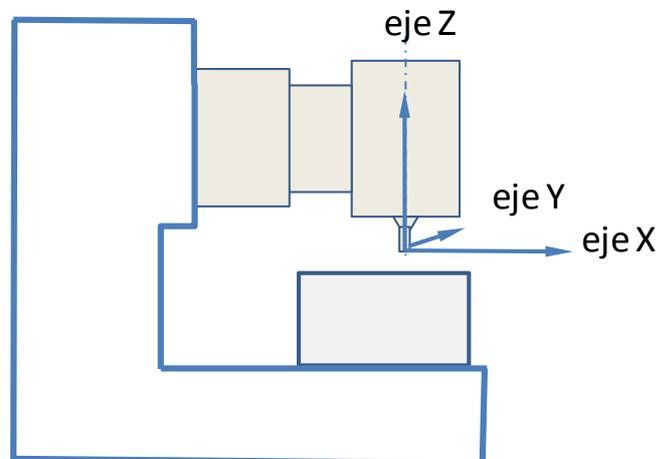


Figura 3.20: Nomenclatura de los ejes de la fresadora

Los tipos de accionamiento, de motorización del cabezal empleados en las fresadoras pueden ser de tres tipos: por la acción de un motor exterior, a través de correas o de engranajes y los que tienen el motor integrado en el cabezal, y dentro de éstos los casos de motor con acoplamiento directo y el de husillo con electro-mandrino o electro-husillo. En la Figura 3.21 se muestran los tres tipos básicos de accionamiento:

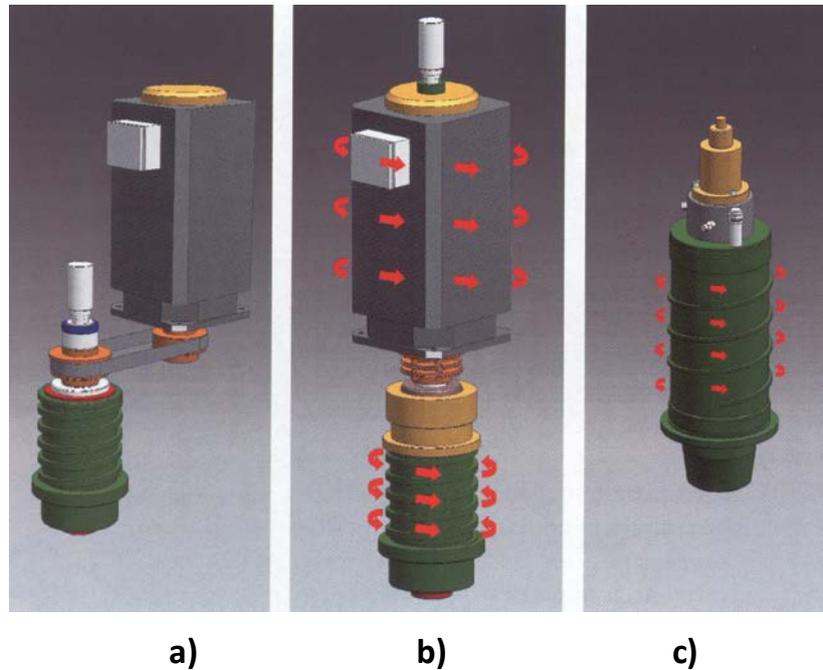


Figura 3.21: Tipos de accionamiento: a) motor exterior al husillo, b) motor directo a husillo, c) electro-mandrino (Fuente: Ibarria®)

Los directos son sistemas de transmisión con menores vibraciones y ruido, pero en los que el calor generado en el motor puede afectar al husillo, por lo que su refrigeración es un punto crítico. Las fresadoras empleadas en el roscado de alta velocidad suelen ser de alguno de los dos últimos tipos mencionados, son sistemas en los que el motor está integrado en el cabezal y la transmisión del motor al eje es directa intercalando un acoplamiento intermedio, de modo que el rendimiento de transmisión es máximo. Los sistemas de motores con electro-mandrino tienen el motor integrado en el husillo y pueden trabajar a elevadas velocidades, por encima de 18.000 rpm.

La solución elegida de motor-husillo viene definida por los requerimientos de potencia, carga, rigidez y la velocidad, y en función de éstos también se define la sujeción del husillo a la estructura de la fresadora. La elección de los rodamientos se hace en función de los requerimientos anteriores y pueden ser de bolas, cónicos y de rodillos. Los de contacto angular soportan esfuerzos del cabezal de componente axial, como los que se producen al taladrar y al roscar.

3.3.3 Montaje del cabezal

El desplazamiento del carro Z guiado en el que se monta el cabezal se suele realizar a través de un motor husillo a bolas:

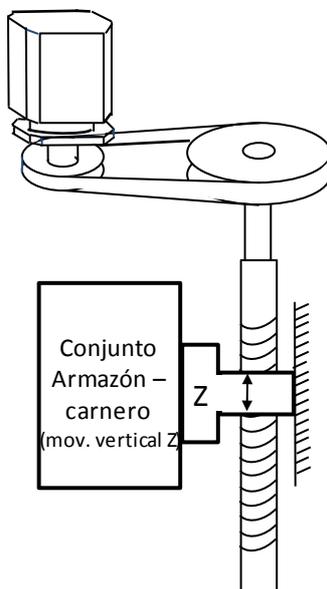


Figura 3.22: Esquema de la transmisión del movimiento vertical tipo del cabezal

Además, existen varias configuraciones para el montaje del cabezal sobre los cojinetes en los que se aloja, como son los de tipo Back to Back/ DB O, Face to Face/ DF X, y en Tandem/ DT. Los montajes habituales suelen ser de tres o más juegos de rodamientos de estas configuraciones. Y se suelen introducir precargas para aumentar la rigidez en la dirección axial en detrimento de la vida de los rodamientos. En la Figura 3.23 se muestran las configuraciones habituales de montaje de los cojinetes del cabezal:

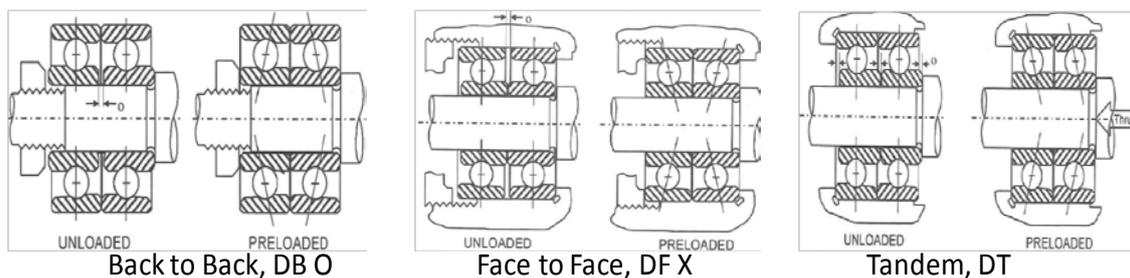


Figura 3.23: Esquema de las configuraciones de montaje del cabezal más empleadas (Fuente: [Lop09])

Actualmente es habitual el empleo de rodamientos cerámicos en lugar de los de acero. Tienen la ventaja de ser del orden de un 60% más ligeros, de forma que a altas velocidades las fuerzas centrífugas sobre las pistas son muy inferiores, así se reduce su desgaste, y la vida del conjunto aumenta significativamente. La desventaja de los rodamientos

cerámicos es que son más frágiles y menos resistentes a los impactos que se suelen producir entre la herramienta y la pieza, como en ocasiones ocurre durante el trabajo de las fresadoras.

Una vez montado el conjunto del motor, cabezal y el conjunto de acoplamientos hasta la herramienta, además de ser robusto y rígido debe de tener todos los componentes rotativos equilibrados.

La rigidez estática de la fresadora que se puede considerar suficiente en uso general para las operaciones de fresado, en el plano XY relacionando la fuerza con la deformación admisible en la punta de la herramienta, suele ser del orden de 20 N/ μ m (o 20 kN/mm).

Respecto a la rigidez dinámica, en el régimen de las velocidades de roscado empleadas durante los ensayos $V_c=30$ m/min (1200 rpm = 20 Hz) y la poca profundidad de arranque de material, $\leq 0,6$ mm ($\Delta r = 4 - 3,4$ mm) no tiene relevancia en la generación de vibraciones ya que trabaja en una zona de comportamiento estable para la máquina. En la Figura 3.24, el mapa de zonas de comportamiento estable e inestable en función de la profundidad de pasada y de las revoluciones:

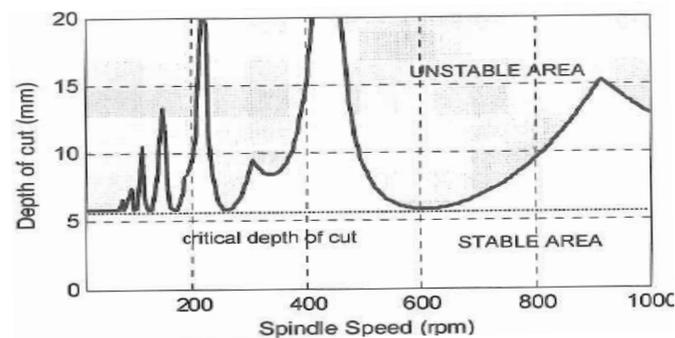


Figura 3.24: Zonas de comportamiento estable e inestable en función del espesor y de la velocidad (Fuente: [Lop09])

Los ejes X, Y y Z se mueven sobre guías de fricción ajustadas y carros accionados mediante un husillo a bolas con tuerca flotante sujetos a éstos.

3.3.4 El acoplamiento de la herramienta al cabezal

Se trata del conjunto entre el cabezal y la herramienta cuya función principal es la transmisión del par de giro a la herramienta. Se compone del sistema de acoplamiento entre el cabezal y el porta-herramientas en el que va montada la herramienta de corte.

La principal característica del conjunto es que debe de tener una elevada precisión dimensional y repetitividad, además de ser fácil de montar, cada vez que se monte. Esto se consigue con un sistema de acoplamiento tan rígido como sea posible, para evitar la

deflexión del conjunto portaherramientas en condiciones de mecanización a elevadas velocidades.

El conjunto se compone de tres elementos, el cono (la parte cónica que se introduce en el husillo), la brida exterior (que sirve para sujetar el porta-herramienta en el almacén intercambiador de herramientas) y el porta-herramienta o pinza que es el elemento que sujeta la herramienta de corte.

Los acoplamientos más empleados son los de cono ISO y los del tipo HSK. Los de cono ISO tienen el contacto en una superficie cónica y son adecuados y suficientemente precisos para trabajar hasta velocidades de 6.000-8.000 rpm. Pero en el caso de fresadoras más modernas en las que la velocidad puede llegar a 40.000 rpm, dadas las elevadas fuerzas centrífugas que se producen, el apoyo en una superficie cónica puede no ser el adecuado, de modo que se han desarrollado otros tipos de acoplamiento específicos, de apoyo en dos caras como son los porta-herramientas del tipo HSK.



Figura 3.25: Acoplamientos al cabezal: Conos ISO y HSK

3.3.5 Tipos de acoplamientos al portaherramientas

Adicionalmente, entre el acoplamiento al husillo y el porta-herramientas en el que se aloja la herramienta el acoplamiento suele ser de alguno de los tres tipos siguientes que se recogen en la Figura 3.26, directamente la herramienta al cabezal, con un dispositivo de compensación axial y con un dispositivo de autoinversión del giro de la herramienta:

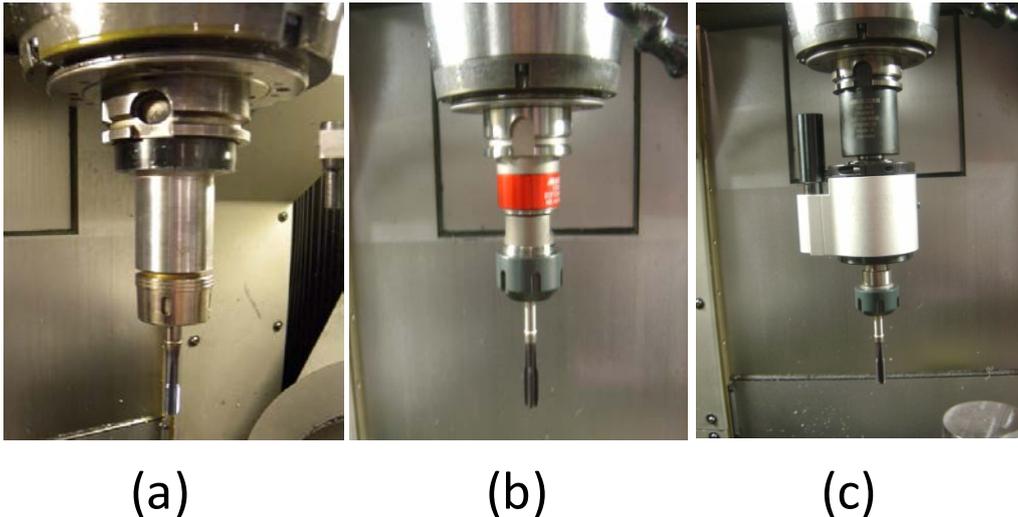


Figura 3.26: Tipos de acoplamiento: (a) rígido, (b) con dispositivo de compensación axial y (c) con acoplamiento de autoinversión

3.3.5.1 Directo y rígido

Introducido el macho en el portaherramientas y éste en el cono, se mueve con el cabezal de la fresadora. El cabezal debe de sincronizar perfectamente el giro con el avance (paso), con la geometría exacta del macho. Pero pequeñas diferencias en el giro, por efecto del desgaste en el cabezal, de las inercias, por la medición del posicionamiento, o por la gestión de las señales en el ordenador, etc. pueden producir roscas no perfectas.

3.3.5.2 Dispositivo de compensación axial

Mandriles sincronizados con compensación axial de tensión-compresión mínima. Para compensar pequeñas diferencias entre el paso del macho y la sincronización de la máquina se emplean acoplamientos flexibles intermedios que admiten tolerancias axiales de unos pocos mm, pero sin holguras en la transmisión del par. Básicamente, disponen de un muelle corto de gran constante elástica. En la Figura 3.27 se muestra un dispositivo de compensación axial y el muelle, el elemento determinante en su funcionamiento:



Figura 3.27: Mandril de compensación axial y detalle del muelle interno (Fuente: Walter Prototyp®)

Estos sistemas tienen el inconveniente de que al roscar materiales blandos la presión del muelle puede llegar a dañar los flancos de la rosca producida.

Los elementos de compensación proporcionan mayor seguridad (menor riesgo de rotura de la herramienta), mayor calidad de las roscas y mayor duración de las herramientas ya que se reducen las fricciones entre los flancos de los machos y los del agujero roscado.

3.3.5.3 Acoplamiento de autoinversión

Los acoplamientos de autoinversión del sentido de giro de la herramienta que funcionan con un embrague, independientemente del giro del cabezal (del tipo de Tapmatic de Emuge®). De modo que para la extracción del macho el dispositivo invierte el sentido de giro de éste, mientras el cabezal de la fresadora no cambia su sentido. Se realiza a través de un planetario de engranajes que se activa al llegar al final de la carrera de roscado. La gran ventaja es que el husillo no debe de cambiar el sentido de giro, con las deceleraciones, inversión y aceleraciones, en cada ciclo de roscado. Su empleo es especialmente interesante por la rapidez del ciclo de operación, y se emplea para producir grandes volúmenes de roscas.

El empleo de acoplamiento intermedios tiene un efecto directo en la calidad de las roscas y en la vida de los machos, porque con éstos se evita que los errores de sincronización repercutan en la transmisión de los esfuerzos al macho de roscar.

Otra de las ventajas de estos dos últimos sistemas es que son elementos intermedios que protegen al husillo en el caso de que se produzcan sobreesfuerzos. Sobreesfuerzos por los que en ocasiones se llega a la rotura de los machos.

En el caso del roscado, interesa que el conjunto del acoplamiento y el porta-herramientas admita cierta compensación axial y/o radial debido a las diferencias entre la posición del

husillo y la teórica de la herramienta. Se habla de sincronización porque el movimiento del husillo en giro y avance, guiado por el control numérico debe de estar sincronizado con el paso del macho de roscar.

3.3.6 Montaje de la herramienta en el acoplamiento

El montaje de la herramienta en el porta-herramienta es función del tipo de operación que se vaya a realizar. En este caso para el roscado rígido, o para el roscado con un acoplamiento de compensación axial o para el taladrado los montajes de la herramienta pueden ser diferentes.

Además de la rigidez de los elementos estructurales mencionados anteriormente, son relevantes los elementos de unión, ya que los elementos estructurales se sujetan con cierta flexibilidad y holguras. Y también interviene la rigidez del macho, sujeto al portamachos ya que es un elemento esbelto que trabaja en voladizo. El macho puede ser el elemento menos rígido de todo el conjunto

3.3.7 Medición de la rigidez

Se realiza a través de la medición de los esfuerzos por unidad de desplazamiento, ($\text{Rigidez} = \text{Fuerza} / \text{Desplazamiento}$). Intervienen la rigidez de la fresadora, la de los elementos intermedios como el cabezal, con el cono, el portaherramientas, y la herramienta, la de las uniones entre todos estos elementos y también la rigidez del material en el que entra el macho de roscar. Se realizan ensayos de roscado en condiciones iguales en las que sólo se cambia el material a roscar.

Se mide la rigidez en las tres direcciones cartesianas (según la relación fuerza / desplazamiento).

- *en X e Y*: En el caso de roscado con macho, los esfuerzos de corte, en el plano XY no son especialmente exigentes para el conjunto de la fresadora. Son más significativos los axiales en Z que se analizan a continuación.
- *en Z*: En el roscado, el esfuerzo más significativo es el axial, por lo que se realizan las mediciones más exhaustivas en el eje Z, a tracción, a compresión, roscando en rígido en unos casos y con el dispositivo de compensación axial.

También se distingue entre los valores en condiciones de máquina de roscado rígido y las correspondientes a roscado con dispositivo de compensación axial:

En este trabajo se utiliza la medición de los esfuerzos para evaluar calidad de la sincronización. La sincronización entre la relación de giro y avance del cabezal con el

paso de la herramienta. Las discrepancias entre el avance del cabezal y el del macho darán lugar a esfuerzos axiales que soportan los dientes de la herramienta y producirán el desgaste prematuro y una menor vida del macho de roscar.

3.3.8 El Control Numérico

En el roscado, el Control Numérico Computerizado (CNC) ordena el avance, el desplazamiento del eje Z, en función del giro del cabezal, los controla. En principio, si el cabezal dispone de un motor-regulador y de un encóder puede trabajar en lazo cerrado, pero a pesar de ello se producen desajustes en la sincronización entre el giro y el avance del cabezal de la máquina y la geometría de los machos, y se emplean elementos intermedios de compensación axial y programas del Control Numérico específicos.

El CNC sincroniza el avance del eje Z con el giro del cabezal. La rotación del cabezal es el guía y el movimiento en Z está subordinado al giro. Pero a elevadas velocidades y aceleraciones, los posicionamientos que deben de estar totalmente correlacionados, es más difícil que estén perfectamente sincronizados, porque suelen producirse retrasos entre las señales y los accionamientos. Con el fin de reducir estos desajustes, las fresadoras modernas utilizan la instrucción G63 del CNC para el roscado rígido, es una instrucción en lazo cerrado, en la que se comprueban los posicionamientos y así se minimizan los errores de sincronización.

Para sincronizar el avance con el giro, algunos CNC ordenan antes de comenzar a roscar, al ir a embocar el agujero, que el cabezal se pare y se posicione, luego gire y rosque. También que al llegar al final del agujero, se pare (Dwell) y después comience la inversión del movimiento y la salida del macho. En la Figura 3.28 se ve el esquema de funcionamiento de un sistema de control en lazo cerrado del giro y del desplazamiento en Z del cabezal:

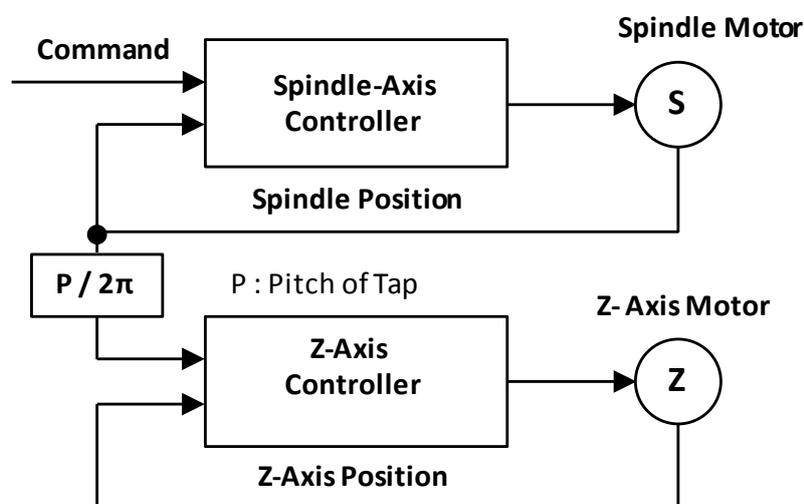


Figura 3.28: Control de Sincronización para roscado rígido en lazo cerrado

Los dispositivos de compensación axial admiten pequeñas holguras y errores, y funcionan con la función G84 de roscado, en la que los movimientos se programan en lazo abierto.

3.3.9 La influencia de la cinemática en el roscado

En otros procesos de mecanizado la rapidez con la que se alcanzan las velocidades de trabajo de las herramientas puede ser importante. En general, se aprecia favorablemente que los movimientos sean rápidos, esto es que las aceleraciones sean elevadas, pero en el caso del roscado en que se coordinan los movimientos de giro y de avance del cabezal y que deben ajustarse al paso nominal de los machos, la precisión en la sincronización de las posiciones, velocidades y aceleraciones tienen especial relevancia.

3.3.10 Otras características que afectan a la calidad del roscado

Además de las imprecisiones debidas a los factores anteriores, otros errores de ejecución de la rosca pueden venir de:

De un posicionamiento angular del husillo impreciso. Se suele definir con 256 impulsos por vuelta ($360^\circ / 256 \text{ impulsos} = 1,4^\circ / \text{ pulso}$)

La velocidad de captación, procesamiento y ejecución de las señales ha de ser especialmente rápida.

El roscado produce esfuerzos axiales dependiendo de la geometría de los dientes del macho. Puede haber pequeños errores en el propio macho, porque también se fabrican con tolerancias. Los machos se fabrican según la norma DIN EN 22857, cuya tolerancia de paso permitida es de $\pm 6,4 \mu\text{m}$.

La diferencia de temperatura del macho y de la medición. 20° de diferencia suponen unas $3 \mu\text{m}$ en 10 mm de medición.

El backlash (holgura por desajustes y desgaste) en el caso de que el movimiento sea por tornillo- sin fin como ocurre en el movimiento de los carros puede ser otra fuente de errores. Un ajuste excesivo provoca un elevado desgaste, y por el contrario ciertas holguras son beneficiosas para facilitar el desplazamiento. Si la medición se realiza de forma indirecta este backlash (holgura entre partes móviles) puede ser relevante. Un caso habitual, fuente de backlash es el esquema mostrado en la Figura 3.29 en el que entre el accionamiento y la mesa móvil hay elementos intermedios susceptibles de tener holgura:

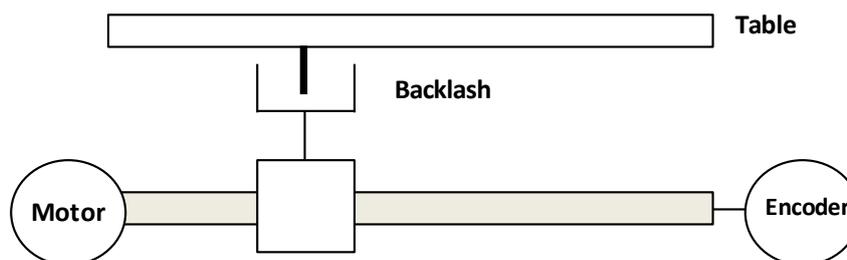


Figura 3.29: Backlash y sistema de medición indirecto

3.3.11 El taladrado previo

La rosca se realiza sobre un agujero previamente taladrado. Se cambia de herramienta con el conjunto del acoplamiento, y se rosca, por lo que la operación previa de taladrado es crítica porque sobre ella se realiza la rosca. Los errores entre el agujero taladrado y el de roscado suelen venir de:

La desalineación del eje del agujero taladrado con el eje de la herramienta. La desalineación del sistema con herramienta si se utilizan pinzas de alta calidad pueden llegar a ser del orden de $\leq 8 \mu\text{m}$. En la Figura 3.30 se representa el desalineamiento entre ejes:

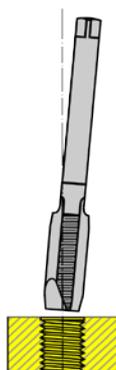


Figura 3.30: Desalineamiento entre los ejes del macho y del agujero

Las pinzas hidráulicas, como la empleada, suelen dar errores inferiores a $3 \mu\text{m}$, (mientras que las cónicas los pueden dar del orden de $3 - 5 \mu\text{m}$)

El runout (la diferencia entre los diámetros exterior e interior inscrito) en máquinas convencionales suele ser del orden de $10 \mu\text{m}$. Se muestra un ejemplo genérico en la Figura 3.31:

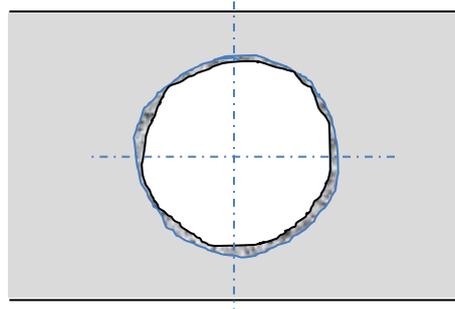


Figura 3.31: Representación del runout

Su origen viene del offset (descentrado) del macho respecto del eje del cabezal. Provoca que el esfuerzo de corte de los filos de corte oscile entre un máximo y un mínimo según sea la cantidad de material que corte mayor o menor.

Las exigencias de posicionamiento y de cilindricidad. En el caso de roscado con macho en las fresadoras modernas son poco destacables (en cambio, en el caso de roscado por laminación los errores admisibles están más ajustados y no pueden ser superiores a 0,05mm).

El uso de brocas desgastadas en el taladrado previo puede ser importante porque unos filos desgastados pueden producir el endurecimiento superficial de la zona periférica del agujero taladrado. Con filos desgastados aumenta la presión para producir el corte, pudiendo provocar un endurecimiento adicional de hasta el 50%, en 0,05 mm de espesor. En la Figura 3.32 se muestra la zona cilíndrica endurecida debida al desgaste de las brocas:

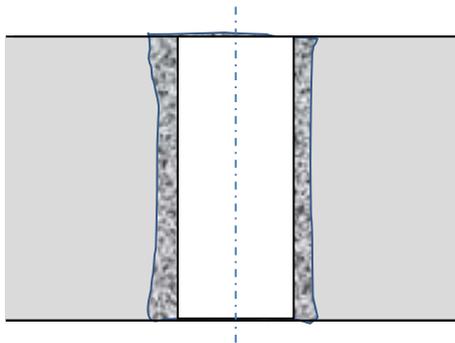


Figura 3.32: Área de endurecimiento del material próxima al agujero taladrado

También hay que tener en cuenta que el desgaste de la herramienta afecta al aumento de las fuerzas de corte y provoca el aumento de los errores.

3.3.12 Tolerancias del roscado

Se recogen a continuación, en la Figura 3.30 las tolerancias tipo que intervienen en la producción de las roscas internas de M8 H6 y paso nominal de 1,25 mm, medidas en los diámetros de los flancos de la rosca, del diámetro del macho, y de los calibres pasa no-pasa según las normas DIN correspondientes a cada uno:

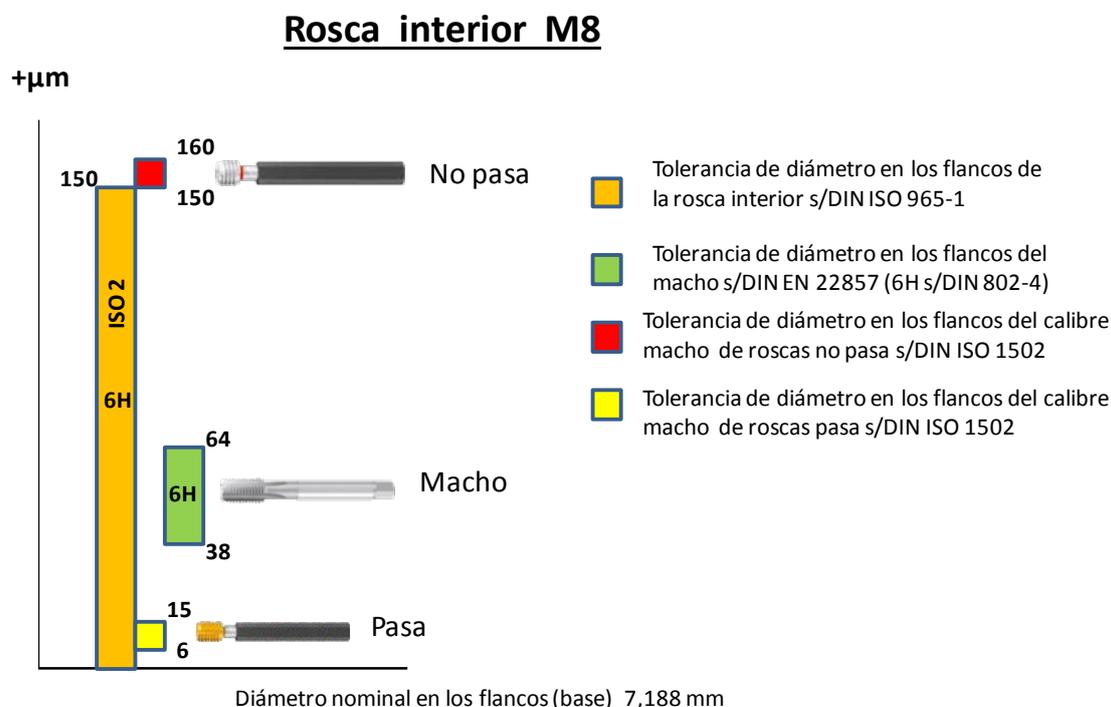


Figura 3.33: Tolerancias del agujero roscado, del macho y de los pasa no-pasa para M8 H6

3.3.13 Secuencia de operación en el proceso de rosado con macho de corte

Aunque en este caso se haya estudiado el roscado en una fresadora, conviene tener en cuenta que en la mayoría de los casos el roscado se realiza de manera cuasi-manual en taladros o roscadoras verticales. En éstos, el operario aplica el esfuerzo axial de avance y la máquina roscadora produce el esfuerzo de par, el giro del macho, los dos esfuerzos que deben de sincronizarse para roscar. A continuación, se muestra de forma esquemática cómo se realiza el roscado manual, frente al automático en las fresadoras. En principio, el operado manualmente se adapta mejor a las dificultades de cada paso del proceso y el automático funciona con un esquema rígido constante en todos los pasos.

La secuencia de operación suele ser la que sigue:

1.- Se posiciona el macho frente al agujero o a una cierta distancia:

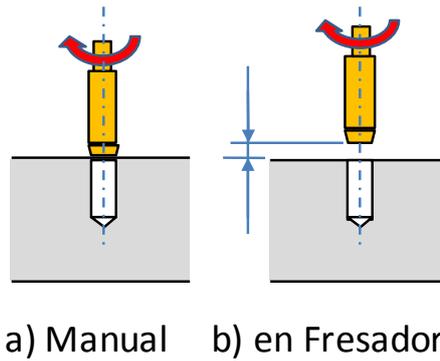


Figura 3.34: Posicionamiento del macho frente al agujero a) embocado, b) a cierta distancia de seguridad

2.- En el roscado manual se embocan los dientes de chaflán en el agujero taladrado. Se realiza una fuerza axial de empuje del macho hacia el agujero y se transmite el par, el macho gira de modo que los primeros dientes, los de chaflán emboquen correctamente, y se sincronicen el giro y el avance con el paso del macho. Lo más importante es roscar con el paso adecuado, por lo que la fuerza de compresión ha de ser alta y el par y la velocidad de giro pueden ser inicialmente bajas. En la fresadora el par y la fuerza de empuje están relacionadas según una constante.

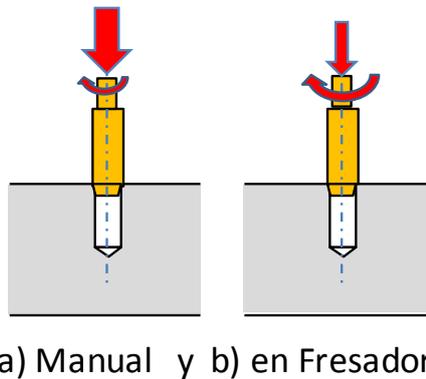
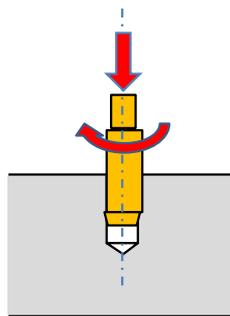


Figura 3.35: Al comienzo del roscado el emboque de los primeros dientes de chaflán

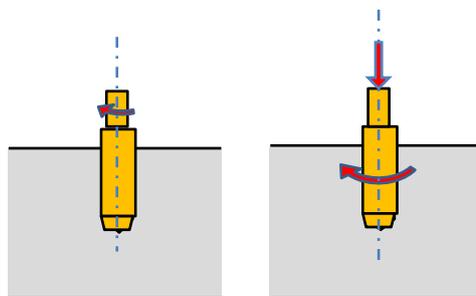
3.- Manualmente, una vez que un número suficiente de dientes ha embocado en el agujero se puede alcanzar la velocidad de giro nominal, se reduce la fuerza de empuje y aumentan el par y la velocidad de giro. En ocasiones, para facilitar la salida de la viruta de los canales de evacuación se rosca e invierte el avance, se rosca de forma discontinua avanzando y retrayendo, con lo que se reduce la posibilidad de colmatación de la viruta. Se alcanza una relación constante entre el par y la fuerza de empuje, y se rosca en condiciones estables, como ocurre en el roscado con la fresadora.



a) Manual y b) en Fresadora

Figura 3.36: Durante la carrera de roscado a lo largo del agujero

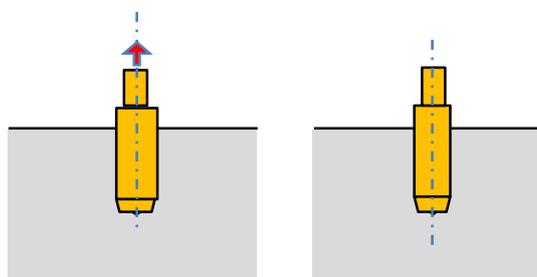
4.- Al ir llegando al final del agujero ciego, en el roscado manual se reducen la velocidad de giro y el par, y la fuerza de empuje suele desaparecer. En la fresadora se reducen el par de giro y el empuje de avance antes de llegar al final del agujero taladrado.



a) Manual y b) en Fresadora

Figura 3.37: Al ir llegando al final del agujero

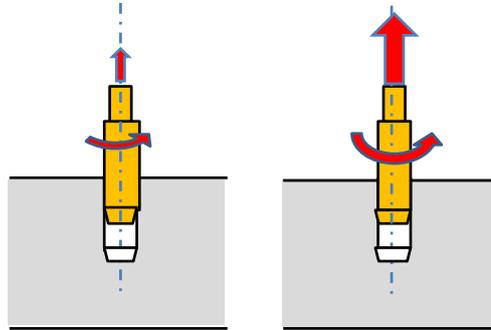
5.- Al llegar al final del agujero, se para el giro antes de invertir el sentido de giro. En el manual se aplica un esfuerzo axial reducido a tracción para sacar el macho. En la fresadora al pararse el giro no se produce ningún esfuerzo axial.



a) Manual y b) en Fresadora

Figura 3.38: En el punto inferior de final de la carrera

6.- Durante la salida del macho por la rosca tallada, manualmente se requiere poco par de giro y un esfuerzo reducido de tracción, para no dañar los dientes ya tallados. En la fresadora, el par de giro en sentido inverso y la fuerza de tracción son similares a los de la carrera de avance.



a) Manual y b) en Fresadora

Figura 3.39: La salida del macho por el agujero tallado, a) manualmente con un esfuerzo reducido, y b) con valores similares a los de entrada

3.4 EL MATERIAL: FUNDICIONES ADI-900

Además de las propiedades mecánicas más conocidas de los materiales empleados al roscar, como la resistencia, la ductilidad, el tipo de viruta, etc. ha habido que realizar pruebas y ensayos a las fundiciones ADI para entender y justificar las dificultades que han ofrecido. En la Figura 3.40 se muestran algunos de los ensayos y mediciones realizadas al material:

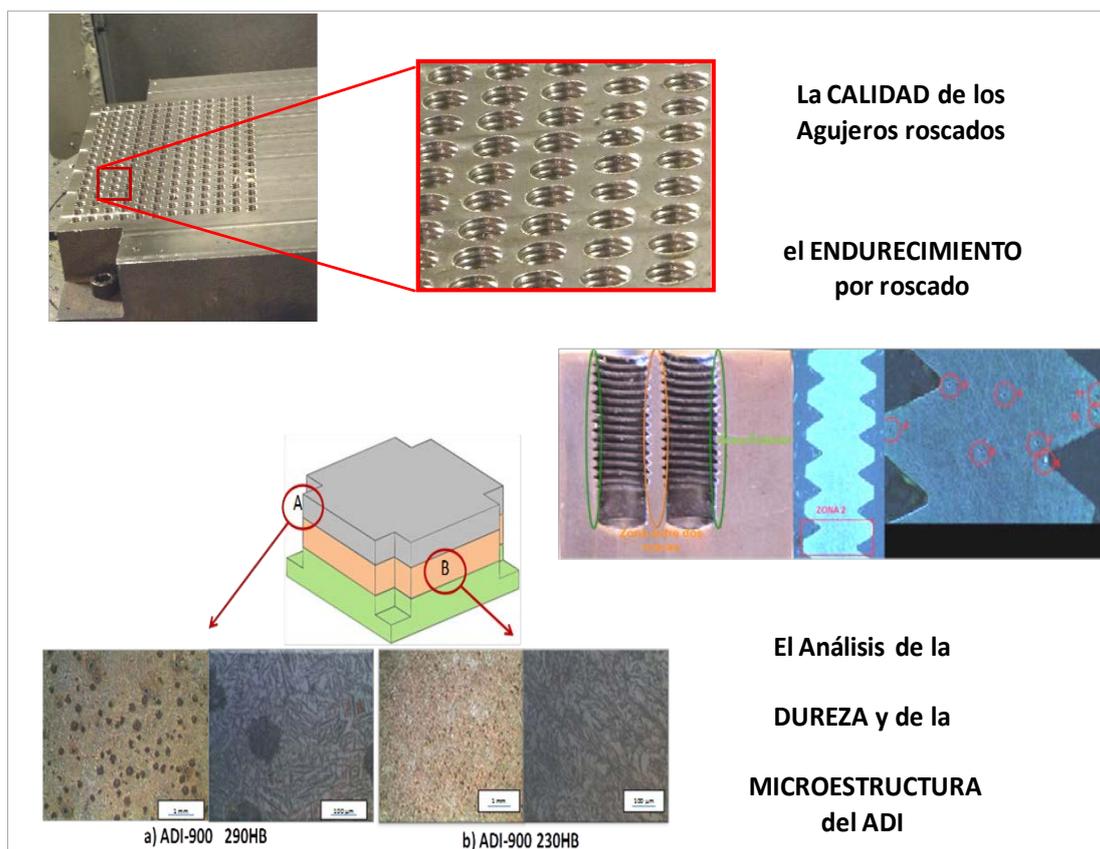


Figura 3.40: Ensayos y mediciones realizados en el material ADI

En este caso, se ha roscado ADI-900, ADI-1000 y acero F-1252 sin templear (42CrMo4) y ADI-1000. Además de sus características mecánicas se han tenido en cuenta el tipo de viruta que producen para adecuar la geometría de los machos.

La mayor parte de los ensayos se ha realizado sobre ADI-900, en que las variables más destacadas en su maquinabilidad además de la resistencia y la ductilidad ha sido la falta de homogeneidad tal como se han desarrollado en los puntos del Estado del arte, sobre las fundiciones ADI y sobre su maquinabilidad.

CAPÍTULO 4

4. ENSAYOS Y MEDIOS EMPLEADOS

4.1 INTRODUCCIÓN

Se pretenden obtener los machos más adecuados en geometría, recubrimientos y preparaciones superficiales para roscar piezas de ADI-900 a emplear en automoción. Las condiciones de trabajo de los machos deben de ser industriales, en cuanto a máquina, parámetros de corte, refrigeración, etc.

El modo de comparación de los machos, para evaluar el mejor recubrimiento, o para confirmar la idoneidad de introducir algunas modificaciones geométricas ha sido por medio de la medición del desgaste de los dientes de los machos, después de haber producido un determinado número de roscas. En el caso de los machos de roscar, como tienen una geometría compleja, la medición del desgaste no está estandarizada como ocurre con otras herramientas de corte en que la geometría del filo de corte es sencilla. La geometría de los machos es una sucesión de dientes cuyo diámetro va aumentando a lo largo de la hélice, desde el diámetro del agujero taladrado, hasta el perfil de la rosca nominal. El corte lo realizan los dientes de la zona del chaflán que tienen forma troncocónica, por lo que el desgaste se produce en los filos de varios dientes de tamaños diferentes.

Dada la dificultad de medición del desgaste de los dientes, se ha realizado de cuatro formas, que han sido las siguientes: a) midiendo el desgaste VB en la cara de incidencia del último diente de chaflán, el diente que alcanza el diámetro nominal, para lo que se ha utilizado el microscopio óptico Mitutoyo®, b) se han tomado imágenes fotográficas de los dientes que alcanzan el diámetro nominal que son los que más trabajan, tomadas del microscopio y comparadas. c) Se ha tomado la señal del par de roscado, que es una forma indirecta de medir el desgaste, con el sistema Artis®, y d) por último, para analizar más en profundidad, en algunos casos, se han tomado imágenes al microscopio electrónico de barrido (SEM) y se ha empleado el análisis espectral EDX para el análisis de materiales.

La medida de las roscas elegida ha sido M8x20 mm de profundidad (2,5 veces el diámetro), y los agujeros han sido ciegos. El hecho de que sean ciegos es una dificultad añadida porque la viruta sólo puede salir en sentido contrario al del avance del macho mientras avanza por el agujero ciego. La velocidad de roscado establecida de 30 m/min, está considerada bastante elevada dentro del ámbito industrial. La refrigeración es con emulsión de aceite en agua al 7%, la habitual del taller mecánico. La máquina en la que se producen las roscas es una fresadora vertical.

El criterio de aceptación de resultados ha consistido en ensayar dos machos de cada tipo, y si los valores entre sí diferían menos del 10% dar por válido el resultado. Si la diferencia entre los dos fuera mayor, se ensayaría una tercera unidad y tomado como buenos los dos resultados que difirieran menos del 10%.

4.2 MATERIAL ADI-900

Los ensayos de roscado se han realizado sobre fundiciones ADI, de las que se han empleado tres tipos, ADI-800, ADI-900 y ADI-1000. También se han realizado algunos ensayos sobre acero F-1252 sin tratamiento de temple (42CrMoV) para medir la rigidez y estudiar la sincronización del proceso de roscado. El material más empleado entre todas las pruebas ha sido el ADI-900.

El material ADI ha sido suministrado en bloques prismáticos de base cuadrada de 260 x 260 x 110 mm, mostrados en la Figura 4.1.

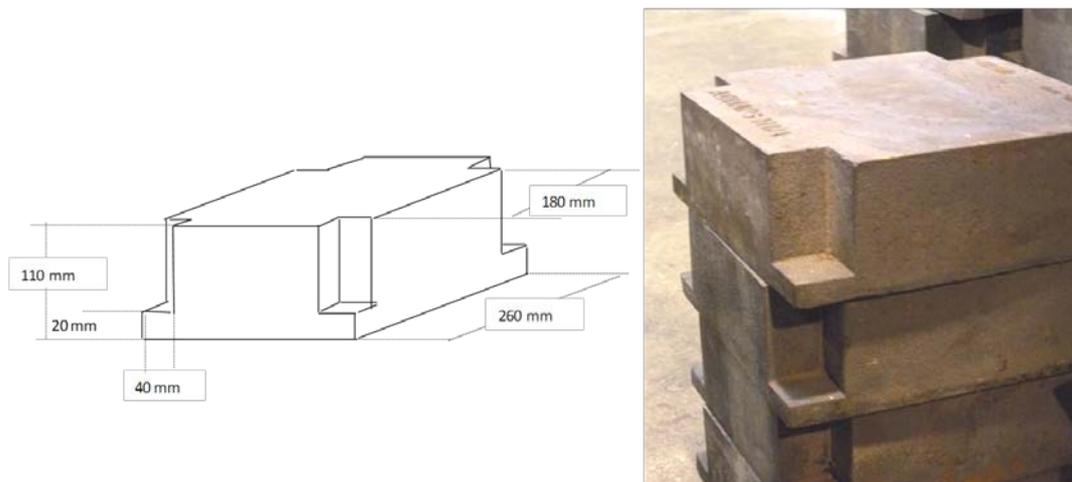


Figura 4.1: Dimensiones y bloques de ADI-900 empleados

Del ADI-900 se han fundido siete bloques de la misma colada, por tanto, tienen la misma composición, y se les ha aplicado el mismo tratamiento térmico de austemperizado. Su composición química es en % de peso: C 3,56, Si 2,18, Mn 0,22, P 0,021, S 0,007, Mg 0,063, Cu 0,76, Ni 1,9, Mo 0,24.

A cada bloque se le han realizado agujeros roscados a tres alturas diferentes, aproximadamente a cada 30 mm de altura.

4.3 MACHOS PARA ROSCAR ADI-900

Se ensayan los machos en sustrato y geometría adecuados para roscar agujeros ciegos de M8x20 mm en ADI-900, entre las posibilidades expuestas en el capítulo 3.

4.3.1 Sustrato del macho

En este caso se elige un macho de sustrato de acero rápido (*HSS-PM*) porque la prioridad es la fiabilidad de los machos. Los de metal duro son más duros y de mayor rendimiento,

pero menos tenaces y tienen mayor riesgo de fracturarse al roscar. Como base de los machos se ha utilizado acero rápido con sustrato de polvo metalúrgico (Powder Metallurgical) cuya composición en % en peso es: 1,6 C, 4,75 Cr, 2,30 Mo, 5,10 V, 10 W, 7,9 Co, que combina una alta resistencia, resistencia al desgaste adhesivo, tenacidad y estabilidad a alta temperatura, y una dureza de 300 HB.

4.3.2 Geometría de los machos de roscar

Los machos de corte son de M8x20 mm de paso de 1,25 mm, estándar, con la siguiente descripción geométrica:

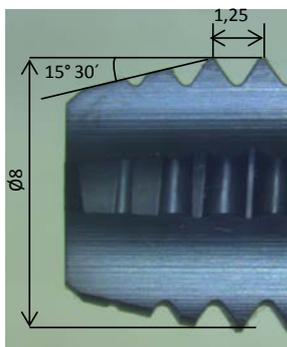


Figura 4.2: Macho de M8 empleado. Detalle de la punta: dientes y ángulo de chaflán y paso de la rosca

En la Figura 4.2 se recoge el tipo de macho, de canales rectos, refrigeración interna y el detalle de la punta de chaflán. La punta de chaflán es de 3 dientes para alcanzar el diámetro nominal, y el ángulo de chaflán de 15° 30'. La longitud de chaflán viene definida por la diferencia entre la longitud del agujero taladrado 25 mm y la longitud de roscado 20mm (algo mayor de 3 x 1.25 mm).

Los machos empleados son de 4 ranuras o 4 dientes por vuelta. De canales rectos, de 0° de ángulo de hélice. En el caso del ADI, cuya viruta es especialmente fragmentada y no se colmata al salir, no se requiere que los canales tengan hélice para evacuar la viruta con facilidad. Por otro lado, los dientes de canales rectos son más robustos y adecuados para trabajar con materiales duros como el ADI.



Figura 4.3: Macho de 4 dientes, de canales rectos, ángulo de desprendimiento de 0° y agujero axial para lubricación

Se muestra en la Figura 4.3 la vista frontal del macho con los canales y los ángulos de los dientes. El ángulo de desprendimiento es de 0° , adecuado para conseguir un flanco de diente robusto. El ángulo de desprendimiento para trabajar con materiales duros suele ser cero para obtener unos primeros dientes robustos.

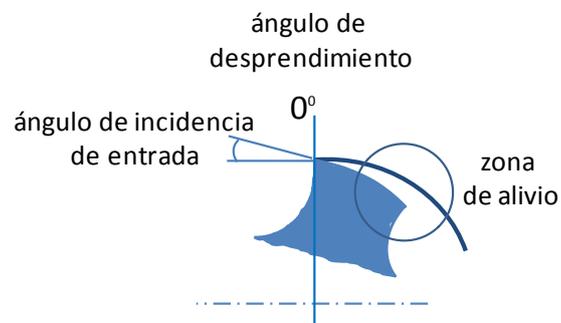


Figura 4.4: Detalle de los ángulos de incidencia, de desprendimiento y de la zona de alivio

El ángulo de alivio entre la cara de incidencia y la pared del agujero, tiene la función de guiar al macho axialmente en el giro, para que el corte radial sea preciso, pero sin que se produzca una elevada fricción. Un menor ángulo de alivio proporciona un diente más robusto como se requiere al roscar materiales duros.

4.3.3 Refrigeración y lubricación

El tipo de refrigeración empleado ha sido con fluido de corte porque se trata de roscar ADI, material que como ya se ha mencionado es de baja conductividad térmica.

Adicionalmente, la refrigeración en cantidades mínimas no es aconsejable para agujeros de más de $1,5x\varnothing$. Para longitudes de roscado mayores como la estudiada, de $2,5x\varnothing$, se aconseja la refrigeración con fluido refrigerante.

En general, la función del refrigerante en el caso de roscado con macho, además de la evacuación del calor y de la viruta, es reducir el coeficiente de rozamiento, que en el caso de roscar en seco sería muy elevado. Respecto al tipo de refrigerante, en trabajos anteriores no se han mencionado diferencias de rendimiento entre distintos fluidos refrigerantes al roscar ADI.

En el caso de roscar agujeros ciegos en materiales de viruta corta, además de la refrigeración externa es aconsejable el empleo de refrigeración interna axial aplicada a través de un agujero central en el eje del macho, porque además de reducir el rozamiento mejora la refrigeración y facilita la evacuación de la viruta corta. En la siguiente Figura 4.5 se muestra el tipo de viruta del ADI-900, corta y fragmentada:



Figura 4.5: Viruta de ADI, muy corta y fragmentada

4.3.4 El recubrimiento del macho de corte para roscar ADI-900

La aplicación de los recubrimientos la hace Metal Estalki (Derio, España) y es del tipo PVD (Physical Vapor Deposition) por aplicación de la técnica de deposición de arco catódico de Platit®. Se realiza en la misma máquina compacta Platit π -80®, basada en dos cátodos de arco laterales rotativos.

El proceso de preparación de los machos consiste en el lavado y desengrasado que se realiza en la instalación de recubrimiento antes de aplicarlo, consiste en la limpieza con plasma iónico de los machos realizado en atmósfera de gas argón.

Los ensayos del recubrimiento de los machos se realizan en dos etapas. En la primera se busca el tipo de recubrimiento más adecuado para roscar ADI-900, para lo que se ensayan cuatro tipos de PVD, comerciales. Y en una segunda fase se prueban el que mejor rendimiento ha obtenido en la primera, y otros dos recubrimientos adicionales no habituales, y se introducen preparaciones superficiales a todos ellos.

En la primera etapa de ensayos se comparan los machos recubiertos sin la aplicación de ningún tratamiento previo y posterior de las superficies, con el tratamiento que realiza habitualmente el recubridor.

Los recubrimientos PVD empleados son el conocido AlTiN, el AlCrSiN, el AlTiSiN-MultiLayer, y el AlTiSiN-Gradiente, éstos en la primera tanda de ensayos, y en la segunda una preparación denominada AlTiSiN-18 y el TiAlCN-CBC, que es una combinación entre el TiAlCN y una capa exterior del CBC (de elevada dureza).

4.4 MODOS Y MEDIOS PARA COMPARAR LOS MACHOS

La comparación de los machos se realiza después de haber producido un número determinado de roscas, analizando las imágenes del desgaste, midiendo el desgaste y comparando el par medio de roscado. En algunos casos también se toman imágenes en el microscopio electrónico de barrido (SEM).

4.4.1 Microscopio óptico Mitutoyo 176-808A®

Después de producir un número de roscas determinado, se mide el desgaste V_B en el microscopio, se toman fotos de los primeros dientes de chaflán y se analizan las imágenes. Los dientes de chaflán son los dientes que más trabajan al roscar. Se analiza el estado del primer diente que alcanza el diámetro nominal de la rosca, que es el primero que el anterior al primero que tiene forma triangular, es único en cada macho. Se mide el desgaste de la cara de incidencia a este diente. Del desgaste de las dos aristas se toma la correspondiente a la del diámetro mayor. El microscopio de 30 aumentos dispone de micrómetros digitales para medir los desplazamientos en X e Y. En la Figura 4.6 se muestran imágenes de los dientes y de los desgastes:

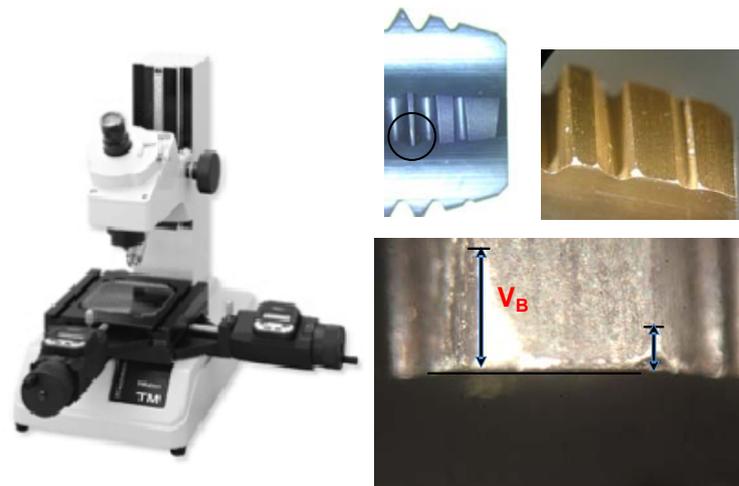


Figura 4.6: Detalle de los dientes de chaflán, del 1er diente de diámetro nominal y la medida de V_B obtenidos

4.4.2 Sistema de medición del par Artis DDU4®

Para medir el desgaste de los machos, en principio habría que parar la máquina, sacar el macho y analizarlo en el microscopio, lo cual resultaría poco operativo, por lo que se emplea otro indicador representativo y medible en tiempo real que permite conocer el estado de los machos. Dado que con el desgaste de los machos aumenta el par de roscado, porque los filos de corte, esto es los dientes se redondean, cortan peor y requieren más fuerza de corte para seguir roscando, se decide medir el par de roscado y ver su evolución con el número de roscas producidas. El valor del par de roscado es función directa de la fuerza tangencial que la herramienta hace sobre la viruta que arranca y por tanto, de la potencia que realiza la máquina y que puede ser medida y visualizada en tiempo real.

También hay que tener en cuenta que la realización de un agujero roscado se compone de varias fases, que se recogen en el esquema de la Figura 4.7. Éstas son: la entrada del macho y emboque de los primeros dientes de chaflán desde el diámetro del agujero taladrado hasta que alcanza el diámetro nominal de la rosca, después el avance del macho por el agujero hasta llegar el punto muerto inferior y la inversión del giro y la salida del macho, fases en las que según el número de dientes que intervienen influyen en los valores del par.

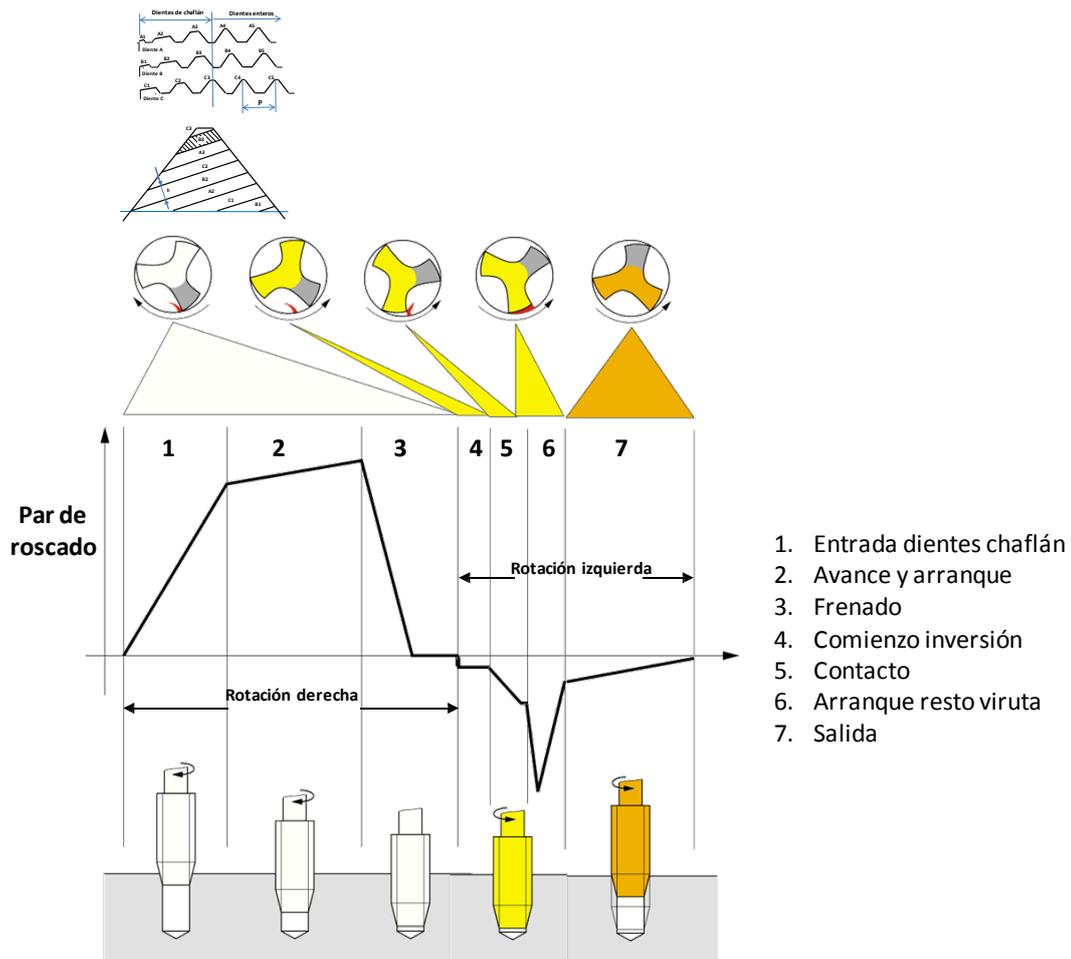


Figura 4.7: Detalle de los dientes de chaflán y los activos durante la rosca y diagrama del par de rosado, al rosar y al invertir el sentido de giro (Fuente: propia y Emuge®)

La ventaja del uso de la señal de par es que puede obtenerse y ser visualizada en tiempo real mientras se producen las roscas, y da una medida real de las dificultades que se producen en el ciclo de rosado.

Para la toma de la señal del par de torsión (también puede obtenerse la del esfuerzo de avance) se ha empleado un dispositivo con sensor Artis DDU4®. Los rangos de medición son los siguientes: la fuerza axial 2KN/5KN/10KN, y el par de torsión 20 Nm/40 Nm/80 Nm. Se basa en la posición relativa entre el rotor y el estator, distantes 1 mm, que se colocan en el portaherramientas y en un punto fijo, respectivamente. Se pueden obtener los esfuerzos en Z y de par. En este estudio, sólo se he registrado la señal de par.

En la siguiente Figura 4.8 se muestra el montaje del sistema rotor-estátor en el cabezal:

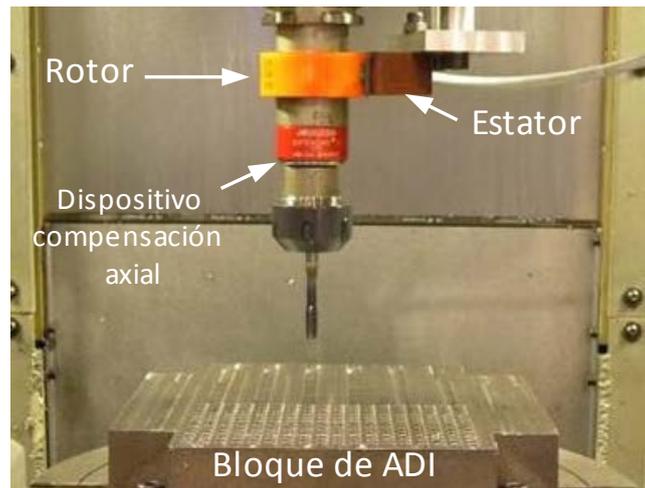


Figura 4.8: Montaje del sistema de medición rotor-estátor (Artis®)

El sistema de medición y registro consiste en el captador de la señal del Artis DDU4®, una carta de adquisición de datos que se conecta al PC en el que tiene que emplearse el programa Quick y el posterior procesamiento de la señal con los programas Matlab o Excel, tal como se recogen en la Figura 4.9:



Figura 4.9: Elementos del sistema Artis DDU4® (Fuente: Emuge®)

Además de recoger toda la gráfica de la señal del par de cada agujero roscado, para ver la evolución del desgaste se ha tomado el valor medio del par, porque se considera que es representativo de la señal de par y es un solo valor. Se ha tomado el par medio desde que la señal es superior a 0,2 Nm hasta que al llegar el macho al fondo del agujero vuelve a ser menor de 0,2 Nm, esto es los valores por encima de 0,2 Nm. Se puede considerar que el valor medio de la parte positiva del par es una medida de la energía empleada para roscar el agujero.

En el roscado de otros materiales, al comienzo de la inversión, cuando la parte trasera del diente arranca a cortadura el resto de la viruta no cortada, el valor del par, el pico de valor negativo, es muy significativo, y ese momento suele ser crítico en la vida de la

herramienta, pero no ha sido así en el caso de roscado del ADI-900 en que el pico inferior de la señal apenas aparece. Corresponde al pico inferior de la zona 6 de la Figura 4.7, y el que se produce después del segundo 4 en la Figura 4.10:

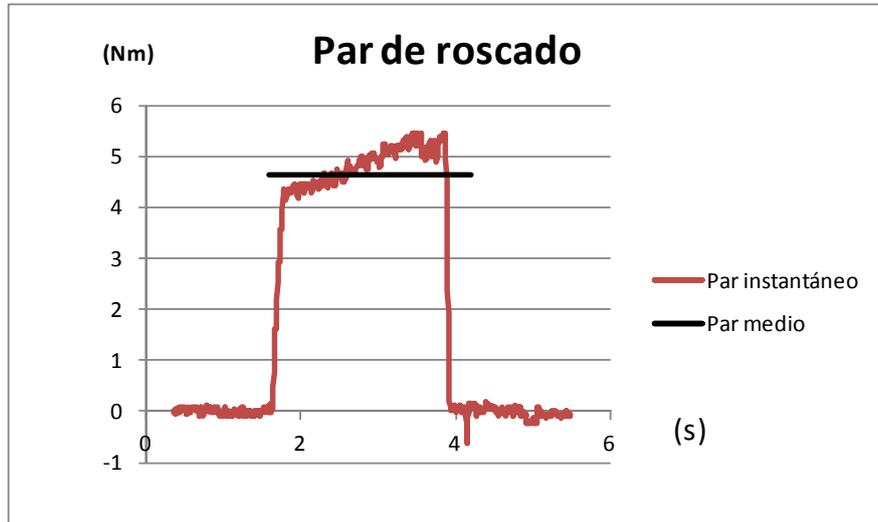


Figura 4.10: Señal de par en el roscado y en la salida del macho y el par medio

4.4.3 Microscopio Electrónico de Barrido (SEM) Hitachi S-4800®

Permite realizar el análisis en profundidad de los filos de corte de los machos según la técnica electrónica de barrido, Scanning Electron Microscope (SEM) y de espectrometría EDX. Se ha utilizado un microscopio electrónico de barrido Hitachi S-4800®.

El funcionamiento del SEM se basa en la proyección de un haz de electrones sobre la superficie a analizar, electrones que al chocar contra la muestra rebotan y son con los que se reconstruye la imagen de la superficie. La imagen obtenida es de gran resolución y puede ser analizada posteriormente.

Además de la obtención de la imagen, la instalación dispone del sistema Energy Dispersive X-ray (EDX) con el que se ha podido realizar el análisis químico de los componentes en los filos de los machos. El EDX se basa en la proyección de electrones sobre la muestra y el posterior análisis de las radiaciones X que se emiten en el salto de electrones entre capas del átomo incidido. Teniendo en cuenta que la radiación es específica de cada elemento se obtiene la composición química de la muestra. En la Figura 4.11 se muestran unas imágenes y un ejemplo de la espectrometría (EDX) obtenida:

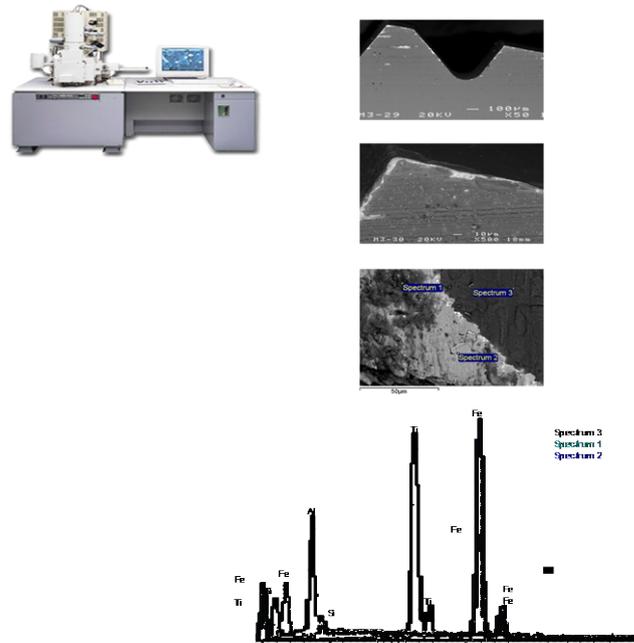


Figura 4.11: Imágenes y espectrometría obtenidas con el microscopio de barrido electrónico Hitachi S-4800®,

4.4.4 El microscopio óptico Leica Z6 APO®

Puntualmente se ha empleado para analizar en detalle del desgaste de los dientes de chaflán y el radio de redondeo de los fillos de corte de los machos, como se muestran en la Figura 4.12:

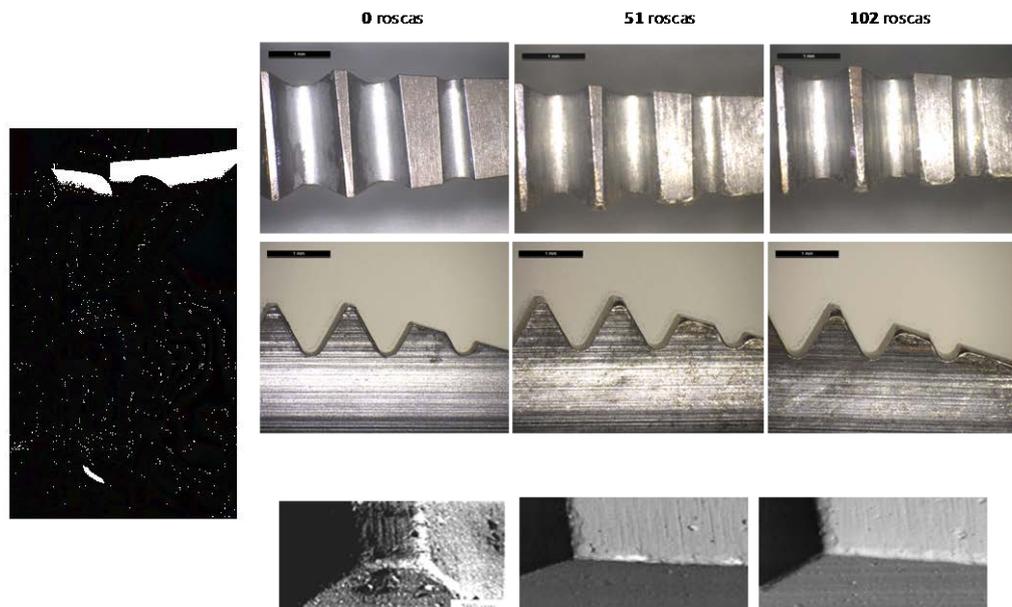


Figura 4.12: Microscopio Leica Z6 APO®, evolución del desgaste y radios de filo

Su resolución es de $\pm 0,001$ mm.

4.5 PRIMERA FASE DE ENSAYOS

Se ensayan machos de cuatro recubrimientos diferentes. Las condiciones de trabajo para los machos son exigentes (velocidad de corte) y los agujeros son ciegos. La geometría de los machos y los recubrimientos son comerciales, propuestos por UFS (los machos) y Metal Estalki Platit® los recubrimientos, respectivamente.

El taladrado y el roscado se realizan en una fresadora vertical Ibarria ZV 25/ U600®. Los agujeros taladrados previos, de $\phi 6,8$ mm y 25 mm de profundidad, se realizan en filas distantes entre sí en 10 mm. Se aplican las siguientes condiciones en el taladrado: la velocidad de corte $V_c=80$ m/min, $S=3745$ rpm, $f=0,15$ mm. Se aplica emulsión refrigerante (emulsión de aceite en agua al 7 %).

El roscado es de M8x20 mm de profundidad, a una velocidad de corte asignada $V_c=30$ m/min (1193 rpm) y un paso de 1,25 mm. Se utiliza un acoplamiento flexible de compensación axial (Softsynchro® de Emuge) entre el cabezal y el portaherramientas que minimiza los posibles errores de sincronización.

Todos los agujeros una vez roscados son verificados con un calibre pasa no-pasa M8 H6, obteniéndose roscas válidas en todos los casos.

Se ensayan dos machos por cada recubrimiento, de los recubrimientos AlTiN, AlCrSiN, AlTiSiN-Multi Layer y AlTiSiN-Gradiente sin ninguna preparación superficial específica del proveedor. Se roscan 108 agujeros con cada macho.

4.5.1 Imágenes al microscopio

Se toman imágenes al microscopio óptico de los dientes de chaflán, después de roscar 54 y 108 agujeros, de cada uno de los machos, dos por recubrimiento. Son las siguientes:

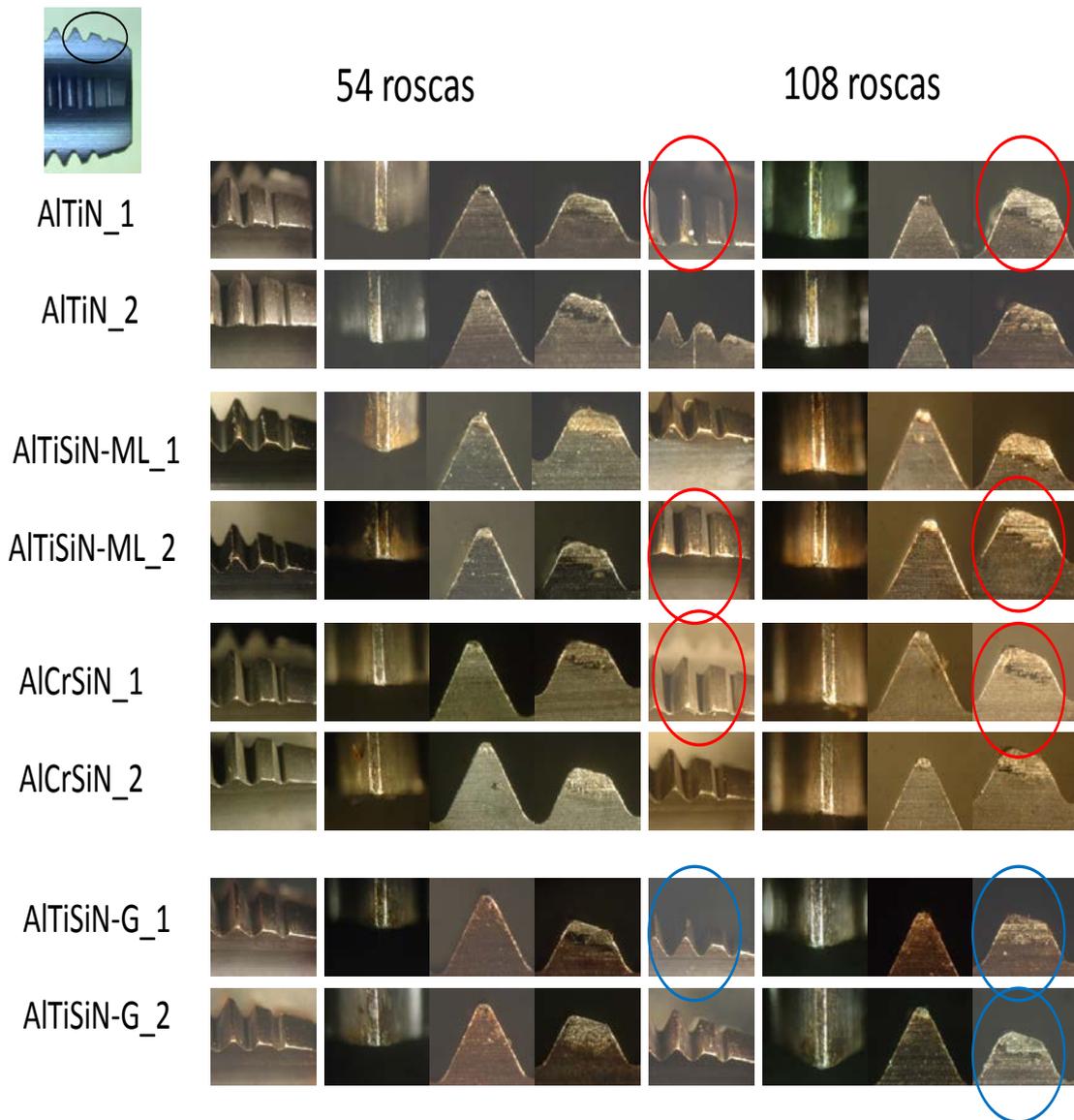


Figura 4.13: Imágenes de las caras de desprendimiento y de incidencia de los primeros dientes, por tipo de recubrimiento

En la Figura 4.13, en el mapa de imágenes se destacan con un círculo rojo los dientes que tienen un desgaste excesivo, por redondeo del filo o por la pérdida del recubrimiento y con un círculo azul los que tienen un desgaste reducido.

Las imágenes más destacadas por cada tipo de recubrimiento se recogen en la Figura 4.14, son las siguientes:

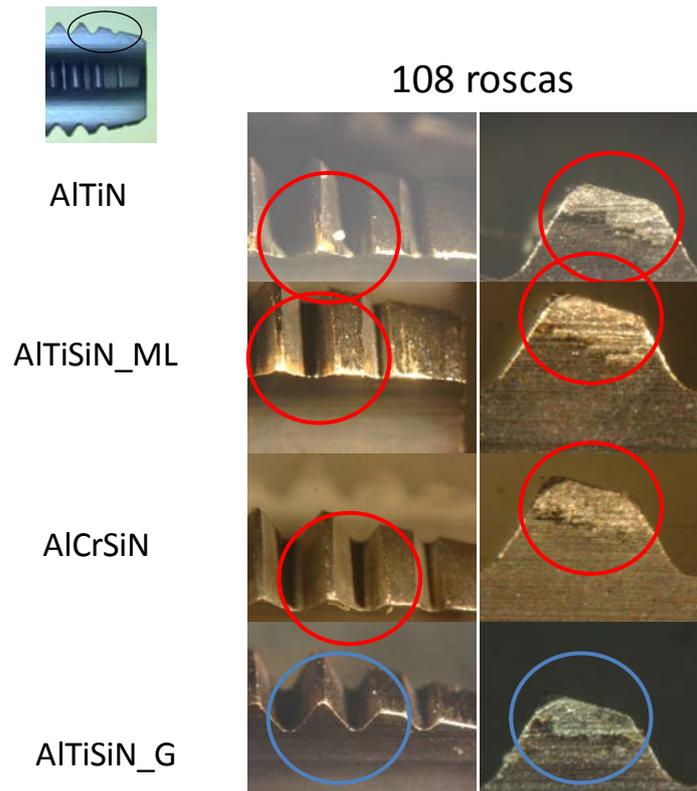


Figura 4.14: Detalle de los primeros dientes después de realizar 108 roscas

Hay que resaltar que los mayores desgastes se producen en los recubrimientos AlTiN y AlTiSiN-ML. Por el contrario, en los casos del AlCrSiN y El AlTiSiN-G los desgastes son los menores. Y de éstos, el menor desgaste lo presenta un macho de AlTiSiN-G.

4.5.2 Comparación del desgaste V_B

De la medición de los desgastes medios de los dos machos, V_B medidos en el microscopio óptico por cada recubrimiento, se obtienen los resultados que se muestran en la Figura 4.15:

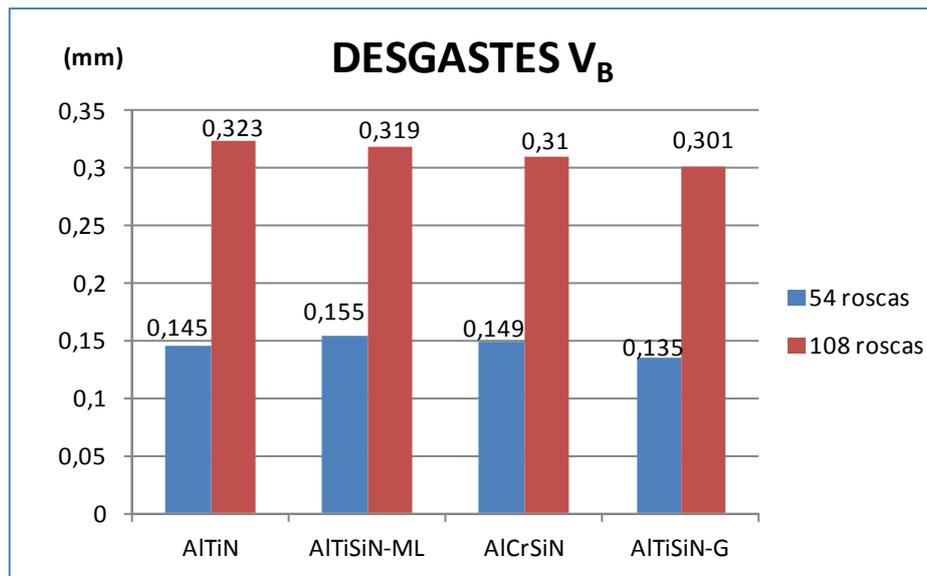


Figura 4.15: Comparación del desgaste de flanco medio por recubrimiento a las 54 y 108 roscas

Los peores resultados de desgaste corresponden al AlTiN (0,323 mm) y AlTiSiN-ML (0,319 mm) y los mejores al AlCrSiN (0,31 mm) y al AlTiSiN-G (0,301 mm).

4.5.3 Comparación del par medio

Otra forma de comparación del desgaste es el valor del par medio que se representa cada 18 roscas producidas, desde la rosca 1 hasta la 108, de la media de los dos machos por recubrimiento, se obtienen las siguientes curvas recogidas en la Figura 4.16:

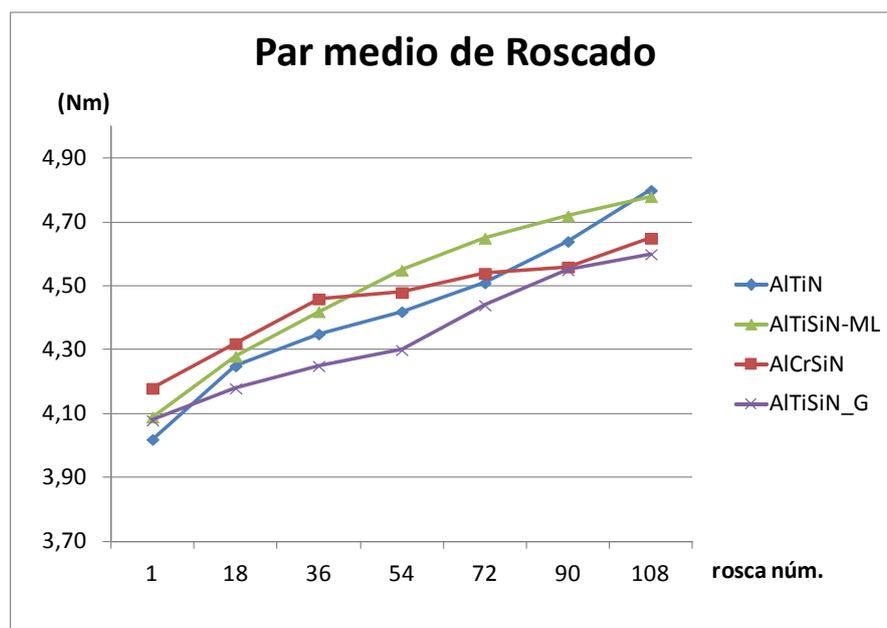


Figura 4.16: Comparación del par medio por recubrimiento hasta 108 roscas

Después de roscar 108 agujeros el recubrimiento que menor par requiere es el AlTiSiN-G, 4,6 Nm. También el AlCrSiN obtiene un valor bajo 4,65 Nm. Hay que destacar que en el caso del AlCrSiN el par medio de roscado del 1er agujero es el más elevado, 4,18 Nm, por lo que la pendiente del par medio que da la medida del deterioro del recubrimiento es menor que ningún otro recubrimiento. Los pares medios del AlTiN y del AlTiSiN-ML al final del ensayo son los más elevados, 4,8 Nm y 4,78 Nm respectivamente. A un mayor desgaste de los filos de corte de los machos corresponde unas fuerzas de corte más elevadas porque los filos cortan peor y por tanto, más esfuerzo para arrancar el material.

4.5.4 Imágenes al SEM

Después de roscar 108 agujeros. Se toman imágenes del segundo y tercer diente de dos machos recubiertos, uno de AlTiN por ser el recubrimiento más empleado de los ensayados, que en este caso da el peor resultado, y de otro macho recubierto con AlTiSiN-G, correspondiente al de mejor resultado.

En la Figura 4.17 se muestran las imágenes de la cara de incidencia del segundo diente de chaflán, de uno de los machos de AlTiN, aumentadas 50, 500 y 2000 veces. Se indican con un círculo los puntos más destacados observados:

AlTiN (108 roscas)

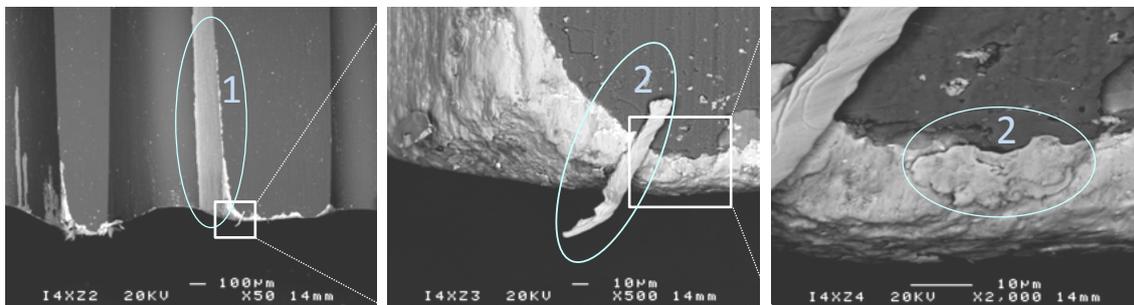


Figura 4.17: Imágenes al microscopio electrónico de la cara de incidencia del AlTiN. Aumentos: x50, x500, x2000

En la imagen de 50 aumentos se ven las pérdidas de recubrimiento laterales (1) en varios dientes. En la imagen de 500 se ve una viruta de ADI (2) y en la de 2000 el ADI adherido al diente.

En la Figura 4.18 se muestran las imágenes de la cara de desprendimiento del mismo macho de AlTiN, aumentadas 50 y 500 veces:

A continuación, en la Figura 4.19 se recogen las imágenes de un macho recubierto con AlTiSiN-G después de realizar 108 roscas.

AlTiN (108 roscas)

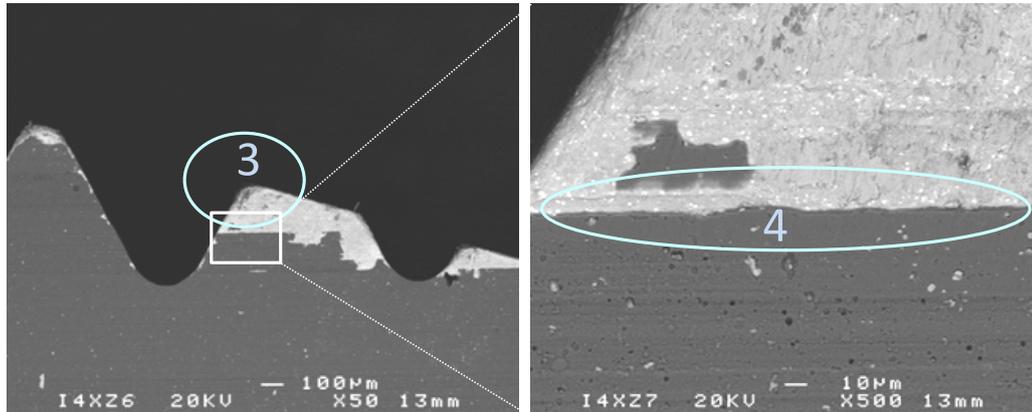


Figura 4.18: Imágenes al microscopio electrónico de la cara de desprendimiento del AlTiN.
Aumentos: x50, x500

En la imagen de 50 aumentos se ve el redondeo de la arista de corte (3) y el redondeo del diente. También en la imagen de 500 aumentos que la delaminación del recubrimiento se produce a partir de líneas horizontales (4). Estas marcas horizontales provienen del rectificado de los canales de evacuación de la viruta.

4.5.5 Análisis espectral

En la Figura 4.19 se recogen las imágenes de un macho recubierto con AlTiSiN-G después de realizar 108 roscas al que también se realiza un análisis espectral EDX en la zona indicada en las imágenes:

AlTiSiN-G (108 roscas)

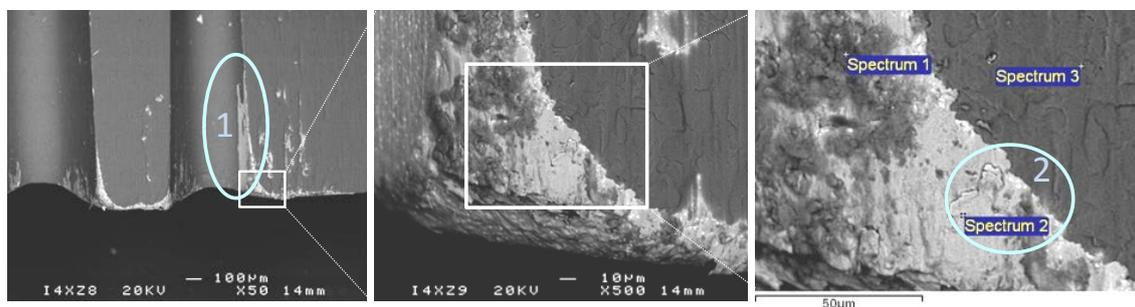


Figura 4.19: Imágenes al microscopio electrónico de la cara de incidencia del AlTiSiN-G.
Aumentos: x50, x500, x2000

En este caso se repite la pérdida de la capa de recubrimiento en el flanco lateral (1) como se ve en la imagen de 50 aumentos, pero es muy inferior a la que se produce en el caso del AlTiN en la Figura 4.17.

En la imagen de la derecha de la figura 4.19, en la se realiza el análisis espectral EDX se ve que también se produce la adhesión del ADI al diente (2).

El análisis del espectro de los puntos se recoge en la Figura 4.20:

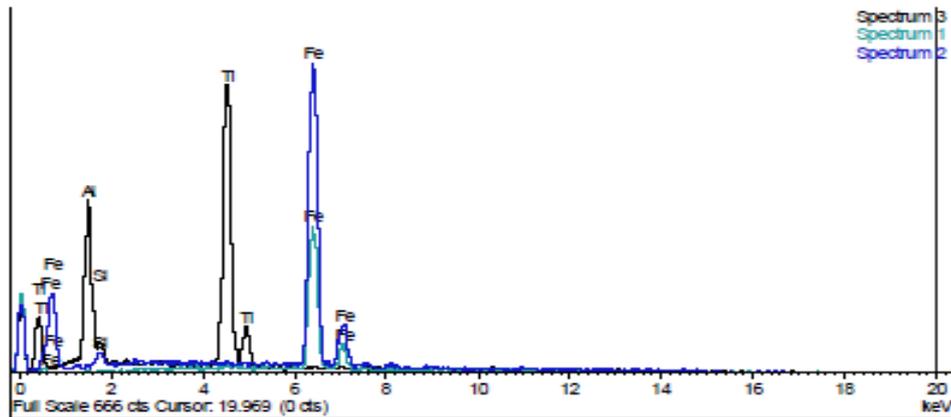


Figura 4.20: Análisis espectral EDX de la cara de incidencia

Los puntos Spectrum 1 y Spectrum 2 tienen la misma composición, el Fe proviene de la viruta de ADI adherida. El punto Spectrum 3, tiene de componentes Al, Si y Ti, del recubrimiento.

A continuación, en la Figura 4.21 se muestran las imágenes tomadas al macho de AlTiSiN-G en la cara de desprendimiento, se indican los puntos destacados a analizar:

AlTiSiN-G (108 roscas)

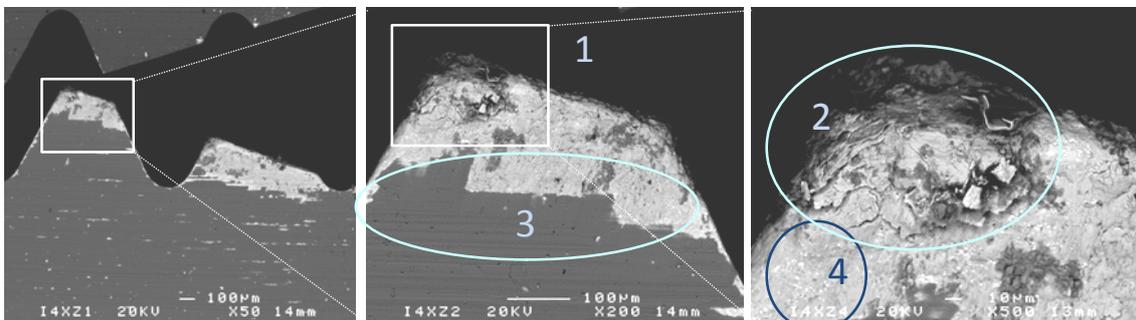


Figura 4.21: Imágenes al microscopio electrónico de la cara de desprendimiento del AlTiSiN-G. Aumentos: x50, x200, x500

En las imágenes a 50 y 200 aumentos se aprecia un menor redondeo de la arista del diente (1), y menor desgaste y redondeo que en el caso del AlTiN. En las imágenes de 200 y de 500 se ve la adhesión del ADI al filo (2). También que la delaminación del recubrimiento se produce a partir de las marcas horizontales (3). En la imagen de 500 aumentos, cerca del filo de corte donde no hay ADI adherido se aprecian puntos blancos (4) de carburo de tungsteno (WC) que provienen del sustrato del macho, de debajo del recubrimiento.

4.5.6 Conclusiones a los primeros ensayos

Como conclusiones se pueden destacar que:

- Las diferencias entre los recubrimientos son poco significativas, pero destacan con los peores resultados el AlTiN y el AlTiSiN-ML. El AlCrSiN y el AlTiSiN-G tienen los mejores comportamientos, y destaca el AlTiSiN-G porque en el conjunto de las mediciones tiene los mejores valores (en desgaste, par e imágenes).
- La explicación de que el peor comportamiento corresponda al recubrimiento AlTiN se debe a que es el que presenta las peores características mecánicas. El coeficiente de fricción es de 0,7 frente a 0,45 y 0,35 del resto de recubrimientos de estructura nanocrystalina que contienen silicio. También la temperatura máxima admisible de trabajo, en el caso del AlTiN es inferior a los otros recubrimientos y la dureza está en el rango inferior de los valores de durezas del resto.
- En el caso del AlTiSiN-ML el peor resultado se puede deber a la menor dureza 38 GPa del recubrimiento, igual que la del AlTiN, en comparación a las de 40 y 45 GPa de los recubrimientos que mejor resultado han obtenido.
- Los mejores resultados obtenidos fueron los del AlCrSiN y los de AlTiSiN-G. En el primer caso la capa de adhesión al sustrato es de nitruro de cromo y en el segundo de nitruro de titanio. El recubrimiento AlTiSiN-G es el que mejores resultados obtiene, corresponde al que tiene la dureza exterior más elevada, de 45 GPa, que es de nitruro de aluminio.
- En los dos recubrimientos analizados al SEM se aprecia la delaminación del recubrimiento en la cara de desprendimiento, a lo largo de las líneas horizontales que provienen del rectificado de los machos, que se realiza para formar los canales de evacuación de la viruta.
- El mecanismo de desgaste predominante en todos los recubrimientos parece ser el de adhesión de la viruta, recorre hasta que se desprenden la viruta y el recubrimiento, de modo que en la zona de los filos hay tres fases, el ADI adherido,

el sustrato del macho caracterizado por los puntos blancos de los carburos (WC) y el recubrimiento aplicado que aún queda en algunas zonas. Tal como se aprecia por las imágenes y por el análisis espectral del filo recubierto de ADI adherido.

- No se aprecian líneas del efecto abrasivo del paso de la viruta por la superficie de los filos.
- El valor del par medio coincide con los mejores y los peores resultados del desgaste V_B , con el análisis de imágenes al microscopio óptico y al electrónico, por tanto, a partir de este ensayo, se considera el par medio de cada rosca como un indicador válido para comparar el rendimiento de los diferentes recubrimientos.

4.6 SEGUNDA FASE DE ENSAYOS

Se lleva a cabo una segunda fase de ensayos en la que se compara el recubrimiento AlTiSiN-G, el de mejor comportamiento, con dos nuevos el TiAlCN-CBC y el AlTiSiN-18. En todos estos machos se introducen mejoras micrométricas y de preparación superficial previa y posterior a recubrir.

Las condiciones del taladrado, de roscado y de refrigeración interna y externa son las mismas en todos los casos, e iguales a las de la fase primera serie de ensayos. Se emplean brocas nuevas para taladrar antes de roscar con cada macho. Se ensayan dos machos por cada recubrimiento. Se recogen los valores del desgaste a las 54, 108, 162 y 216 roscas. La comparación se realiza con la medición del desgaste, del par medio y de las imágenes del microscopio electrónico (SEM).

4.6.1 Comparación del desgaste V_B

En la Figura 4.22 se muestra el valor los desgastes medios, de los dos machos, V_B medidos en el microscopio óptico por cada recubrimiento, que dan los siguientes resultados:

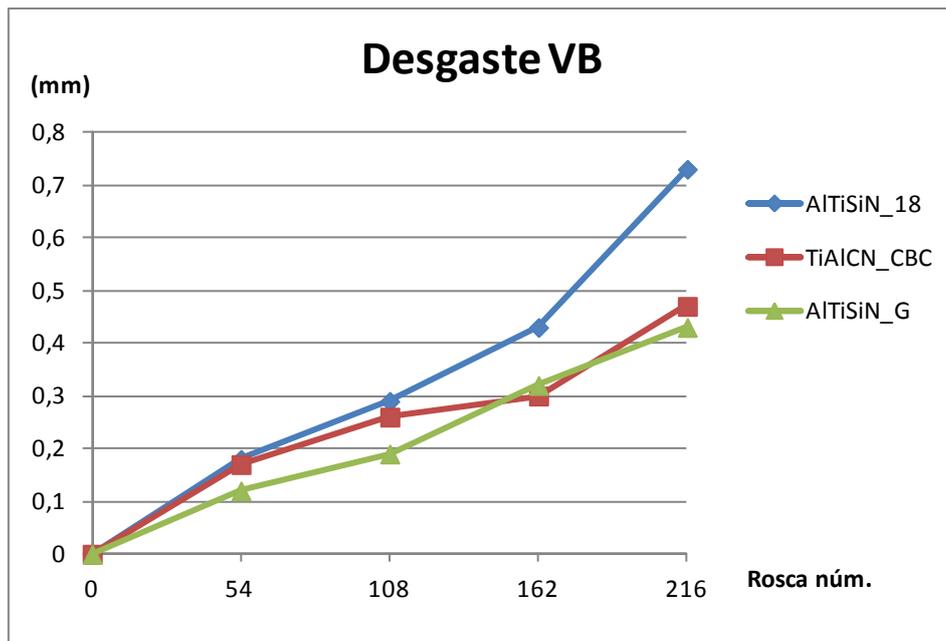


Figura 4.22: Comparación de los desgastes de flanco medios por recubrimiento hasta 216 roscas

El recubrimiento con el que se obtiene el peor resultado es el AlTiSiN-18 (0,73 mm) y los que mejor el TiAlCN-CBC (0,48 mm) y el AlTiSiN-G (0,42mm).

4.6.2 Comparación del par medio

Se recogen los resultados de la medición de los pares medios hasta 216 roscas, de la media de los dos machos por recubrimiento, en la Figura 4.23, es la siguiente:

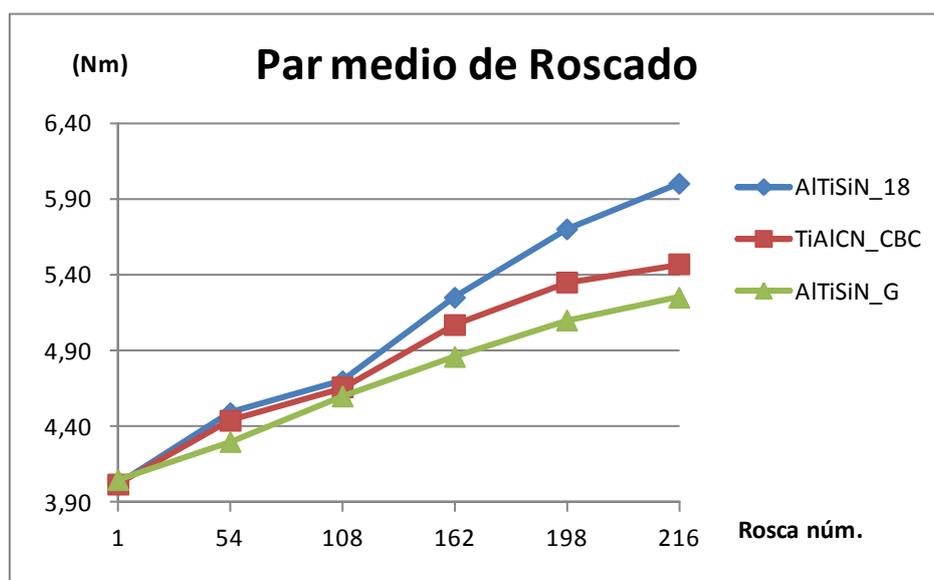


Figura 4.23: Comparación del par medio de roscado por cada recubrimiento hasta 216 roscas

También en este modo de comparación se corrobora que el par medio y por tanto el menor desgaste corresponde al recubrimiento AlTiSiN-G y que los peores valores son los del AlTiSiN-18.

4.6.3 Imágenes al SEM

Del segundo y tercer diente de chaflán de los machos de los tres recubrimientos después producir 216 roscas:

- De la cara de desprendimiento:

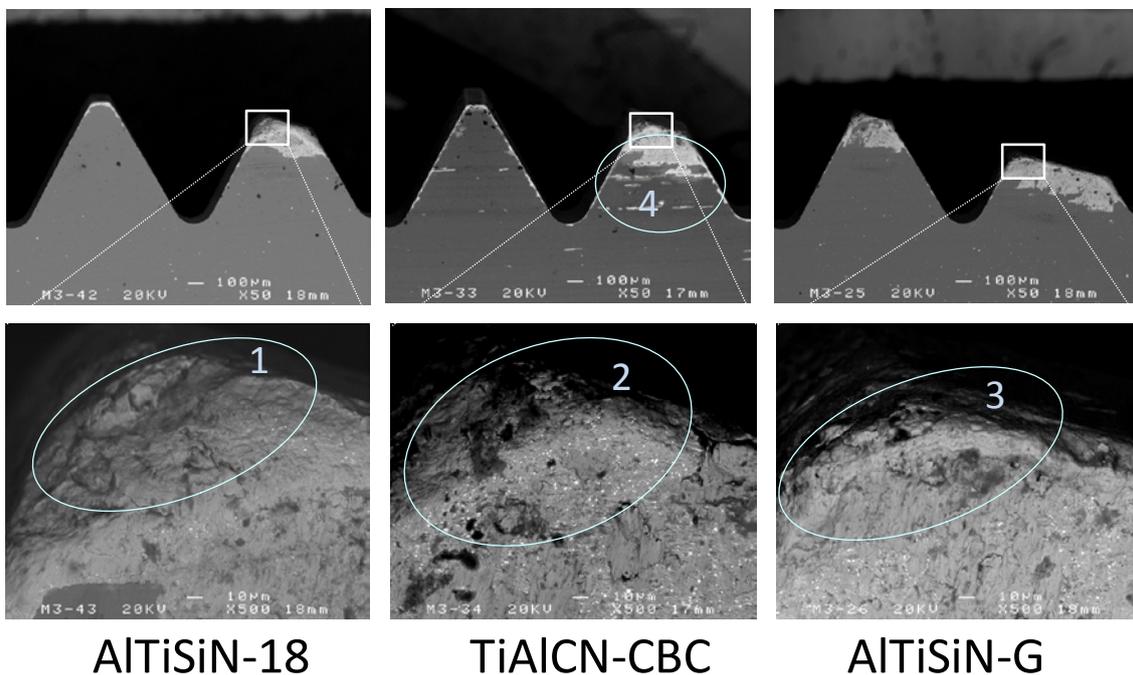


Figura 4.24: Imágenes de la cara de desprendimiento y detalle de los fillos por recubrimiento. Aumentos: $\times 50$ y $\times 500$

Comparando los fillos de corte, de la Figura 4.24, se aprecia el mayor redondeo y desgaste del filo de AlTiSiN-18 (1). Y en (3) en el que se produce el menor desgaste, en el de AlTiSiN-G. En (2) se aprecian los puntos blancos de carburo de tungsteno del sustrato, pero mayor desgaste que en (3). En el caso del AlTiSiN-G sobre el filo se ve el ADI adherido que recubre el filo y reduce su desgaste respecto a los otros dos recubrimientos. En (3) también se aprecian ciertas trazas verticales del efecto abrasivo sobre el ADI adherido. En el TiAlCN-CBC (4) se produce la máxima atrición (desprendimiento del recubrimiento siguiendo líneas horizontales) en la cara de desprendimiento de los tres casos.

- De la cara de incidencia:

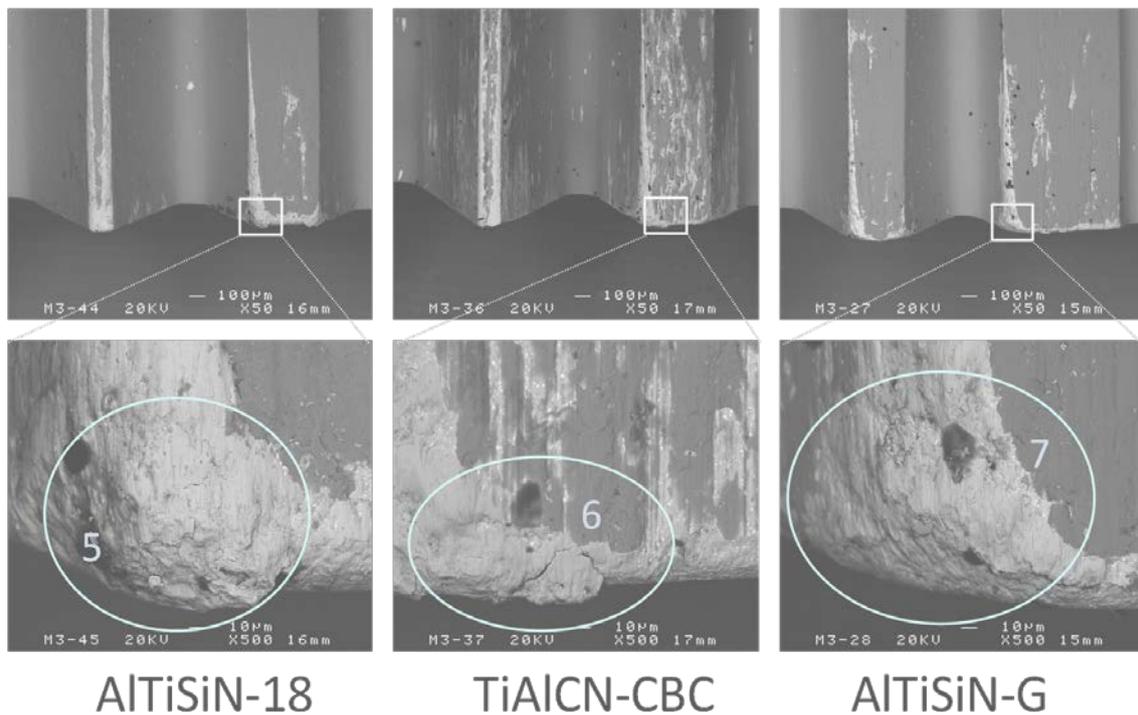


Figura 4.25: Imágenes de la cara de incidencia y detalle de los filamentos por recubrimiento. Aumentos: $\times 50$, $\times 500$

En la Figura 4.25, en el AlTiSiN-18 también se produce el mayor aumento del filo recreado por adhesión de ADI (5) que justifica el peor resultado de este recubrimiento. En el TiAlCN-CBC (6) se produce también un destacable filo recreado. En (5) y (7) se pueden ver marcas de desgaste por abrasión en los filamentos de corte (líneas de arrastre de material). El filo del recubrimiento AlTiSiN-G es el que mejor aspecto presenta (7).

En los tres recubrimientos se aprecia que el mecanismo de desgaste predominante es por adhesión del ADI a los filamentos y aristas, y recreado del filo, y cuando se desprende aparecen los puntos blancos del carburo de tungsteno del sustrato.

Los mejores resultados corresponden al recubrimiento AlTiSiN-G en desgaste VB, par y análisis al microscopio SEM. Los machos recubiertos con TiAlCN-CBC también ofrecen buenos resultados. Y los peores son los de AlTiSiN-18.

El recubrimiento TiAlCN-CBC tiene un coeficiente de fricción bajo, pero no tiene una dureza tan elevada como las del AlTiSiN-G y sobre todo no tiene capacidad de trabajar a elevadas temperaturas, está limitado a 500 °C. Este conjunto de características influye para que su comportamiento no sea tan bueno como el del AlTiSiN-G.

4.6.4 Conclusiones a los segundos ensayos

Como conclusión a esta segunda serie de ensayos cabe destacar que:

- El recubrimiento AlTiSi-G es el que vuelve a obtener los mejores resultados.
- El TiAlCN-CBC obtiene también buenos resultados, y el AlTiSiN-18 es el que peor se comporta.

4.6.5 Mejoras superficiales en los machos

Se compara el efecto que tiene introducir ciertas mejoras superficiales y micrométricas respecto a la preparación habitual que realiza el recubridor. La comparación se realiza entre los machos recubiertos con el AlTiSiN-G, del primer ensayo, con la preparación estándar y los machos del segundo ensayo con las mejoras incorporadas. Se introducen las siguientes mejoras superficiales previas y posteriores a recubrir a todos los machos que intervienen en la segunda tanda de ensayos:

Para reducir la delaminación en la parte posterior de los dientes, tal como se muestra en la Figura 4.26, se incrementa la distancia de alivio a 0,11 mm. Después de introducir esta modificación no se vuelven a apreciar nuevas delaminaciones en esta zona, en ningún caso.

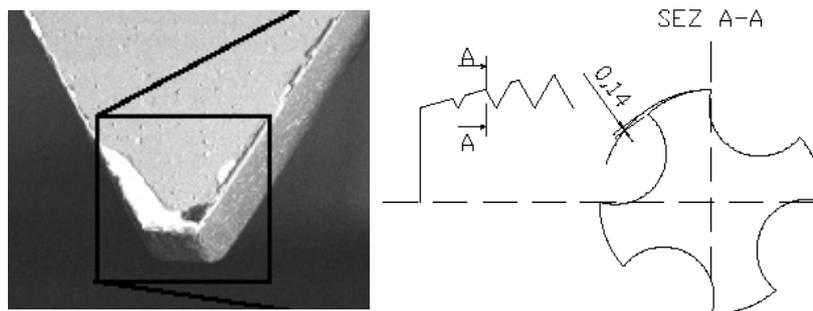


Figura 4.26: Delaminación en la parte trasera del diente y modificación del chamfer relief (zona de alivio) en un diente nuevo

Se aplica el tratamiento superficial previo al recubrimiento con el que se pretende reducir la rugosidad de las líneas del rectificado, aumentar las tensiones superficiales del sustrato, y también se busca el radio de filo de corte “óptimo”. Con este fin, a un lote de varios machos nuevos iguales se realiza un pulido por micro granallado en una máquina SGT a 4,5 MPa, con distintos tiempos de aplicación comprendidos entre 0 y 20 segundos con proyección de bolitas de vidrio de $\text{Ø}70 \mu\text{m}$. A continuación, se limpian y se recubren.

Después del recubrimiento se realiza un post-tratamiento para reducir el efecto de las gotitas de recubrimiento (droplets) y también para mejorar la tensión superficial del recubrimiento. Se realiza un tratamiento de pulido orbital (drag grinding) a baja presión de 0,2 MPa con cáscara de nuez como abrasivo en una máquina OTEC.

Se analizan los amchos en un microscopio Leica Z6 APO®. Los filos más agudos presentan un recubrimiento más frágil en la arista y los más romos un filo poco afilado, pero una mejor adherencia del recubrimiento. El criterio de elección ha sido escoger el filo de radio de menor valor con el que el recubrimiento esté bien adherido al filo de corte. En la Figura 4.27 se muestran las imágenes correspondientes a los cuatro radios de filo:

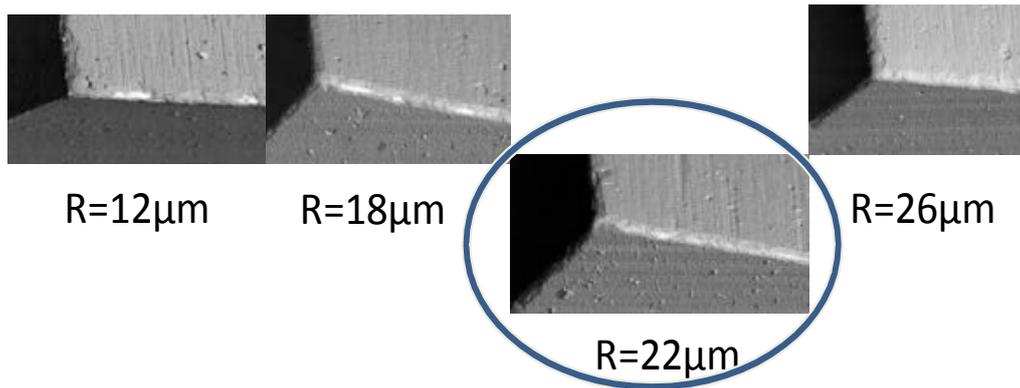


Figura 4.27: Radio de redondeo menor con el que no se produce desconchado del recubrimiento

El radio que mejor resultado aparente ofrece es el correspondiente a 22µm. Corresponde al micro granallado previo a recubrir de 4,5 MPa y 7.5 s con bolitas de vidrio de Ø70 µm.

4.7 ENSAYOS DE MACHOS MEJORADOS CON PREPARACIONES SUPERFICIALES

Se comparan machos de AlTiSiN-G sin y con mejoras superficiales especiales, dos machos de cada tipo.

4.7.1 Imágenes al SEM del recubrimiento de machos nuevos

En la Figura 4.28 se muestran las imágenes de los machos nuevos, el primero sin ningún tratamiento superficial especial y el segundo con las preparaciones de pulido previas y posteriores a recubrir:

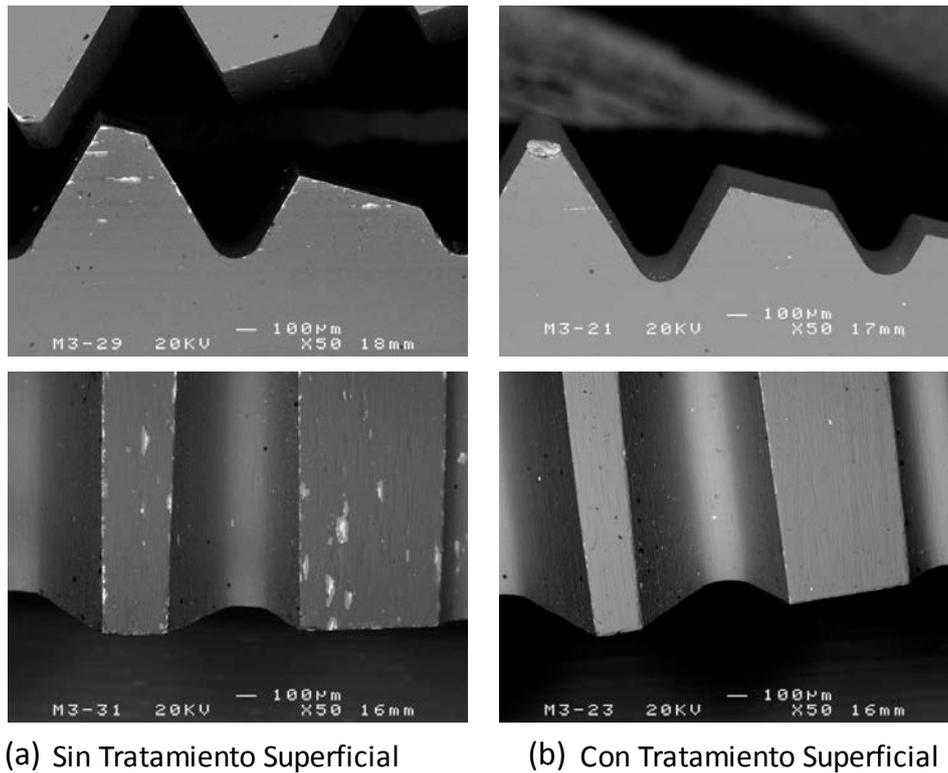


Figura 4.28: Machos nuevos recubiertos con AlTiSiN-G (a) sin preparación, (b) con preparaciones superficiales

El aspecto del recubrimiento es mejor en el caso de realizar las preparaciones superficiales.

4.7.2 Comparación de desgastes y de par

Se ensayan hasta 108 roscas, y se toman los valores del par medio de roscado y se miden los desgastes de ambos casos, al roscar 54 y 108 agujeros, los valores expuestos corresponden a las medias de los dos machos por cada caso. La comparativa del par medio de roscado y del desgaste queda como sigue en la Figura 4.29:

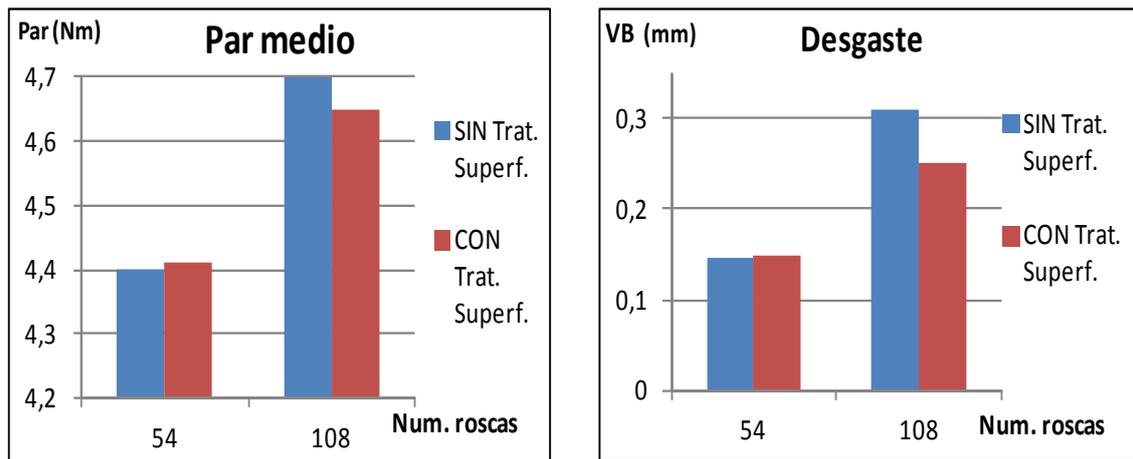


Figura 4.29: Evolución del par medio y del desgaste según la preparación

Tanto los valores del par medio como los del desgaste son mejores en el caso de los machos con las preparaciones superficiales. El valor del par medio es menor, sin preparaciones es de 4,70, y con las preparaciones 4,65 Nm tras roscar 108 agujeros, y también ocurre en la medición del desgaste, sin las preparaciones es de 0,31 mm, y con las preparaciones de 0,25 mm.

El efecto del tratamiento superficial es beneficioso, pero no parece una mejora muy llamativa. Habría que realizar más ensayos para valorar su eficacia.

4.8 ENSAYOS DE LA FRESADORA

Se miden características de una fresadora porque al roscar en ella se aprecian resultados a vida de los machos de corte diferentes.

4.8.1 Rigidez en el roscado

Se mide toda la cadena del conjunto de elementos de la fresadora que interviene desde la cimentación hasta la punta de la herramienta. La forma de obtenerla ha sido aplicando un desplazamiento determinado y midiendo el esfuerzo asociado, de forma que la rigidez es la relación del esfuerzo respecto del desplazamiento.

El estudio de la rigidez, su medición, la precisión y la sincronización de los movimientos se han realizado sobre la fresadora vertical Kondia A6® de 5 ejes disponible en el taller mecánico de la Escuela de Ingeniería de Bilbao.

La estructura de la fresadora analizada es de perfiles de fundición soldados. Incorpora un motor Siemens de 11Kw hasta 15.000 rpm, que transmite el movimiento al cabezal a través de un acoplamiento directo de diafragma.

4.8.2 Montaje del cabezal

El montaje más empleado de los husillos a la estructura suele ser a través de cojinetes de configuración tipo Back to Back, como ocurre en la Kondia A6®. Los rodamientos de fijación son de bolas cerámicas de contacto angular del tipo DBO.

En la Kondia A6® el regulador del cabezal, de posición y de velocidad es Fagor. El control de giro del cabezal se realiza con encóder motor. Utiliza un control numérico Fagor-8070®.

Los ejes X, Y y Z se mueven sobre guías de fricción ajustadas y carros accionados mediante un husillo a bolas con tuerca flotante sujetos a éstos.

Los movimientos en los 3 ejes (X, Y, Z) son interpolados por el CNC de Fagor-8070®, accionados por servomotores.

Para el posicionamiento y la precisión se emplean encóders de precisión de resolución 0,01 mm.

4.8.3 Acoplamiento de la herramienta al cabezal

El acoplamiento al cabezal de la Kondia A6® es un cono ISO al que se le monta un acoplamiento HSK.

4.8.4 El tipo de acoplamiento al portaherramientas

Se han empleado el directo y rígido en el caso de las pruebas de roscado rígido, y en otros casos el roscado con un dispositivo de compensación axial.

El directo y rígido. Introducido el macho en el portaherramientas y éste en el cono, se mueve con el cabezal de la fresadora. El cabezal debe de sincronizar perfectamente el giro con el avance (paso), del macho. Pero pequeñas discrepancias pueden producir roscas no perfectas o afectar a la vida de los machos.

Acoplamientos flexibles intermedios. Se emplean mandriles con compensación axial de tensión-compresión mínima para compensar las pequeñas diferencias entre el paso del macho y la sincronización de la máquina. Los acoplamientos flexibles intermedios admiten juegos axiales de unos pocos milímetros.

El portamachos que dispone de un mango HSK63 DIN69873 para acoplarse al cabezal, tiene un juego de compensación de longitud a presión de 0,05 mm, a tracción. Su funcionamiento se basa en que las transmisiones del par y de la fuerza axial se realizan

de modo independiente. Tiene unas pinzas de sujeción ER32-GB, IKZ® de hasta 50 bar. Sobre él va montado el dispositivo de compensación axial Softsynchro 3®, cuya sección se muestra en la Figura 4.30:

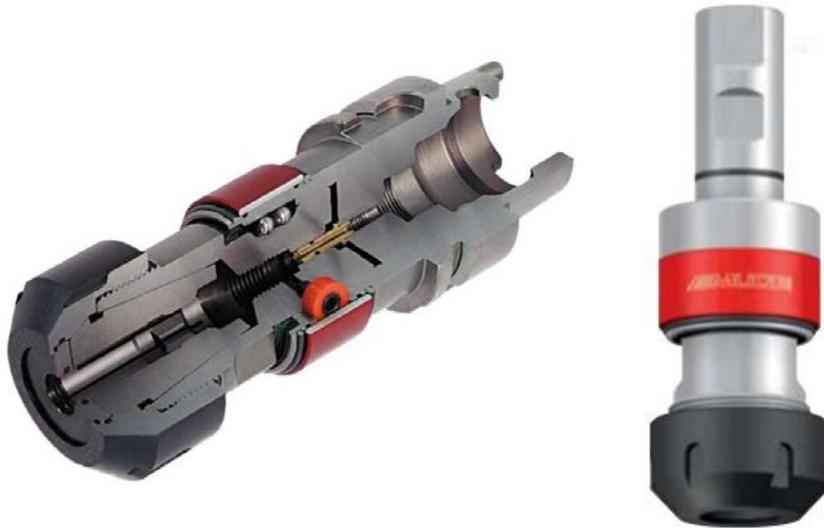


Figura 4.30: Dispositivo de compensación axial Softsynchro 3® y detalle (Fuente: Emuge)

4.8.5 Montaje de la herramienta en el acoplamiento

El montaje de la herramienta es función del tipo de operación que se vaya a realizar. En este caso los montajes de la herramienta para el roscado rígido, para el roscado con un acoplamiento de compensación axial y para el taladrado han sido diferentes. Todos corresponden a los realizados en la Kondia A6®. Hay que mencionar que el sistema Artis de medición del par está montado sobre el acoplamiento HSK y sin embargo, la fresadora Kondia tiene el husillo con cono ISO, por lo que cuando se ha medido el par el montaje se ha hecho con el adaptador ISO-HSK.

En la Figura 4:31 se ve el montaje correspondiente al roscado rígido, que es el siguiente:

- El cono ISO,
- el adaptador HSK con la anilla (de color naranja del Artis para medición del par),
- el portaherramientas,
- el macho con mango $\geq \text{Ø}7,96$ mm y emboque cuadrado.



Figura 4.31: Montaje para roscado rígido con el adaptador HSK y con la anilla del Artis DDU®

Una vez realizado el montaje, se ha medido el salto del macho en la punta, ha sido de 0,02 mm o inferior.

Para el roscado con el dispositivo de compensación axial el montaje es el mostrado en la Figura 4.32:

El cono ISO,
 el adaptador HSK con la anilla Artis®,
 el dispositivo de compensación axial de 0,5 mm Softsynchro®,
 el portaherramientas,
 el macho con mango $\geq \text{Ø}7,96$ mm y emboque cuadrado.



Figura 4.32: Montaje de elementos que intervienen en el roscado con compensación axial

La longitud del conjunto es de 220 mm desde el apoyo del cono ISO hasta la punta del portaherramientas. El salto del conjunto con el macho montado, en la punta es de 0,06 mm o inferior.

4.8.6 Montaje del acoplamiento para el taladrado previo

En la fresadora Kondia A6® el montaje para taladrar se ha compuesto de los siguientes elementos:

El cono ISO al cabezal de la fresadora,
el portaherramientas,
la boquilla que es una pinza hidráulica, calibrada de Ø8 mm.

Se emplean brocas de metal duro de la casa Walter Titex A3382-XPL®, con recubrimiento de nitruro de titanio, de Ø6,8 mm. La broca tiene mango $\geq \text{Ø}7,96$ mm porque mangos de menor diámetro han dado problemas de ajuste y deslizamiento de la broca por la pinza. En la Figura 4.33 se muestran el portaherramientas y la boquilla calibrada que se monta en él:



Figura 4.33: Portaherramientas y boquilla hidráulica calibrada

En este caso se ha montado todo el conjunto en máquina, y se ha medido el salto radial en la punta de la broca que es de 0,01 mm.

En las comprobaciones de precisión y rigidez, el taladrado se realiza a $V_c=50$ m/min; $S=2357$ rpm; $F=0,08$ mm/min. Se aplica emulsión refrigerante (emulsión de aceite en agua al 7 %). Se obtienen agujeros taladrados de entre Ø6,816 y 6,921 mm. Según la norma UNE EN 22768 1:1993 se admiten agujeros hasta Ø6,95 mm como máximo. Se mide el diámetro de 20 agujeros taladrados con un micrómetro de diámetros, las

mediciones oscilan entre $\varnothing 6,816$ y $6,921$ mm, con la mayoría de los valores entre $\varnothing 6,830$ y $6,860$ mm por tanto, conforme a norma y lejos de los valores límite.

En el roscado con macho, la herramienta se autocentra en el agujero previamente taladrado, por lo que los esfuerzos radiales se deben al arranque del material y los esfuerzos más significativos son los axiales, al avanzar el macho en el agujero.

Hay que destacar que todas las roscas producidas en los ensayos han sido comprobadas con el calibre pasa no-pasa de M8 H6, y han sido válidas.

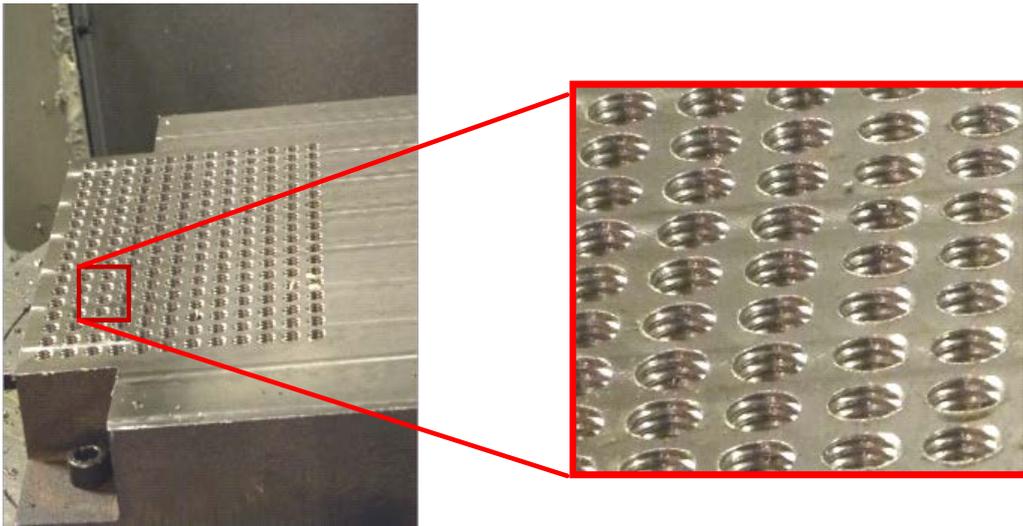


Figura 4.34: Bloque de ADI con agujeros roscados

El único caso en el que se han obtenido roscas no válidas ha sido en el de roscado rígido a la velocidad $V_c=10$ m/min que se menciona en el capítulo 4.9.8 “Comparación entre el roscado rígido y el roscado con un dispositivo de compensación axial en el ciclo completo a velocidades de corte de 1 m/min y 10 m/min, sobre ADI-1000 y F-1252”.

4.8.7 Mediciones de la precisión

Realizadas en la Kondia A6®. Los valores de medición en el eje Z han sido:

- Posicionamiento 0.008 mm
- Repetitibilidad 0.006 mm
- Precisión 0.001 mm

4.8.8 El Control Numérico

La Kondia A6® utiliza un control numérico Fagor-8070® con las instrucciones G63 para el caso de roscado rígido, y la G84 cuando se emplee un dispositivo de compensación

axial. La diferencia es que los dispositivos de compensación axial, tal como se emplea en este caso, admiten pequeñas holguras y errores, y funcionan para roscar con la función G84, en la que los movimientos se programan en lazo abierto.

4.9 MEDICIONES DE LA RIGIDEZ Y DE LA SINCRONIZACIÓN DE LA FRESADORA

Todas las mediciones y ensayos de rigidez se han realizado sobre la fresadora Kondia A6®. La forma de medición de la rigidez ha sido la siguiente: la pieza se coloca sobre la mesa dinamométrica Kistler 9255B®, y se sujeta. Se posiciona la herramienta hasta contactar con la pieza, y a continuación se desplaza un valor determinado y se mide la fuerza a que da lugar en la mesa. Para diferentes desplazamientos y fuerzas se obtienen las rigideces en las tres direcciones cartesianas (según la relación fuerza / desplazamiento). Intervienen la rigidez de la fresadora, la de los elementos intermedios como el cono, el portaherramientas, la herramienta y el material y las uniones entre todos ellos. En la Figura 4.35 se puede ver el montaje de la pieza sobre la mesa dinamométrica y el roscado:

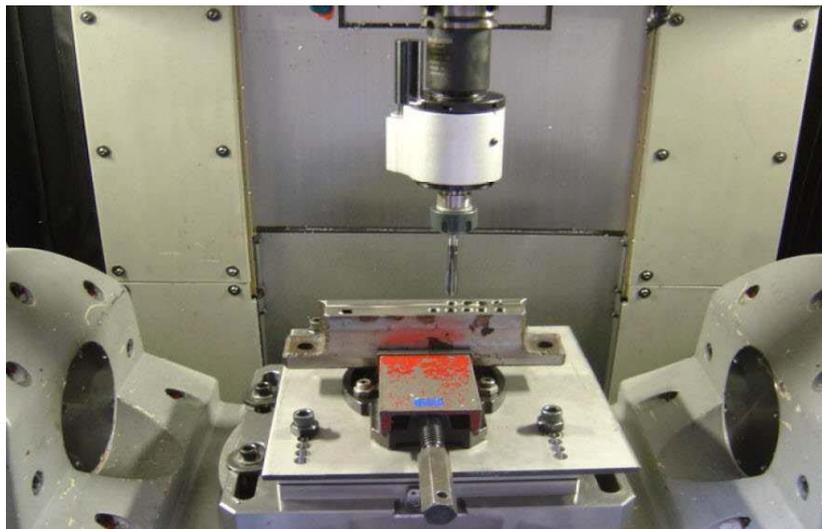


Figura 4.35: Roscado sobre la mesa dinamométrica Kistler 9255B®

4.9.1 La mesa Kistler para medición de esfuerzos en XY y en Z

Para estudiar la rigidez se han medido los esfuerzos que durante el roscado se producen en el plano XY y en la dirección axial, Z.

En la Figura 4.36 se muestra el esquema de la mesa dinamométrica empleada, que se basa en el efecto piezoeléctrico, en que la acción de una fuerza, la diferencia de presión entre dos caras paralelas produce una diferencia de potencial entre ciertos materiales. Esta señal eléctrica debe de ser posteriormente amplificada y tratada para poder ser captada y almacenada en un ordenador, que deberá de disponer del software adecuado.

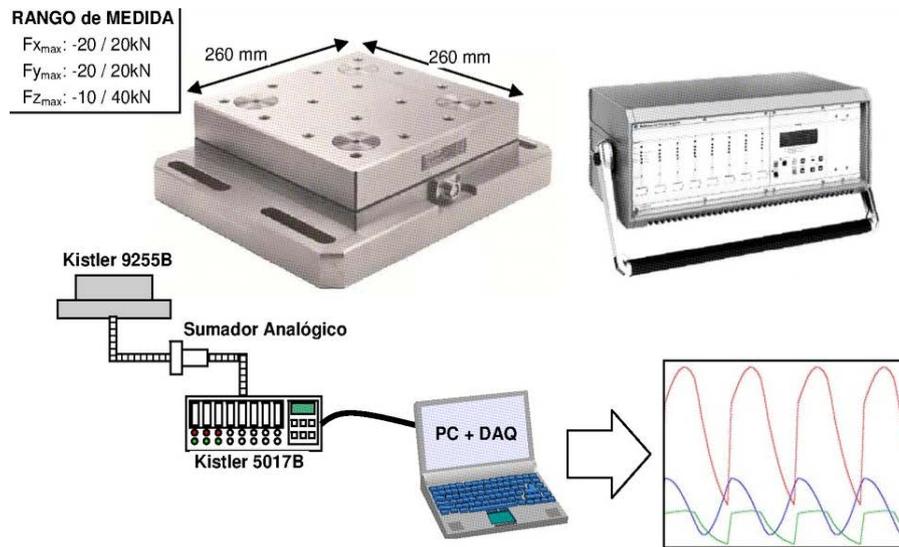


Figura 4.36: Mesa dinamométrica Kistler 9255B® y sistema de adquisición de datos (Fuente: Kistler)

La mesa dinamométrica mide los esfuerzos en el plano XY, por lo que se ha podido medir el par de roscado ya que se conocen las distancias entre el agujero roscado y los puntos donde están los sensores piezoeléctricos de toma de esfuerzos.

Para contrastar la validez de los valores de par se han comparado las señales del par obtenidos por dos sistemas, la mesa dinamométrica y el sistema rotor-estátor del Artis DDU® colocado en el cabezal. Se han tomado las señales de par simultáneamente por los dos sistemas al roscar el mismo agujero y se han obtenidos las recogidas en la Figura 4.37:

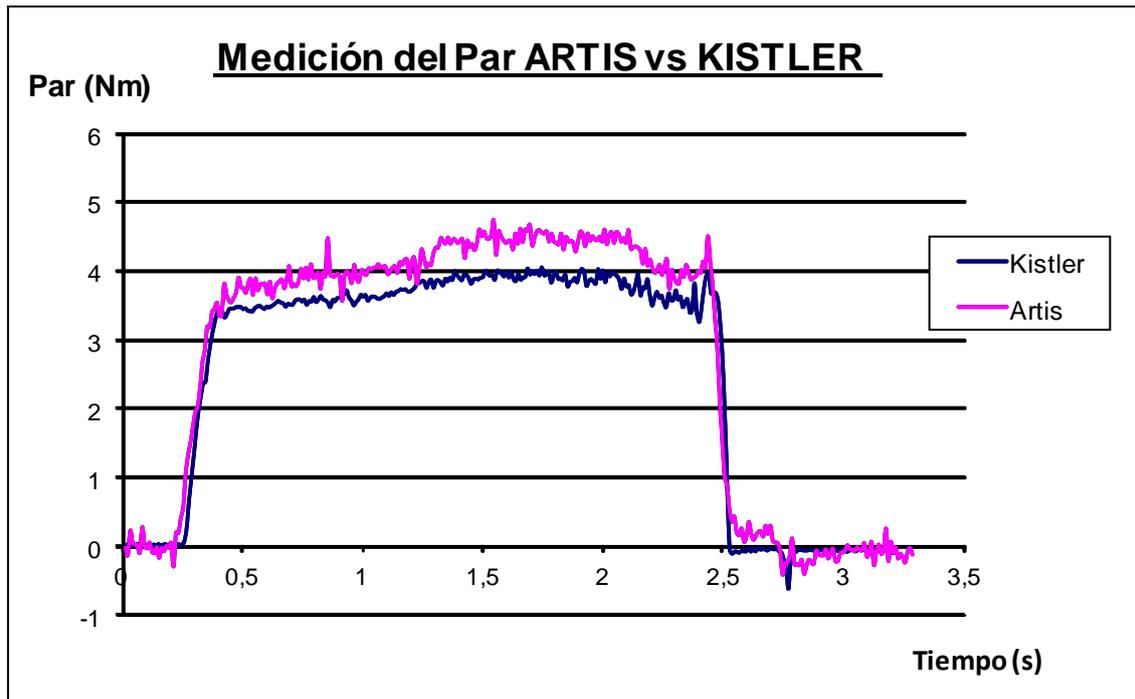


Figura 4.37: Señales de Par obtenidas con los sistemas Artis® y Kistler® al producir la misma rosca

La diferencia de los valores de las señales es de alrededor de un 8% (en la medición en Nm), más alto en el caso del Artis® que en la Kistler®, pero lo más destacable es que la forma de las dos curvas es muy similar, lo cual da validez a cualquiera de los sistemas. Hay que mencionar que el sistema Artis® fue calibrado por la firma.

En los ensayos de medición de la rigidez que se han realizado en trabajo hay que distinguir que, en el caso de roscar en rígido se hace con la instrucción G63 del CNC que es en lazo cerrado, y en el caso de emplear el un sistema de compensación axial de tracción-compresión de 0,5 mm (Softsynchro® de Emuge) se emplea la instrucción G84, que lo hace en lazo abierto. También hay mediciones en parado en las que no interviene ninguna de las dos instrucciones.

4.9.2 Medición de la rigidez en X e Y

Se monta en el cabezal, el conjunto del acoplamiento de roscado rígido hasta el portaherramientas y la herramienta. Se baja la herramienta 10 mm respecto a la cara superior de la pieza y se apoya en una de sus caras laterales. A continuación, se empuja la pieza contra la herramienta en saltos de 0,1 mm, (son los tramos horizontales de la gráfica siguiente), hasta 0,6 mm.

en X y en Y:

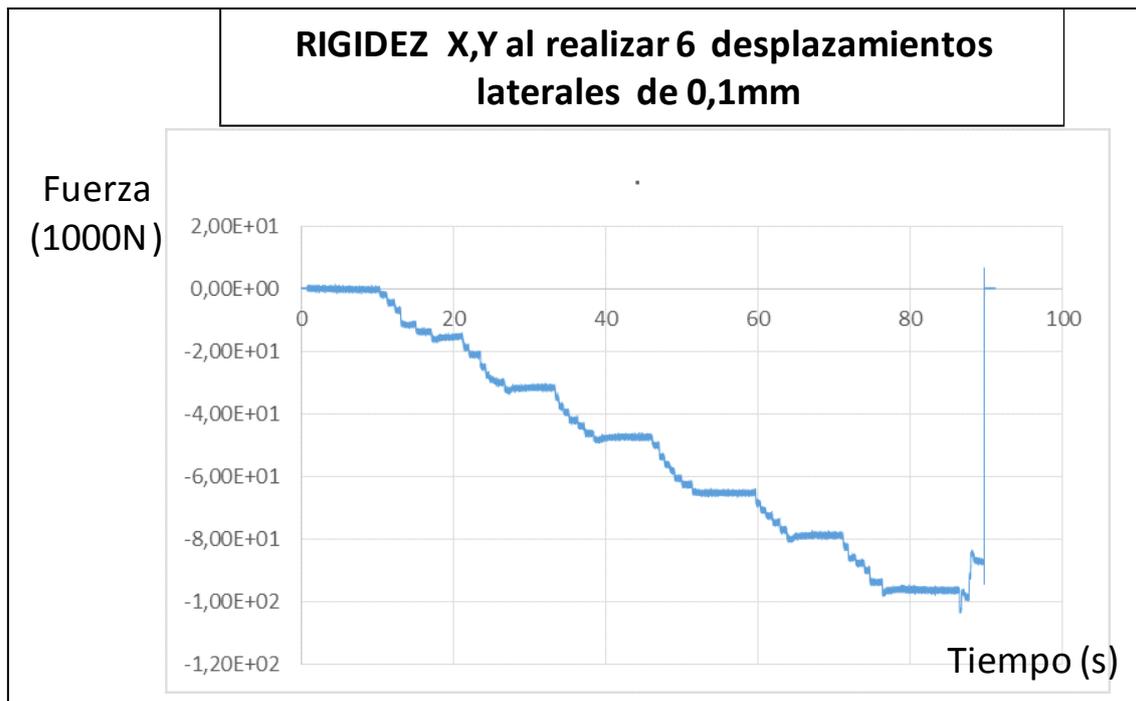


Figura 4.38: Fuerza en 6 desplazamientos en XY

Tal como se recoge en la Figura 4.38, en que la relación fuerza / desplazamiento obtenida es de 9000 N en 6 desplazamientos de 0,1 mm, la rigidez en las direcciones X e Y, es $K_X=K_Y=9000 \text{ N} / 0,6 \text{ mm} = 15 \text{ kN/mm}$.

Durante el roscado con macho, los esfuerzos de corte, en el plano XY no son especialmente exigentes para el conjunto de la fresadora. Son más significativos los axiales en Z que se analizan a continuación.

4.9.3 Medición de la rigidez axial en Z

En el roscado, el esfuerzo más significativo es el axial, por lo que se realizan las mediciones más exhaustivas en el eje Z, a tracción, a compresión, roscando en rígido en unos casos y roscando con el dispositivo de compensación axial en otros.

Se mide el esfuerzo de taladrar un agujero, es de compresión, sobre la mesa Kistler da un valor de +500N, por tanto, en las gráficas los esfuerzos de compresión aparecen como positivos y los de tracción negativos.

Los esfuerzos se miden roscando material F-1252 y machos comerciales con hélice de 35° . Son de sustrato HSSE-PM con recubrimiento de TiCN. Se rosca a $V_c=2 \text{ m/min}$ ($S=80 \text{ rpm}$) y $F=100 \text{ mm}$. El paso es de 1,25 mm.

4.9.4 Medición de la rigidez en Z en el roscado rígido

Se miden las fuerzas en Z al roscar en rígido, sin ningún dispositivo de compensación axial. Para roscar se emplea la función G63 del control de Fagor 8070®.

Se rosca 10 mm de profundidad, a una $V_c = 2$ m/min ($S = 80$ rpm). Se para la operación y se mide la fuerza en la mesa Kistler a la que está sujeta la pieza roscada con el macho. Se sube o se baja el cabezal verticalmente, a elección, en tramos de 0,1 mm.

El primer ensayo consiste en roscar 10 mm y después subir el cabezal en cuatro ocasiones 0,1 mm, se tira la pieza hacia arriba cuatro veces, y después se baja cuatro veces, hasta la posición inicial del cabezal.

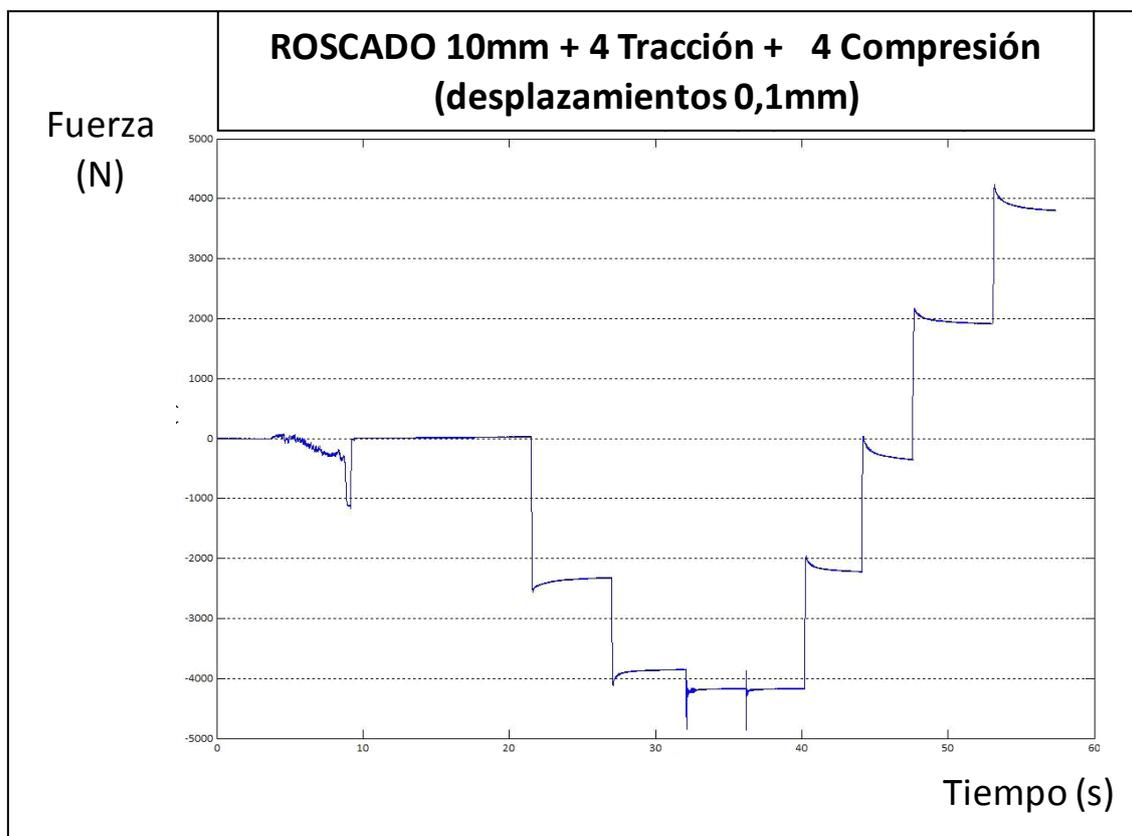


Figura 4.39: Fuerza axial en el roscado + Desplazamientos del cabezal de 0,1 mm (4 Tracción + 4 Compresión)

Tal como se ve en la Figura 4.39 que recoge la fuerza axial en el roscado, al final de la carrera de roscado de 10 mm, aparece un pico de fuerza de -1000 N, negativa por ser de tracción, fuerza que desaparece al parar. Se mantiene el cabezal en esa posición unos 10 segundos. Después se sube el cabezal 4 veces. El esfuerzo del primer tramo es de unos -2500 N en 0,1 mm; una rigidez de 25 kN/mm. En el segundo tramo la fuerza pasa a -4000 N en dos desplazamientos de 0,1 mm, por tanto, la rigidez es de 20 kN/mm, y luego el esfuerzo se estabiliza en el valor de -4000 N, la rigidez se reduce con el tercer

desplazamiento a 13,3 kN/mm y a 10 kN/mm con cuatro desplazamientos a tracción. La rigidez se va reduciendo. A pesar de aumentar los desplazamientos la fuerza se mantiene constante en -4000 N por lo que disminuye la rigidez. Se invierten los desplazamientos y se comprime, el primer tramo requiere unos 2000 N/ 0,1mm. Los demás saltos por cada 0,1 mm son también de unos 2000 N. Se llega a unos 4000 N de compresión después de los cuatro saltos de 0,1 mm. en los que la rigidez tiene un valor medio aproximado de 20 kN/mm.

A continuación, se realiza otro ensayo, pero invirtiendo el orden de desplazamientos del cabezal, después de roscar 10 mm de carrera, primero se comprime en cuatro pasos y después se tracciona en otros cuatro. En la Figura 4.40 se muestra la fuerza axial al rosacar y pasar de comprimir a traccionar:

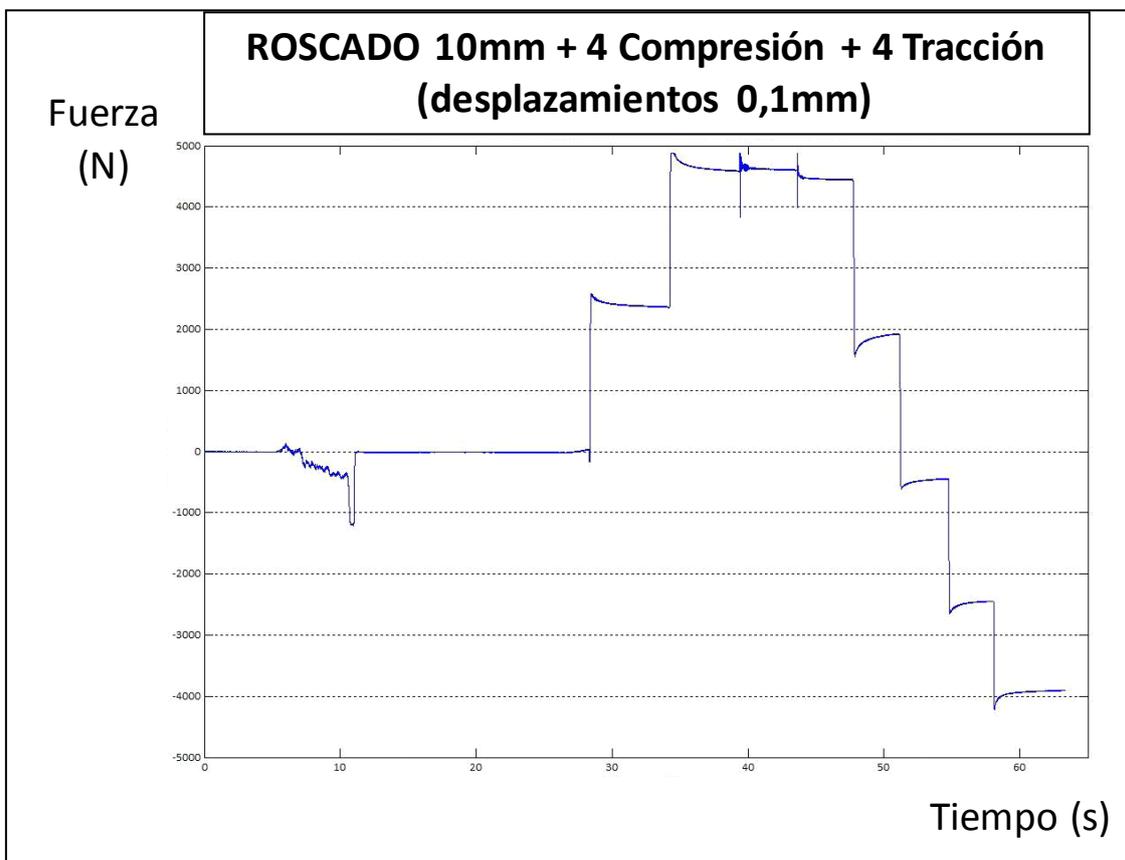


Figura 4.40: Fuerza axial en el roscado de 10 mm + Desplazamientos de 0,1 mm (4 Compresión + 4 Tracción)

En este ensayo, después de roscar 10 mm, aparece también un pico de -1000 N, a tracción, se para durante unos segundos y se baja el cabezal cuatro veces 0,1 mm, se pasa a compresión, después se sube el cabezal cuatro veces hasta la posición original. La rigidez en el primer desplazamiento a compresión es de unos 2400 N/ 0,1mm, de 24 kN/mm. En el siguiente desplazamiento se alcanzan unos 4700 N a compresión, en 0,2 mm, una rigidez 23,5 kN/ mm. En los dos desplazamientos siguientes no aumenta el esfuerzo, continúa costando unos 4500 N comprimir dos veces más 0,1 mm. La rigidez se reduce a

15 kN/mm después de 0,3 mm y a unos 11 kN/mm, después de 0,4 mm. Una vez alcanzado los 4500 N la fuerza no aumenta a pesar de producirse más desplazamientos. Después, se sube el cabezal cuatro veces 0,1 mm. La fuerza pasa de 4500 N a 1900 N, -500 N, -2500 N y -4000 N en cuatro desplazamientos, por lo que la rigidez pasa de unos 26 kN/mm a 21 kN/mm en los cuatro desplazamientos. El cabezal vuelve a quedar con un esfuerzo a tracción de -4000 N.

Durante los primeros 10 s de roscado, en ambos casos, aparece un esfuerzo que se incrementa a unos -400 N y a los 10 s (al final del roscado) se produce un pico a unos -1000 N, aparecen fuerzas de tracción (esfuerzos negativos). Su explicación es que el cabezal se retrasa en el giro y avance respecto del paso del macho. Al roscar va aumentando esta fuerza, y al llegar al punto del final del avance aparece el pico de la fuerza de tracción.

Las fuerzas máximas que se alcanzan con los desplazamientos de 0,1 mm son de unos -4000 N a tracción y de +4000 a 4700 N a compresión. Llegados a estos valores de esfuerzos, el conjunto se acomoda sin un esfuerzo adicional, no se incrementa la rigidez. La explicación puede ser que al llegar a una deformación dada, y un esfuerzo límite, ya no se requiere un aumento del esfuerzo para desplazar el conjunto de cabezal, (el acoplamiento-portaherramientas-macho se acomoda, se ajusta) y no requiere más fuerza para desplazar otros 0,1 mm. En ambos ensayos, se llega a valores extremos comparables después de comprimir-traccionar, o traccionar-comprimir.

En todos los casos, los primeros escalones tanto al pasar de tracción a compresión como a la inversa, a tracción tras compresión, la rigidez es máxima $K_z=25$ a 30 kN/mm. Después en los siguientes desplazamientos se reduce la rigidez y termina siendo de 11 a 20 kN/mm. Las fuerzas máximas obtenidas son de 5000 N a compresión y 4000 N a tracción.

4.9.5. Rigidez en Z con el dispositivo de compensación axial (Softsynchro®)

En este ensayo se rosca, con el dispositivo de compensación axial tensión-compresión de $\pm 0,5$ mm y la instrucción G84, a una velocidad de roscado $V_c=1$ m/min ($S=40$ rpm). Después de roscar una longitud de 10 mm se para y baja el cabezal 5 tramos de 0,1 mm, se comprime, después se sube 5 tramos de 0,1 mm, se tracciona.

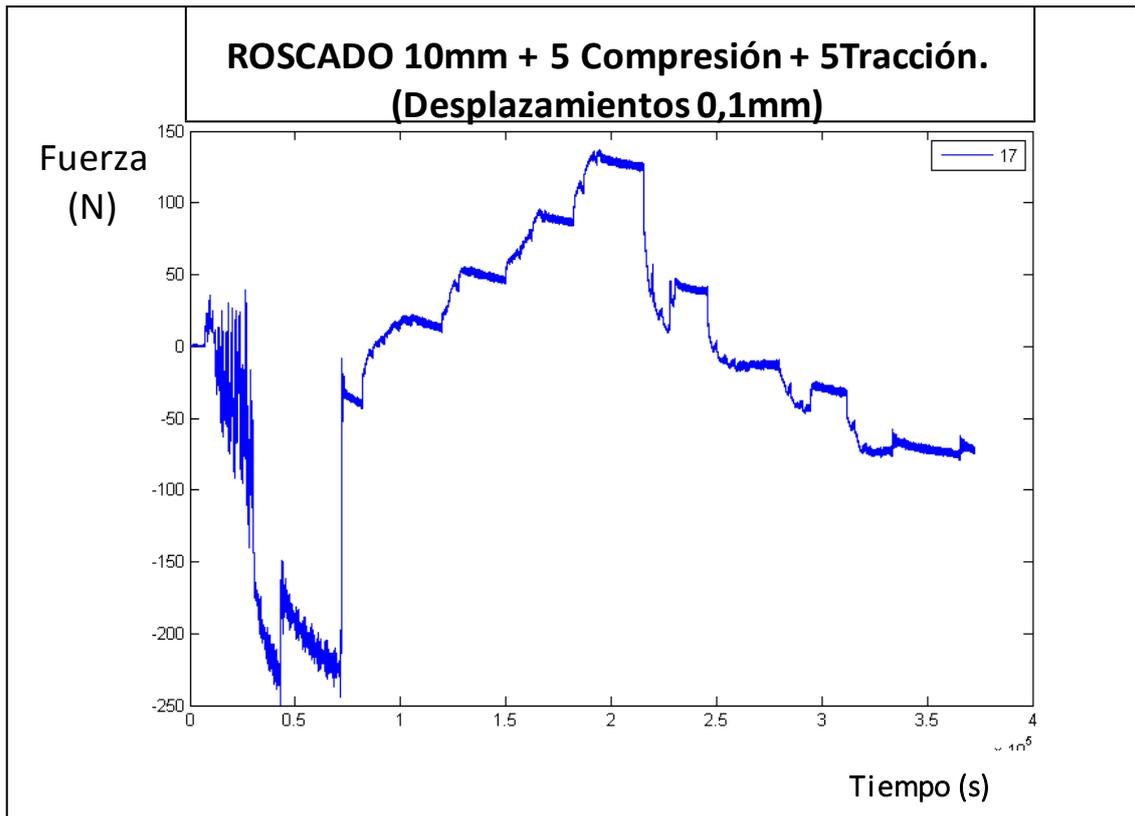


Figura 4.41: Fuerza axial en roscado con compensación axial de 10mm + Desplazamientos de 0,1mm (5Compresión + 5Tracción)

El valor de los esfuerzos mostrados en la Figura 4.41 roscando con el dispositivo de compensación axial, son menores. Al roscar aparece una fuerza de -200 a -250 N, a tracción. Después de roscar se baja el cabezal cinco tramos de 0,1 mm, se comprime. La rigidez en el primer salto de 200 N/ 0,1 mm, es de unos 2 kN/mm, después de los 5 saltos de 0,1 mm pasa a 400 N/ 0,5mm, la rigidez se va reduciendo a unos 0,8 kN/mm. Después se vuelve a subir el cabezal 5 tramos, se tracciona. En el primer tramo en el que se pasa de 150 a 0 N, la rigidez es de unos 1,5 kN/mm, luego en los siguientes desplazamientos las fuerzas se van reduciendo hasta quedar en -50 N. La rigidez se va reduciendo hasta unos 0,4 kN/mm. La rigidez del dispositivo de compensación axial es mucho menor, o más flexible que el caso de emplear el cabezal rígido. De 20 a 30 kN/mm en el rígido frente a 1,5 a 2 kN/mm en el primero de los saltos, después en los siguientes saltos la diferencia aún es mayor. Estas diferencias deben de tomarse de modo orientativo porque las velocidades de corte en las dos pruebas no han sido iguales, $V_c = 1$ m/ min con el dispositivo de compensación axial y $V_c = 2$ m/min, en el caso del roscado rígido.

4.9.6 Comparación de esfuerzos en Z entre roscado rígido y con el sistema de compensación axial (Softsynchro®)

Se comparan las señales de la fase de roscado, las fuerzas en Z que aparecen durante el roscado rígido con la instrucción G63, y la misma fuerza con el roscado con el dispositivo

de compensación axial y la instrucción G84. Las condiciones de máquina son iguales, el taladrado previo, la velocidad asignada $V_c = 2 \text{ m/min}$ ($S = 80 \text{ rpm}$) y la longitud de roscado de 10 mm. La comparación de la fuerza axial al roscar en rígido y con el dispositivo de compensación axial se muestra en la Figura 4.42:

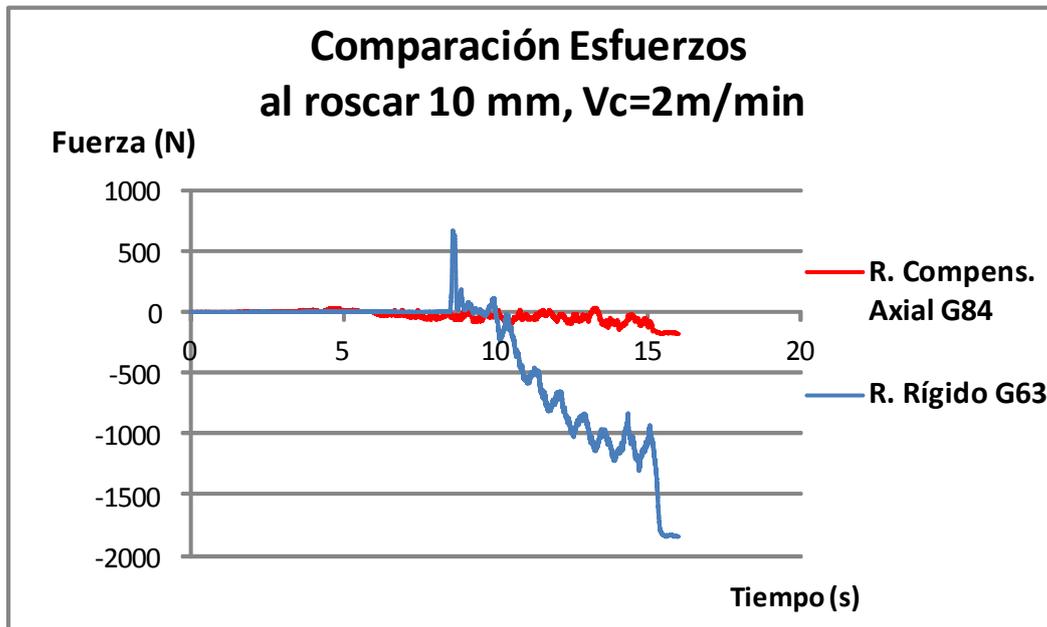


Figura 4.42: Fuerza axial en roscado rígido y con dispositivo de compensación axial

Ambos esfuerzos son de tracción, en el del roscado rígido de casi 2000 N en dos tramos, y con el dispositivo de compensación axial, de unos 200 N; del orden de 10 veces menor esfuerzo. En la señal de roscado rígido (señal azul), al llegar a los 10 mm de roscado se produce un incremento de la fuerza desde -1000 a casi -2000 N.

El hecho de que durante el roscado aparezcan fuerzas de tracción parece deberse a que al girar y roscar, el macho tira del cabezal. Esto es el cabezal al girar y avanzar en Z se retrasa respecto al paso del macho. Este efecto es más evidente en el roscado rígido. En el caso de emplear la compensación axial, el muelle del dispositivo absorbe parte del desajuste en la diferencia del paso. Evidencia un problema de falta de sincronización en esta fresadora porque la garantía de calidad del paso del macho es superior. Adicionalmente, al final de la carrera de roscado se vuelven a producir unos picos a tracción, más evidente en el caso de roscado rígido.

4.9.7 Efecto de la velocidad en la falta de sincronización

En la Figura 4.43 se comparan las señales de la fuerza axial en la fase de roscado a dos velocidades. Se rosca en rígido en dos casos a la velocidad, $V_c = 2 \text{ m/min}$ ($S = 80 \text{ rpm}$) y 10 mm y en otro caso a $V_c = 1 \text{ m/min}$ ($S = 40 \text{ rpm}$) y 22 mm de longitud con los avances nominales.

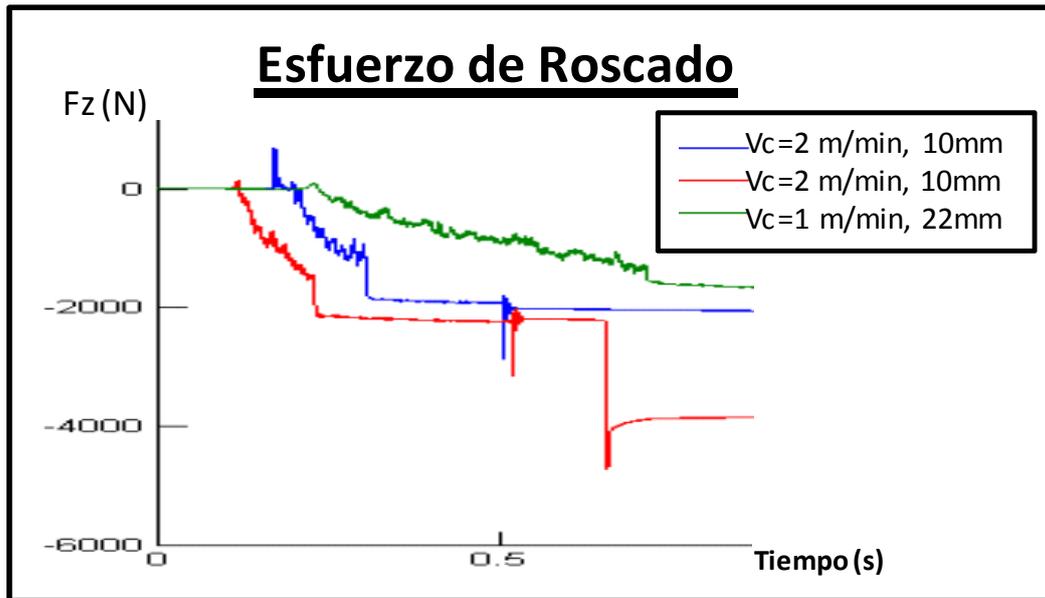


Figura 4.43: Fuerza axial en roscado rígido a distintas velocidades

El esfuerzo y la pendiente de las señales roja y azul son mayores que la de la señal verde, al aumentar la velocidad de roscado V_c de 1 a 2 m/min. La falta de sincronización aumenta con la velocidad. La pendiente del esfuerzo respecto del tiempo de roscado es bastante mayor al aumentar la velocidad. En los ensayos realizados a $V_c=2$ m/min ($S=80$ rpm) y 10 mm de roscado la fuerza de tracción alcanza unos -2000 N, el doble que al roscar a la mitad de velocidad $V_c=1$ m/min ($S=40$ rpm) y una profundidad de 22 mm, del orden de -1000 N, la mitad del esfuerzo, a pesar de que la longitud roscada es más del doble.

Hay que mencionar, que además hay dispersión de esfuerzos, del orden de un 5% entre dos ensayos consecutivos realizados en las mismas condiciones de velocidad, $V_c=2$ m/min ($S=80$ rpm) y 10 mm de profundidad de roscado, la diferencia es de unos 100 N.

4.9.8 Comparación entre el roscado rígido y el roscado con un dispositivo de compensación axial en el ciclo completo a velocidades de corte de 1 m/min y 10 m/min, sobre ADI-1000 y F-1252

Se comparan las señales del esfuerzo en Z y las señales del par, entre el roscado rígido y con un dispositivo de compensación axial en el ciclo completo, a dos velocidades de corte, $V_c=1$ m/min y $V_c=10$ m/min, sobre ADI-1000 y F-1252.

Se analiza la influencia de la velocidad de corte en las señales de la fuerza axial Z y en la del par, en el ciclo de roscado completo que consiste en roscar 20 mm, parar e invertir el sentido de giro del cabezal y la salida del macho del agujero roscado. Se rosca en rígido

con la instrucción G63, y con el dispositivo de compensación axial con la correspondiente G84. Primero a una velocidad de corte $V_c=1$ m/min ($S=40$ rpm) y después a $V_c=10$ m/min ($S=400$ rpm). Cada prueba se realiza a dos machos en las mismas condiciones de taladrado $\phi 6,8 \times 25$ mm y de roscado M8x20 mm. Los resultados obtenidos son iguales para cada pareja de machos.

Se repiten los ensayos sobre dos materiales.

4.9.8.1 Roscado de ADI-1000

Se emplean machos de M8 y geometría para ADI, de cuatro ranuras rectas, punta de chaflán de tres dientes y ángulo de punta de $15^\circ 30'$.

- A $V_c=1$ m/min ($S=40$ rpm):

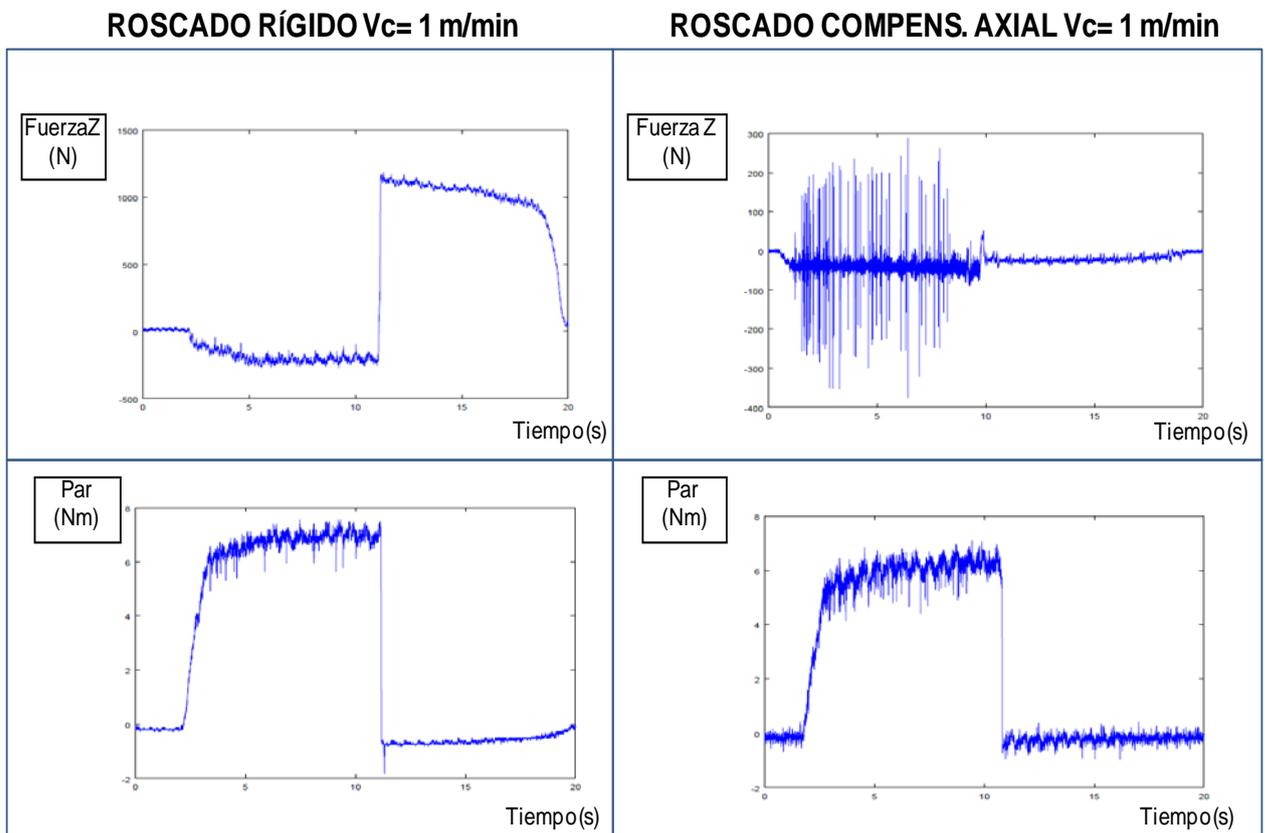


Figura 4.44: Fuerza axial y par en roscado rígido y con dispositivo de compensación axial a $V_c=1$ m/min

En el roscado rígido de la Figura 4.44, mientras se rosca la fuerza axial es de tracción, al llegar al fondo del agujero el esfuerzo medido es de unos 200 N. A continuación, al invertir el sentido del giro se produce un salto de la fuerza a compresión muy acusado a

unos 1200 N. Con el dispositivo de compensación axial estas fuerzas son de unos 50 N, y en este caso aparece una señal de ruido relevante.

Las señales de par son muy similares en roscado rígido y con el dispositivo de compensación axial.

- A una velocidad de corte 10 veces mayor, $V_c=10$ m/min ($S=400$ rpm):

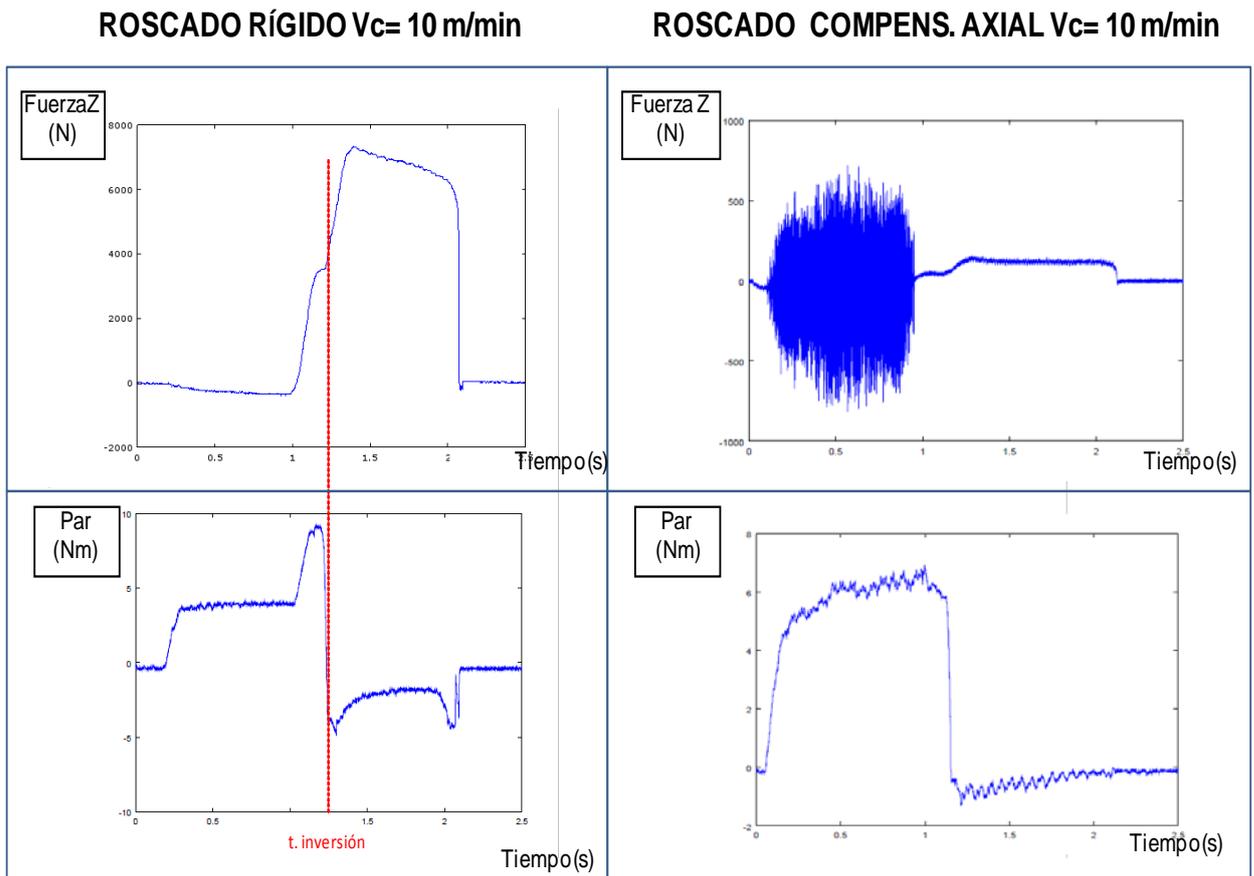


Figura 4.45: Fuerza axial y par en roscado rígido y con dispositivo de compensación axial a $V_c=10$ m/min

En la Figura 4.45, en el roscado rígido mientras rosca hay un esfuerzo a tracción reducido, y el gráfico de la señal de par de roscado es de unos 4 Nm. En las proximidades del punto inferior, antes y después de producirse la inversión aparecen dos saltos en la fuerza que pasa a ser de compresión. En el primero alcanza unos 4000 N y el par aumenta a casi 10 Nm. La señal de fuerza tiene un segundo salto después de llegar al fondo del agujero y comenzar a salir, la fuerza de compresión aumenta a más de 7000 N y en la gráfica de par éste pasa a ser negativo, con un pico de unos -5 Nm. Son significativos el esfuerzo de compresión que durante la inversión es de 6000 N y el esfuerzo del par que es elevado, entre 3 y 5 Nm. Cuando faltan pocos dientes para que salga el macho, se rompe. Previamente a la rotura, el macho trabaja a compresión a unos 6000 N y el esfuerzo del par es elevado en el que se produce un pico de 5 Nm.

Con el dispositivo de compensación axial las fuerzas son menores de 500 N. En este caso el ruido de la señal es muy acusado. La gráfica del par es muy parecida a la obtenida a la velocidad de 1 m/min, requiere unos 6 Nm. Rosca bien.

Se repite el ensayo de roscar en rígido a $V_c=10$ m/min con un segundo macho, y vuelve a romperse el macho al ir a salir del agujero roscado, se repiten las mismas formas de las señales.

Hay que destacar que a esta velocidad ($V_c=10$ m/min) y en roscado rígido, el error de sincronización más significativo ocurre en las proximidades del punto inferior de la carrera de roscado, poco antes de acabar de roscar, esto es al frenar el cabezal, y después de invertir el sentido de giro y acelerar para comenzar a salir. Aparecen repentinamente los mayores esfuerzos de compresión que repercuten en los valores de par.

Se repite el ensayo de roscado rígido a $V_c=10$ m/min, con la instrucción G84 (en lugar de G63), que correspondería al asistido por un dispositivo de compensación axial, y el control del giro y del posicionamiento en Z en lazo abierto. El macho se vuelve a romper al ir a salir. Por tanto, no es un problema específico del programa empleado (que sea en lazo abierto o cerrado), sino que se debe a como están programadas la deceleración y la aceleración del giro y del avance, y su sincronización.

A continuación, se muestran los dos machos con los últimos dientes rotos:



Figura 4.46: Rotura de dos machos al roscar en rígido con las instrucciones G84 y G63 a $V_c=10$ m/min

En el roscado rígido a $V_c=10$ m/min, al ir a salir el macho se rompe cuando la fuerza de compresión es de 6000 N y la soportan muy pocos dientes. La explicación a este hecho parece ser que mientras el macho tiene suficientes dientes embocados en la rosca éstos soportan el elevado esfuerzo de compresión, pero cuando disminuye el número de dientes, y son pocos, se rompe la punta.

4.9.8.2 Roscado de F-1252

Se repiten los ensayos cambiando de material, se rosca acero F-1252 para estudiar el efecto del material en las señales de fuerza en Z y de par a la velocidad de corte más exigente de $V_c=10$ m/min.

Los machos de M8x1,25 empleados son comerciales de GARANT modelo 13 5375-M8®. Son de acero rápido HSSE con revestimiento de TiN. El material a roscar, el acero es dúctil, y produce una viruta media-larga. Los machos tienen una geometría específica para facilitar la evacuación de la viruta y evitar su retención en los canales de evacuación. Tienen 3 dientes de chaflán y ranuras helicoidales con un ángulo de 40° . Cuentan con refrigeración axial interna.



Figura 4.47: Macho de M8 para roscar F-1252



Figura 4.48 Ejemplo de viruta embotada en el macho, al roscar acero dúctil F-1252

En la Figura 4.48 se puede ver el tipo de viruta larga, embotada en el macho por no tener la hélice adecuada.

Se ensayan dos machos en estas condiciones, y se obtienen resultados iguales con los dos machos. En la Figura 4.49 se recogen las gráficas de los esfuerzos de roscar en rígido y con el sistema de compensación axial a $V_c=10$ m/min:

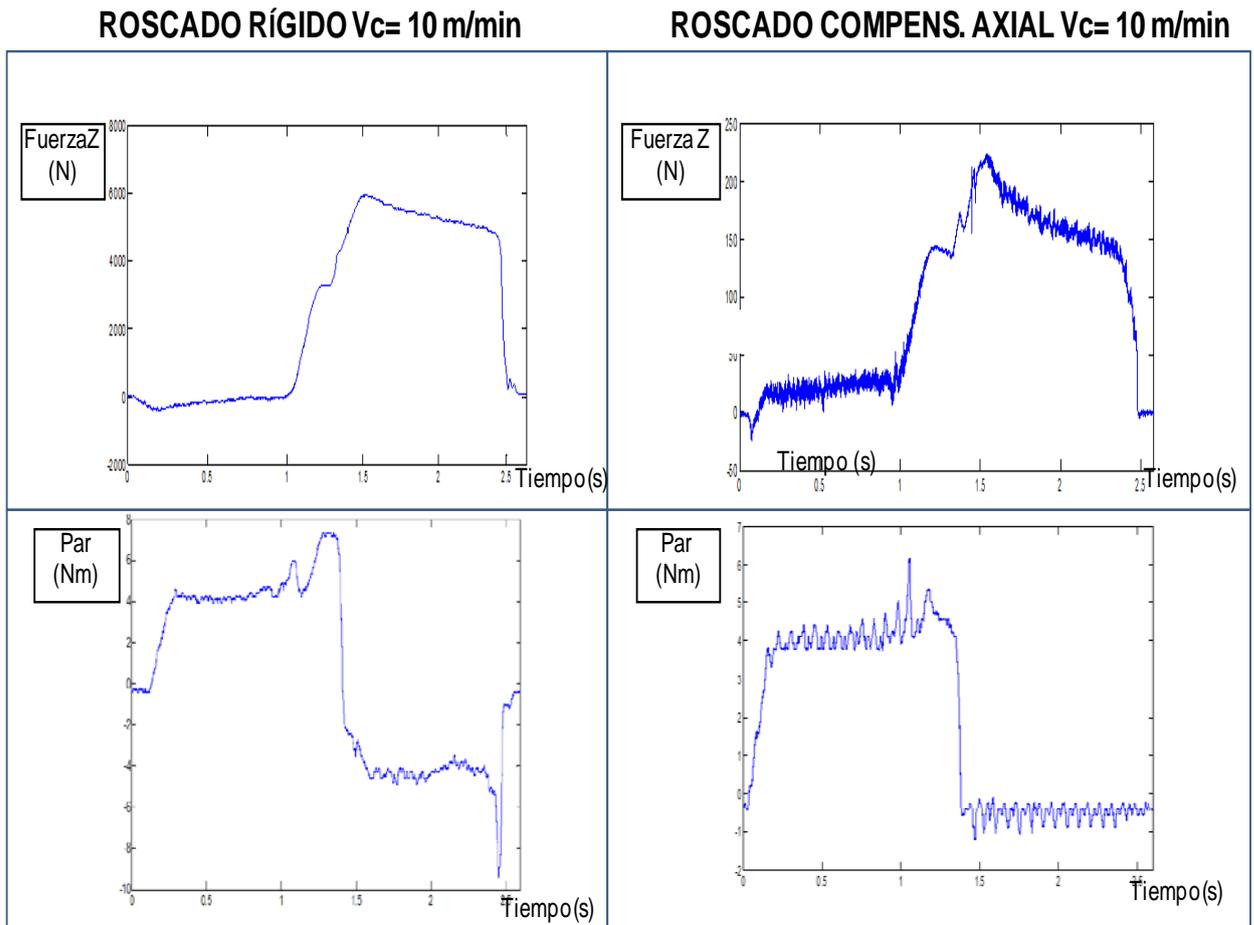


Figura 4.49: Fuerza axial y par en roscado rígido y con dispositivo de compensación axial a $V_c=10$ m/min

La señal de la fuerza máxima en el roscado rígido después de la inversión es de 6000 N frente a los 7000 N del ADI-1000, es menor en el material F-1252. También la señal del par de roscado máximo en F-1252 es menor, alcanza 8 Nm, en el ADI-1000 llega casi a 10 Nm.

Con el F-1252 los machos no se rompen, como ocurre con el ADI-1000, pero las roscas obtenidas no son válidas. No pasa el calibre pasa-no pasa. La explicación puede ser que el material absorbe parte de los esfuerzos y se deforma.

La deformación es mayor con el F-1252 porque la resistencia a la tracción es un poco menor (980 MPa frente a 1.000 MPa del ADI-1000), el límite elástico es más elevado (850 MPa frente a 700 MPa del ADI-1000), y la elongación es mucho mayor (16% frente al 5%), de forma que el resultado en el caso del F-1252 se deforman los hilos roscados mientras que en el ADI-1000 los machos soportan todo el esfuerzo de compresión, y se rompen.

Con el F-1252 también se aprecian dos saltos en la gráfica de fuerzas, en las proximidades del punto inferior, antes y después de la inversión del giro, de tracción reducida durante el roscado a una elevada compresión en dos saltos. Vuelven a repetirse unos esfuerzos excesivos en ese punto, al frenar cuando está llegando al punto inferior, y al acelerar después de producirse la inversión del giro, un error cuyo origen puede ser achacable a la orden que manda CNC sobre el cabezal y el macho.

Con el dispositivo de compensación axial, las fuerzas son del orden de 250 N, en este caso muy inferiores, y la señal de fuerza también muestra dos saltos en el entorno del punto de inversión del giro, pero en este caso los machos no se rompen y las roscas son válidas. En todos los casos pasa el calibre pasa-no pasa.

4.9.9 Sincronización entre el paso del cabezal y el paso del macho

Los esfuerzos axiales durante el roscado se deben a la falta de sincronización entre el giro y el avance del cabezal y el paso por vuelta del macho. La geometría y el paso del macho los cumple su fabricante según la norma DIN EN 22857, pero la sincronización del movimiento de la fresadora depende del CNC, de los accionamientos, de los elementos de medida internos, etc. de la calidad de operación de la fresadora. Que el macho tire del cabezal, se debe a que el avance por vuelta del macho es mayor que el avance por vuelta del cabezal. Para evaluar la diferencia, se realiza un nuevo ensayo en el que se falsea el avance por vuelta respecto al valor nominal, que en M8 es de 1,25 mm.

Se realizan tres mediciones del esfuerzo durante la fase de roscado a igual velocidad $V_c=1$ m/min ($S=40$ rpm) y una profundidad de roscado de 22 mm sobre F-1252. Se ensayan tres valores de avance: a) con el avance nominal $F=50$, b) se aumenta el avance un 1% $F=50,5$ (avance $\times 1,01$), c) aumentado el avance sólo un 0,5% respecto al nominal, (avance $\times 1,005$). Los valores de las fuerzas se recogen en la siguiente Figura 4.50:

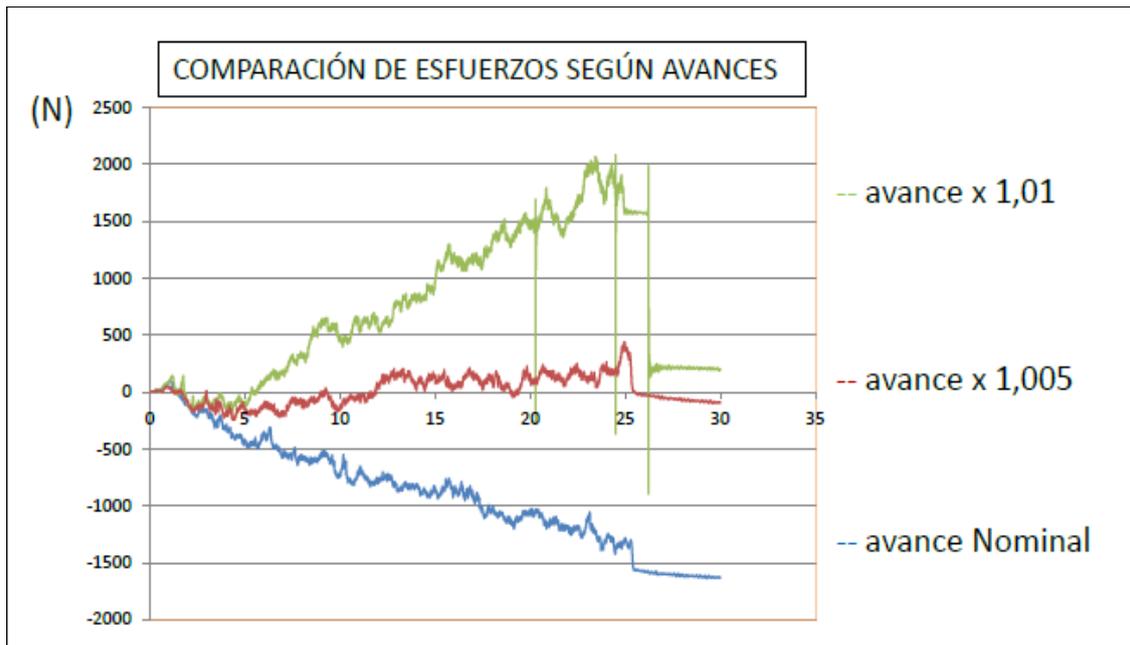


Figura 4.50: Fuerza axial en roscado rígido según el avance

- a) con el avance nominal $F=50$, al roscar aparece un esfuerzo de tracción de -1500 N;
- b) con el avance aumentado un 1% $F=50,5$ (avance x1,01), rosca a compresión +2000 N, el avance es excesivo;
- c) aumentado el avance sólo un 0,5% respecto al nominal, (avance x1,005), el esfuerzo es inferior a 500 N.

Por tanto, se confirma que la sincronización del movimiento del cabezal en esta fresadora al nominal no es correcta. Con un avance aumentado, falseado, respecto al nominal en un 0,5% se obtiene el menor esfuerzo, y por tanto el mejor roscado, que requiere el menor esfuerzo en Z. Esta corrección del avance (aumento en un 0,5%) es adecuada para una velocidad de $V_c=1$ m/min.

4.9.10 Conclusiones al estudio de la rigidez en Z y de la sincronización

- -Estas pruebas se han realizado sobre una fresadora Kondia A6® equipada con un CNC Fagor-8070.
- -El esfuerzo de tracción al que se somete al macho a una velocidad de corte $V_c=2$ m/min (80 rpm en M8 es especialmente baja), es 40 veces mayor en el caso de roscado rígido frente al caso de emplear un dispositivo de compensación axial (Softsynchro®).
- -En el ensayo a $V_c=10$ m/min al roscar ADI, la falta de sincronización durante el roscado produce un esfuerzo en Z de unos 200 N a tracción, mientras que cerca

del punto inferior y al comenzar la inversión, en dos saltos, se producen los esfuerzos más elevados de unos 7000 N, a compresión. Muestra del mal funcionamiento es que la señal de par, cuando el macho rosca y cuando sale del agujero ya producido, es de magnitudes similares (4 Nm al roscar y 3 Nm al salir). Además, en la gráfica del par se producen picos, antes de llegar al punto inferior hasta casi 10 Nm y en la inversión en dos ocasiones de 5 Nm. Además de producirse algo de retraso en el seguimiento del cabezal respecto del paso de la herramienta, al llegar al fondo del agujero e invertir el sentido de giro se producen dos incrementos en las fuerzas, a compresión, que no desaparecen durante la salida del macho y parecen ser las causantes de la rotura.

- La gráfica del esfuerzo axial al roscar a $V_c=10$ m/min muestra que los errores aumentan con el desplazamiento en Z al llegar al punto inferior y comenzar a invertir el giro.
- En el caso estudiado de la Kondia A6® con CNC Fagor-8070®, las señales son iguales con las instrucciones de roscado G63 y G84, cuando una es en lazo cerrado y la otra en lazo abierto. Puede haber un problema del CNC de la máquina.
- En la carrera de roscado se produce una falta de sincronización entre el cabezal y el paso del macho que se reduce falseando el avance, aumentándolo.
- La falta de sincronización aumenta con la velocidad de trabajo, roscando a más velocidad $V_c=10$ m/min se producen mayores errores, que a una velocidad inferior ($V_c=1$ m/min).
- También influye la resistencia y la ductilidad del material y la geometría del macho. Los esfuerzos (F_z y par) son mayores con un material más duro (mayor módulo elástico) como el ADI-1000, de mayor resistencia y de menor ductilidad que en uno más dúctil, como el acero F-1252.
- A una velocidad de corte $V_c=10$ m/min y roscado rígido con G84, o se producen roscas no válidas, comprobado con los calibres pasa-no pasa (por la deformación de los hilos) como ocurre con el acero F-1252, o se rompen los machos como ocurre al roscar un material menos dúctil como el ADI-900.

4.10 INFLUENCIA DE LA CINEMÁTICA EN EL ROSCADO

En este apartado se ensayan a vida machos iguales, roscando en condiciones de operación iguales, lo que varía es que se trata de dos fresadoras verticales de distintos fabricantes, una es una Ibarria ZV 25/ U600® y la otra es una Kondia A6®. En ambas se emplea el dispositivo de compensación axial (Sostsynchro®) entre el cabezal y el macho. Se rosca ADI-900, se asignan los mismos parámetros de velocidad de corte, $V_c=30$ m/min,

S=1200 rpm, F=1500 mm/min, y refrigeración interna y externa iguales. Los agujeros son ciegos de 20 mm de longitud realizados después de taladrar a $\phi 6,8 \times 25$ mm. En ambos casos se rosca ADI-900.

4.10.1 Cinemática de la fresadora Kondia A6®

En ésta se ensayan a vida dos machos iguales en las mismas condiciones de taladrado previo, roscado, refrigeración, etc., el macho1 realiza antes de romperse 648 roscas y el macho 2, 381 roscas y se rompe. En la Figura 4.51 se recoge la dispersión de la vida de los machos ensayados:

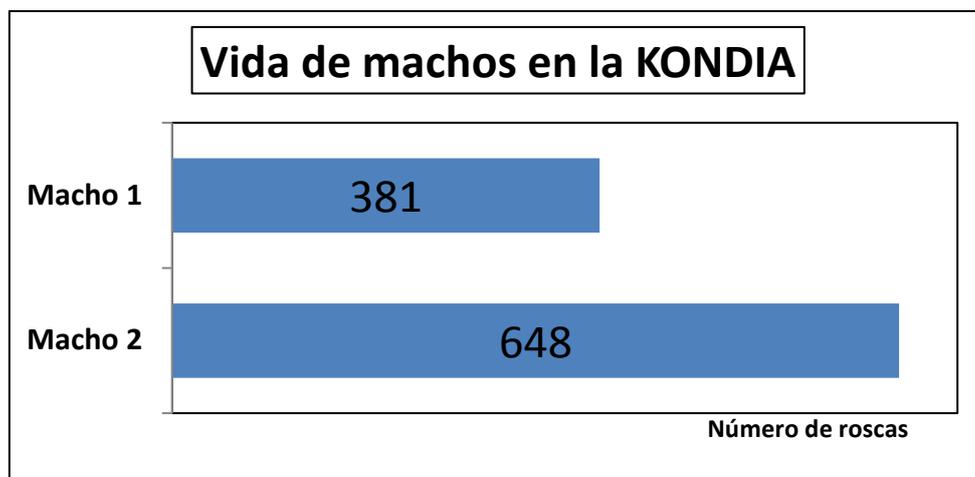


Figura 4.51: Número de roscas realizadas por dos machos sobre ADI-900 en la Kondia A6®

A lo largo de los ensayos realizados en las dos fresadoras, se aprecia que hay diferencia en la velocidad de operación entre ambas por lo que se procede a registrar las velocidades de trabajo del osciloscopio de cada una. En la Figura 4.52 se muestra la imagen del osciloscopio correspondiente a una velocidad de corte asignada $V_c=30$ m/min, de 1193 rpm.



Figura 4.52: Señal del osciloscopio, muestra la velocidad de giro (rojo) y la posición del cabezal en Z (rosa) de la fresadora Kondia A6®

En rojo, se recoge la velocidad de giro del cabezal asociada a la corte. Dos mesetas consecutivas corresponden a un ciclo completo de roscado y de salida del macho. En rosa, se muestra la posición del cabezal en el eje Z. En amarillo la velocidad de avance en Z, los picos corresponden al cambio de un agujero a otro.

Se alcanza la velocidad de corte de 30 m/min. El tiempo de roscado es 1,59 segundos de los que tarda 0,4 s. en alcanzar la velocidad nominal.

4.10.2 Cinemática de la fresadora Ibarria ZV 25/ U600®

En la otra fresadora, se ensaya a vida otro macho en las mismas condiciones nominales de velocidad de corte, $V_c=30$ m/min (le corresponde una velocidad de giro $n=1193$ rpm), se recoge la velocidad real del cabezal, tal como puede verse en la Figura 4.53:

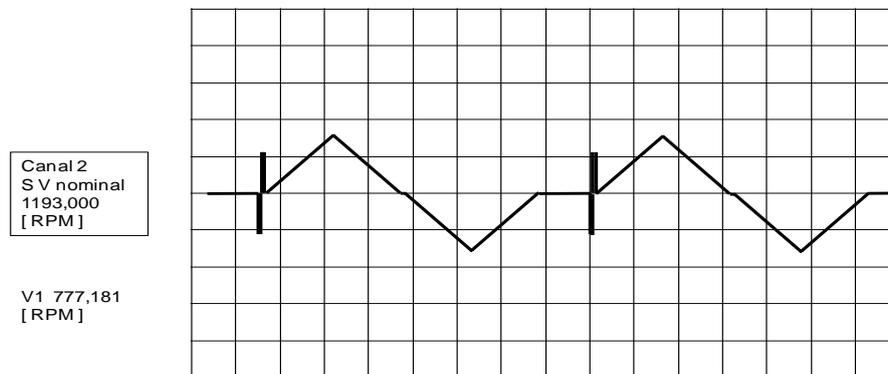


Figura 4.53: Imagen del osciloscopio que muestra el cambio de la velocidad de corte en la fresadora Ibarria®

La variación de la velocidad del cabezal es una función lineal en rampa, en este caso de pendiente y de aceleración constante, Acelera hasta la mitad del agujero roscado y en este punto comienza a desacelerar para llegar al final del agujero a una velocidad de giro nula (en la pantalla se indican la rampa de aceleración y de deceleración a lo largo del agujero). Una vez alcanzado el punto más bajo, el cabezal invierte su sentido de giro y comienza a salir con velocidad negativa y con los mismos valores que al roscar, pero el cabezal con el sentido de giro inverso.

La velocidad máxima que alcanza el cabezal en un ciclo, con estas condiciones de función en rampa es de 777 rpm, cuando la teórica correspondiente a 30 m/min debería de ser 1193 rpm, esto es alcanza el 65% de la velocidad de corte teórica, 20 m/min. La razón se debe a que en la longitud de roscado asignada, el cabezal tiene que acelerar, decelerar y llegar a velocidad cero al final de la carrera de roscado. En 20 mm de longitud, con la rampa asignada no hay suficiente espacio o tiempo para alcanzar la velocidad asignada. Por tanto, las condiciones cinemáticas reales de roscado son inferiores, menos agresivas

que las teóricas. Ensayado a vida en esta fresadora un macho, igual a los empleados en la otra, recubierto con AlTiSiN-G realiza 997 roscas antes de romperse.

En la Tabla 4.1 se recoge la comparación de la cinemática y de la vida de los machos entre las dos fresadoras. Una diferencia significativa entre ambas fresadoras es la rampa de aceleración y de deceleración que en la Ibarmia® es de 1,2 s hasta alcanzar sólo 777 rpm, esto es el 65% de la velocidad nominal. Todo el ciclo de roscado y salida del macho precisa 2,4 s. En la Kondia® la aceleración y la deceleración requieren 0,4 s y alcanza el 100% de la velocidad de corte nominal, todo el ciclo de roscado y de salida del macho precisa 1,6 s. La Kondia® cumple la velocidad programada y es más ágil que la Ibarmia®.

	VELOCIDAD	VELOCIDAD	ACELERACIÓN		VIDA
	CORTE	CORTE	Tiempo (s)	Relación	MACHOS
	ASIGNADA	REAL			(Nº roscas)
IBARMIA	30 m/min	19,5 m/min	1,2	1	967
	(1193 rpm)	(777 rpm)			
KONDIA	30 m/min	30 m/min	0,4	4,6	648
	(1193 rpm)	(1193 rpm)			381

Tabla 4.1: Condiciones cinemáticas y de vida de los machos en las dos fresadoras

La diferencia en la vida de los machos entre ambas fresadoras es del orden de 1,5 a 3 veces mayor en la Ibarmia® que en la Kondia®. Una explicación puede ser la diferencia de aceleración y deceleración de la Kondia®, que es 4,6 veces mayor, y que la velocidad de corte alcanzada sea un 50% mayor. Esta diferencia cinemática se produce tanto en el sentido de corte como al invertir y salir el macho por la rosca producida. Además, en la Kondia® se produce una falta de sincronismo entre el movimiento del cabezal y la geometría del macho, tal como ya se ha expuesto en el punto 4.9.10 sobre esfuerzos y sincronización, que da lugar a esfuerzos axiales sin explicación en las proximidades de los cambios de sentido de giro.

Las características de la pendiente de la rampa de aceleración y la secuencia vienen definidas por el control Heidenhain® que depende de las características cinemáticas de la fresadora.

La Kondia A6® utiliza un motor Siemens de 11Kw hasta 15000 rpm que transmite el movimiento al cabezal a través de un acoplamiento directo de diafragma y un control numérico Fagor-8070®. Mientras que en la Ibarmia® el cabezal lo mueve un sistema de electro mandrino directo Siemens DMS100.46.4FHS® de 10 Kw de potencia y un control numérico Heidenhain®.

Se produce la paradoja de que la máquina en principio más rápida, la Ibarmia®, con electro mandrino y motor hasta 18000 rpm tiene un CNC que en el roscado acelera 4,6 veces más lenta que la Kondia®, de modo que no alcanza las velocidades de operación asignadas. También el modo de aproximación y de comienzo de operación de roscado es más conservador. Esta máquina es del año 2002. Este conjunto de operaciones es beneficioso para el roscado y la vida de los machos. Un macho roscando ADI-900 alcanza a vida 996 roscas antes de romperse y la evolución del par medio de roscado es lineal. Para la vida de los machos es mejor por resultar unas condiciones cinemáticas menos exigentes que las teóricas

Por otro lado, en la Kondia® el accionamiento del cabezal es con un motor con acoplamiento y 15000 rpm, esto es una máquina menos rápida, pero el CNC asigna aceleraciones 4,6 veces mayores. Esta fresadora es más moderna, del año 2010. Los programas de roscado de los CNC no son accesibles al usuario y vienen determinados por los fabricantes de las fresadoras.

En la Kondia A6® en el ciclo de roscado se producen errores llamativos en el movimiento en Z, antes de llegar al final del roscado y al comenzar la inversión del cabezal.

También hay que destacar la gran dispersión en la duración de los dos machos en la misma fresadora Kondia®, a pesar de que las condiciones deberían de ser similares, por tratarse de la misma máquina, los machos y las condiciones iguales.

Hay que mencionar que las velocidades recogidas en las pantallas de las dos fresadoras, en sus osciloscopios, corresponden a las que ordenan los CNC y no son las que se producen instantáneamente en la punta de la herramienta, que es donde se recogen los esfuerzos medidos. Entre la orden de movimiento del control y el real de la punta de la herramienta se producen retrasos, inercias, holguras, errores, a través de los elementos intermedios, tal como se ha expuesto en el capítulo 3.3 sobre la fresadora.

4.11 LA EVOLUCIÓN DEL PAR EN EL ENSAYO A VIDA

En el ensayo a vida en la fresadora Ibarmia roscando ADI-900, en condiciones de taladrado $\phi 6,8 \times 25$ mm, rosca M8x20 mm, $V_c=30$ m/min, con refrigeración interna y externa con taladrina, el macho recubierto con AlTiSiN-G y las mejoras de las preparaciones superficiales incorporadas, llega a producir 996 roscas buenas y se rompe en la rosca 997.

La evolución de la señal de par medio aumenta de manera lineal desde 4 Nm en la primera rosca hasta 8,2 Nm en la rosca 996, tal como se recoge en la Figura 4.54:

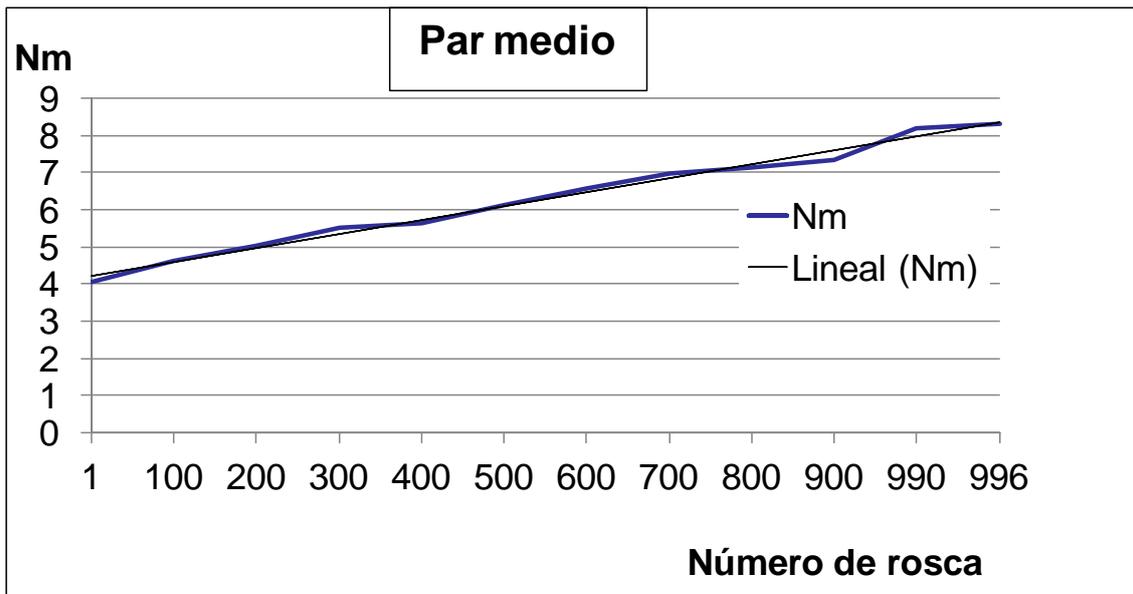


Figura 4.54: Evolución del valor del par medio desde la rosca 1 hasta la 996

La señal evoluciona de manera lineal, y entre la primera rosca y la última el par medio aumenta en algo más del 100%, hasta romperse.

Una secuencia tipo de señales de par a lo largo del proceso de roscado de sucesivos agujeros es el mostrado en la Figura 4.55 que sigue, del que se toma el par medio de la parte positiva de la señal.

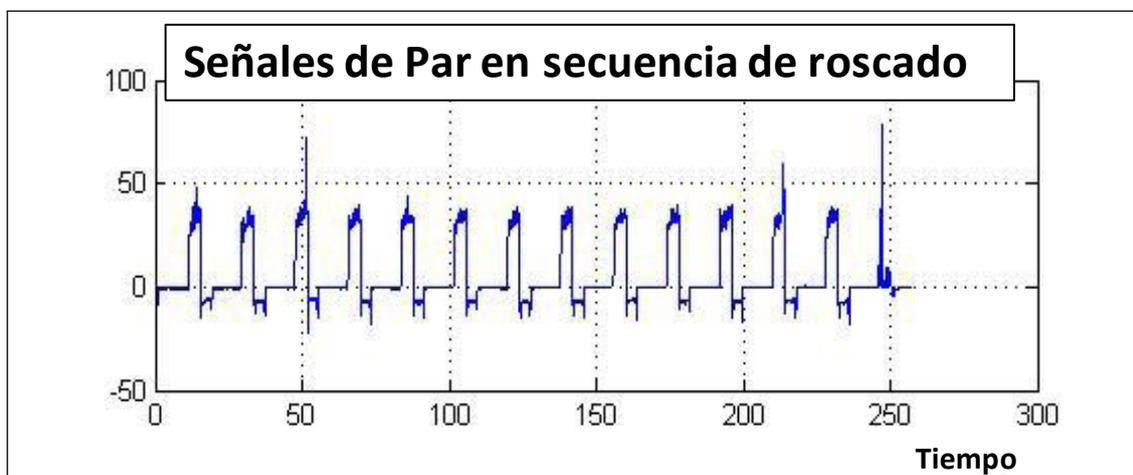


Figura 4.55: Secuencia tipo de señales de par al roscar sucesivos agujeros

A continuación, en la Figura 4.56 se recogen las tres señales de par de roscado más representativas superpuestas, la de la primer agujero, cuando el macho es nuevo y se requiere el menor par, y después las dos últimas señales, en la rosca número 996 con el macho desgastado, pero que aún produce roscas buenas y en la rosca 997 en la que se rompe el macho:

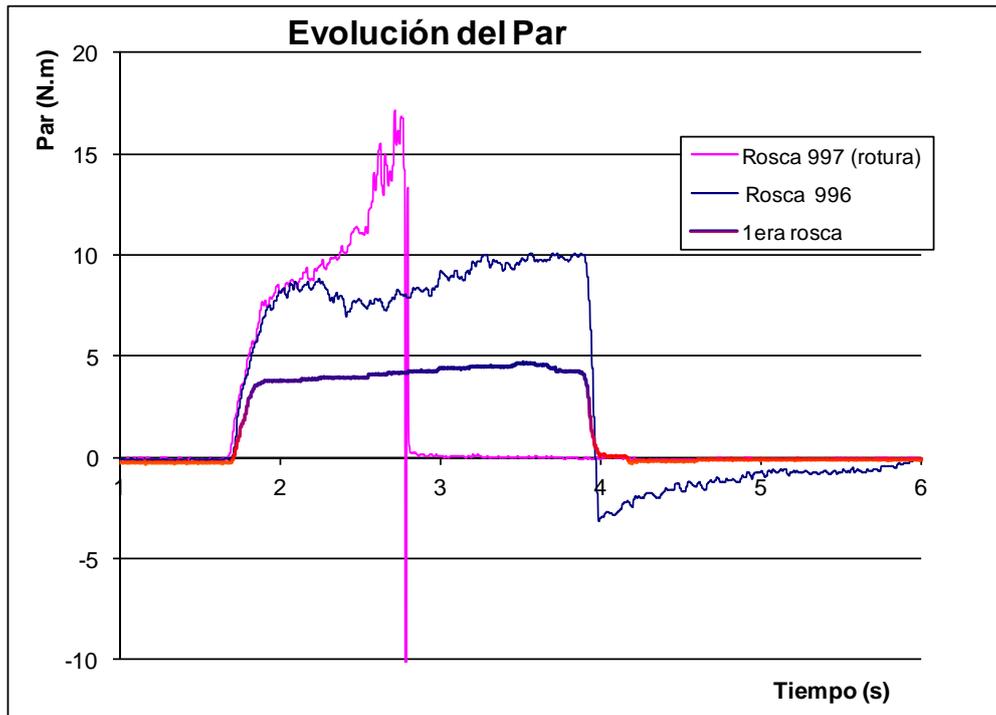


Figura 4.56: Las tres señales de par, en la rosca 1, la 996 y la 997 cuando se rompe el macho

De la rosca 1 a la 996 se ve que la señal tiene valores más altos durante el roscado, y tras la inversión del giro al comienzo de la salida, se produce un pico muy significativo. Esta diferencia de las señales se debe al desgaste del macho. Después en la rosca 997 se aprecia que la señal se dispara hasta un valor superior a 15 Nm, se produce un pico y el macho se rompe. Cabría la posibilidad de anticiparse a la rotura del macho analizando la evolución de la señal del par.

El macho se rompe en la carrera de roscado y parte queda dentro de la pieza.

4.12 ENSAYOS DEL MATERIAL ADI

Se ha dispuesto de material ADI de tres tipos para los ensayos de roscado: ADI-800, ADI-900 y ADI-1000. También se han realizado algunos ensayos sobre acero F-1252 sin tratamiento térmico de temple (42CrMoV) para medir la rigidez y la sincronización en el roscado. El material más empleado entre todas las pruebas ha sido el ADI-900.

El material ADI ha sido suministrado en bloques prismáticos de base cuadrada de 260 x 260 x 110 mm. Del más empleado, el ADI-900 se han fundido siete bloques de la misma colada, por tanto, de la misma composición, y se les ha aplicado el mismo tratamiento térmico de austemperizado.



Figura 4.57: Bloques de material ADI-900 y ADI-1200

4.12.1 La dispersión de la dureza en el ADI

A lo largo de la realización de los ensayos se han obtenido resultados difíciles de explicar salvo que se deban al material, ya que es una fundición heterogénea tratada térmicamente. Se ha medido la dureza de los bloques de ADI, en distintas ocasiones. La dispersión en los valores de la dureza reflejaría la dispersión en las propiedades mecánicas del material. Además, se conocen casos, en otros tipos de mecanización de fundiciones ADI, en los que se produce un endurecimiento superficial debido a que los esfuerzos de mecanización provocan cambios en la microestructura. Para comprobar si se produce este efecto de endurecimiento por el roscado, se ha procedido a realizar varias pruebas.

4.12.2 La medición de la microdureza Vickers

Hay estudios experimentales sobre torneado y fresado de ADI [Bra01], en los que se afirma que al someter la austenita de la microestructura a presión durante el arranque de la viruta se transforma en martensita, de forma que se incrementa considerablemente la dureza y también la dificultad de mecanización. La consecuencia es que tiene un efecto negativo en la vida de la herramienta.

Para comprobar si se produce el efecto de endurecimiento superficial al roscar con macho se miden las microdurezas de la sección de un agujero roscado. En la medición de las microdurezas se emplea un durómetro Vickers LECO LM-100® y también se emplea un microdurómetro Vickers Future Tech F-800®.

4.12.2.1 La medición de la microdureza en el ADI-1000

Se corta por electroerosión una sección de un agujero roscado, se pule y se mide la microdureza en 7 puntos de la sección, próximos y alejados de la rosca. Los puntos del 1 al 6 están próximos a la rosca y el 7 es un punto alejado del área de influencia del roscado, tal como se ve en la Figura 4.59:

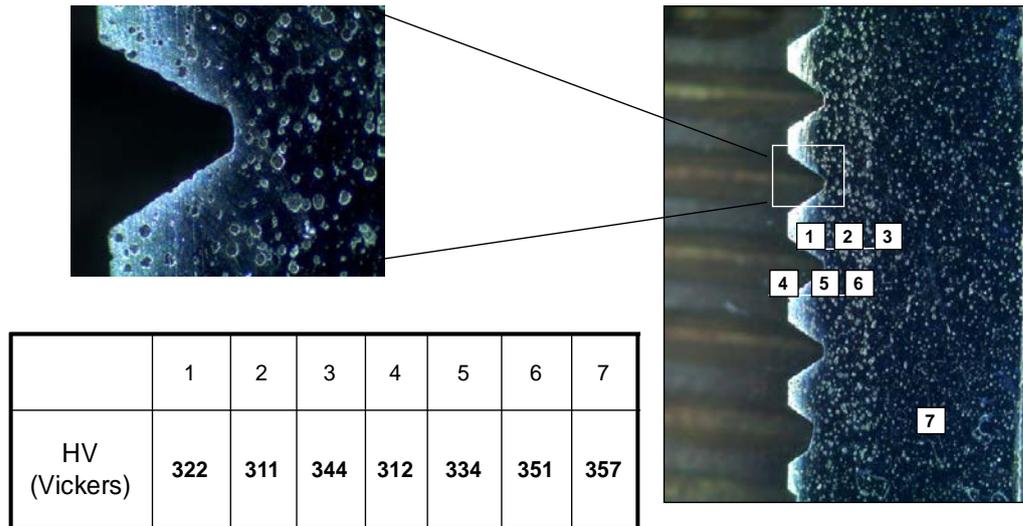


Figura 4.58: Los puntos de toma de microdurezas

No se aprecia ningún efecto de endurecimiento por el roscado. Incluso los resultados pueden mostrar lo contrario, ya que el punto más blando es el más próximo al corte y el más duro el más alejado. La dispersión de las durezas es de un 15%.

4.12.2.2 La medición de la microdureza en el ADI-900

En otro bloque se miden las durezas en una sección para confirmar los resultados obtenidos en el caso anterior. En este caso, la medición se hace en 20 puntos de la zona intermedia entre dos agujeros roscados.

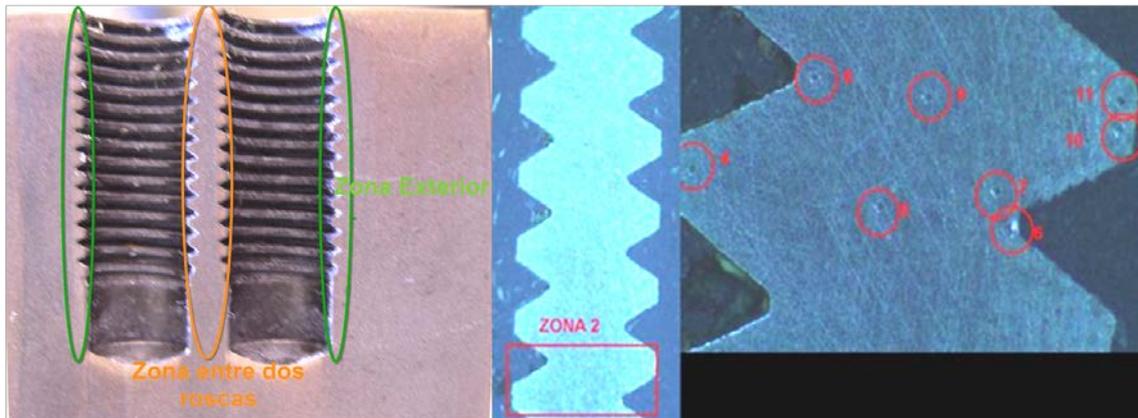


Figura 4.59: Sección, detalle entre dos roscas y puntos en que se miden las microdurezas

En la Figura 4.59 se muestran los puntos próximos a las roscas en los que se toman las microdurezas. Y en la Figura 4.60 se recogen los rangos de las microdurezas clasificados en los puntos próximos a la rosca y en los alejados:

VALORES DE MICRODUREZAS (HV)

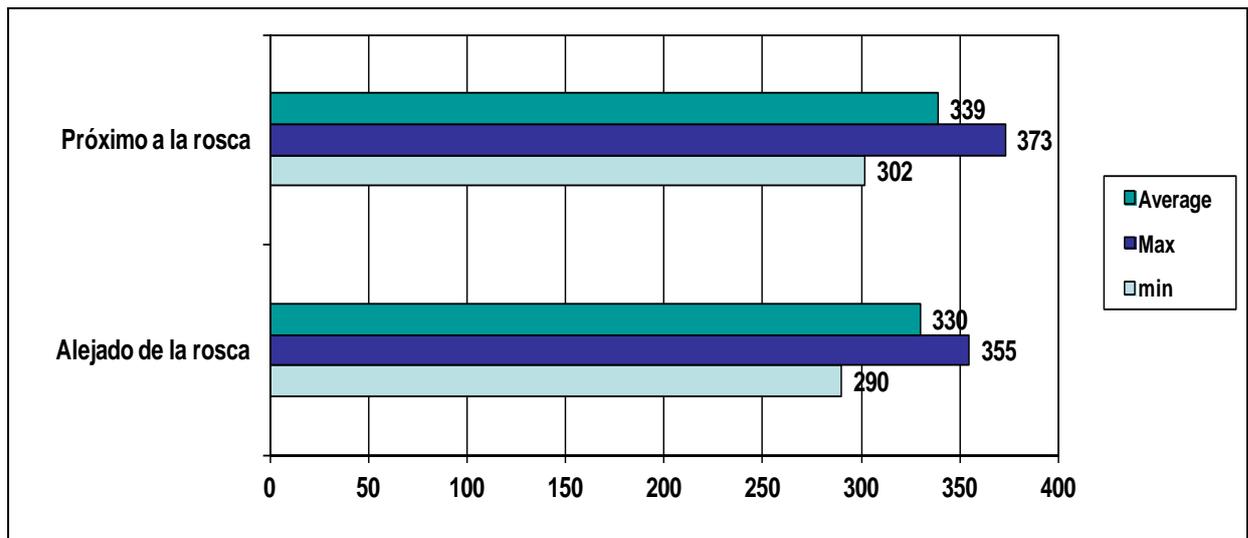


Figura 4.60: Rango de valores de las microdurezas tomadas en 20 puntos

En este caso, se concluye que en los puntos más próximos al agujero roscado, la dureza es mayor que en los puntos más alejados. Ocurre para los valores máximos, mínimos y medios de las zonas próximas al agujero roscado, pero las diferencias son del orden de un 3 a 5%, son poco significativas. No se produce un patrón de endurecimiento debido al roscado con macho. Pero sí se produce una elevada dispersión en los valores de las microdurezas. Los valores de las microdurezas están comprendidos entre 290 y 373 HV. Entre los más bajos y los más altos, independientemente de la zona próxima o alejada de la rosca hay una dispersión de un 29%.

4.12.3 La medición de la dureza Brinell

La medición de la dureza de los bloques de ADI-800, ADI-900 y ADI-1000 se ha realizado con un durómetro Brinell HOYTOM 1003A®. Se han empleado la bola de entalla y los tiempos de formación de la huella correspondientes a los aceros, por la similitud de dureza y ductilidad entre éstos y los ADI empleados. La medición de la entalla se realiza en un microscopio óptico.

4.12.3.1 La medición de la dureza en el ADI-800

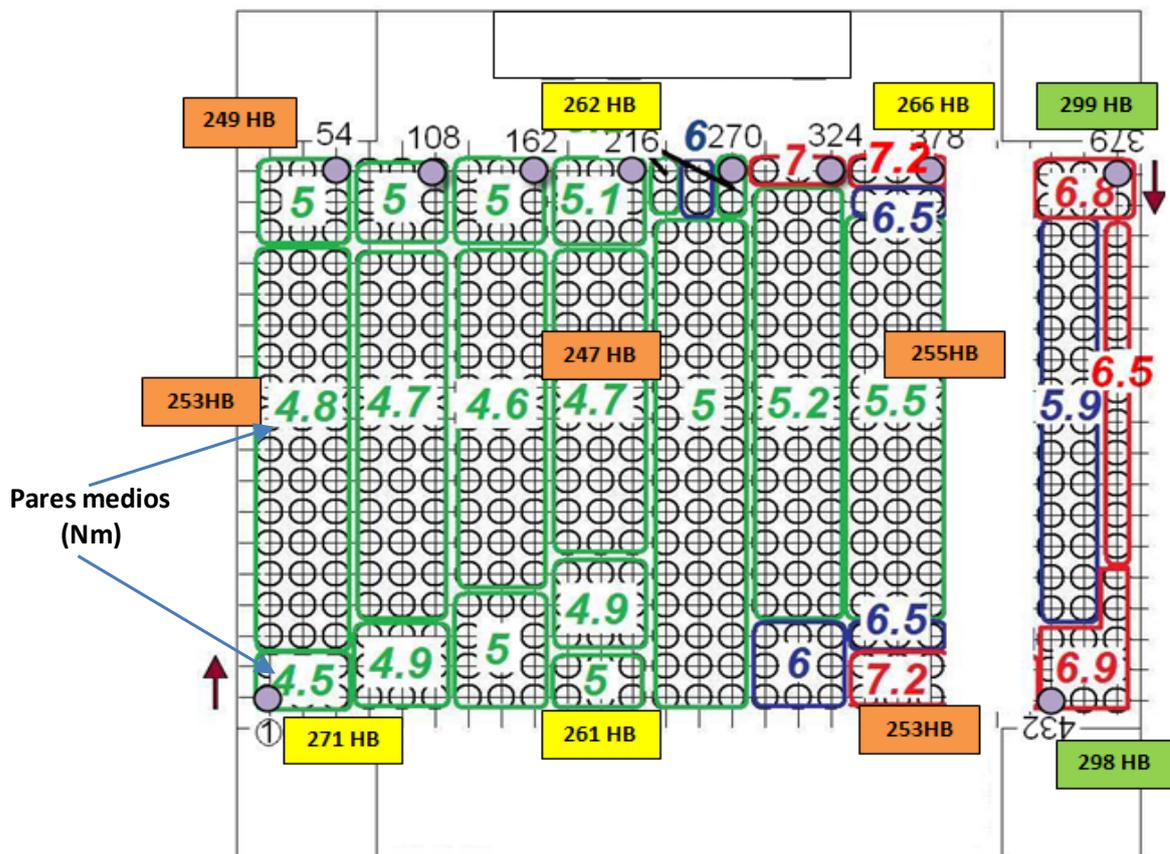
En un bloque de ADI-800 se miden las durezas en 6 puntos y se obtienen los siguientes valores: 263/ 269/ 285/ 285/ 269/ 255 HB. La dispersión es del orden del 12%. Las durezas s/ norma EN-1564 deben de estar en la horquilla 260-320 HB, por lo que la dureza en un punto está por debajo de la de la norma.

4.12.3.2 La medición de la dureza en el ADI-1000

En otros dos bloques de ADI-1000 (para una dureza s/ norma de 300-360 HB) se mide en 6 puntos 285/ 269/ 285/ 285/285/285 HB. Todos los valores están por debajo de la norma y hay poca dispersión en los valores de las durezas, de un 6%.

4.12.3.3 La medición de la dureza en el ADI-900

A lo largo de los ensayos se obtienen valores del par de roscado medio dispersos y poco consistentes sin que haya una explicación aparente, por lo que se mide la dureza en tres secciones de dos bloques. De cada sección se mide la dureza en 30 puntos, en total en unos 90 puntos. En el caso de la Figura 4.61, se recogen los valores de las durezas y del par medio de roscado de la sección intermedia de un de los bloques. Los valores de dureza se agrupan en 9 valores medios. Los del par medio de roscado están comprendidos entre 4,5 Nm en el primer agujero y 7,2 Nm en el agujero número 432. Los valores más bajos del par medio se encuentran en la parte central de la sección, y los más altos en las partes inferior y superior de la sección representada. El par medio, en principio no debería de ser función más que del desgaste del macho de roscar, y por lo tanto debería ir aumentando con el número del agujero roscado. El orden de realización de las roscas es de abajo a arriba, en zigzag, y de izquierda a derecha, se indican las roscas nº 1, 54, 108, 162, , 378, la 379 y la 432.



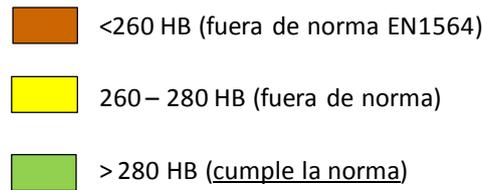


Figura 4.61: Durezas y pares medios de 432 agujeros roscados

En la sección representada los valores de la dureza medidos están comprendidos entre 247 y 299 HB, por lo que la dispersión es del 21%. Y es destacable que la mayor parte de los valores de dureza están por debajo de lo exigido por la norma EN-1564 correspondiente al ADI-900 (280-340 HB), tal como se muestra en la Figura 4.62:

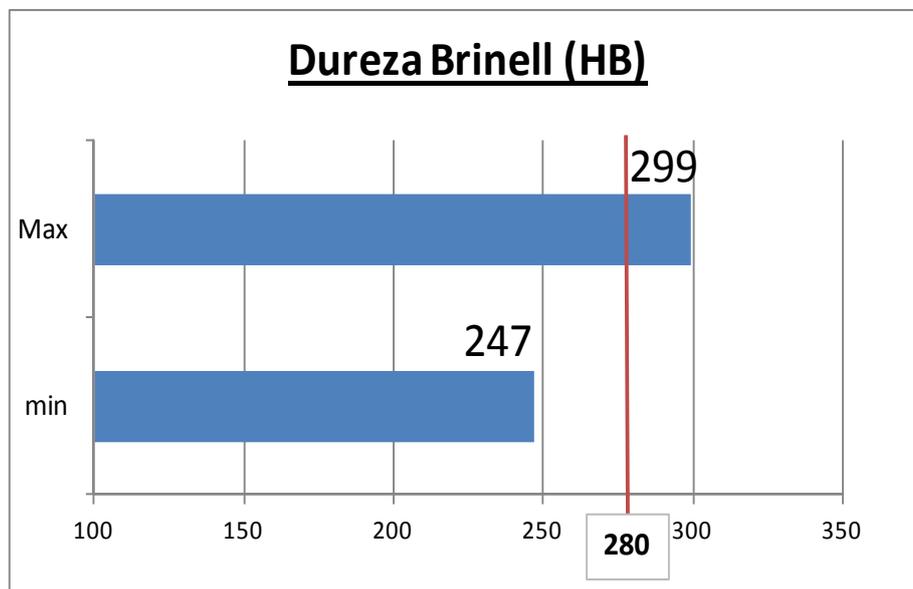


Figura 4.62: Rango de durezas y valor mínimo de la norma EN-1564 para el ADI-900 (280 HB)

4.12.3.4 Conclusión al estudio de las durezas

Se concluye que en las muestras de ADI empleadas, que han correspondido a dos proveedores diferentes y a tres grados distintos, hay una dispersión de dureza elevada que llega casi al 30% en alguno de los casos, y que la dureza está en la mayoría de los puntos medidos, por debajo de los valores de la norma. Por lo que surgen dudas razonables sobre la calidad del ADI empleado, y se procede a estudiar la microestructura en algunos casos.

4.12.4 Análisis de la microestructura del ADI-900

Se toman imágenes en un microscopio óptico Nikon OPTIPHOT-100®, de dos muestras de ADI-900. Son ampliadas x10 y x100, con las que se pretende comprobar si la microestructura se corresponde con la estándar de los ADI.

Se toman en dos zonas A y B de un bloque de ADI-900, en las que los valores de la dureza han sido las máximas (290 HB) y las mínimas medidas (230 HB) respectivamente. Las zonas de las que se toman las muestras y las microestructuras se recogen en la Figura 4.63:

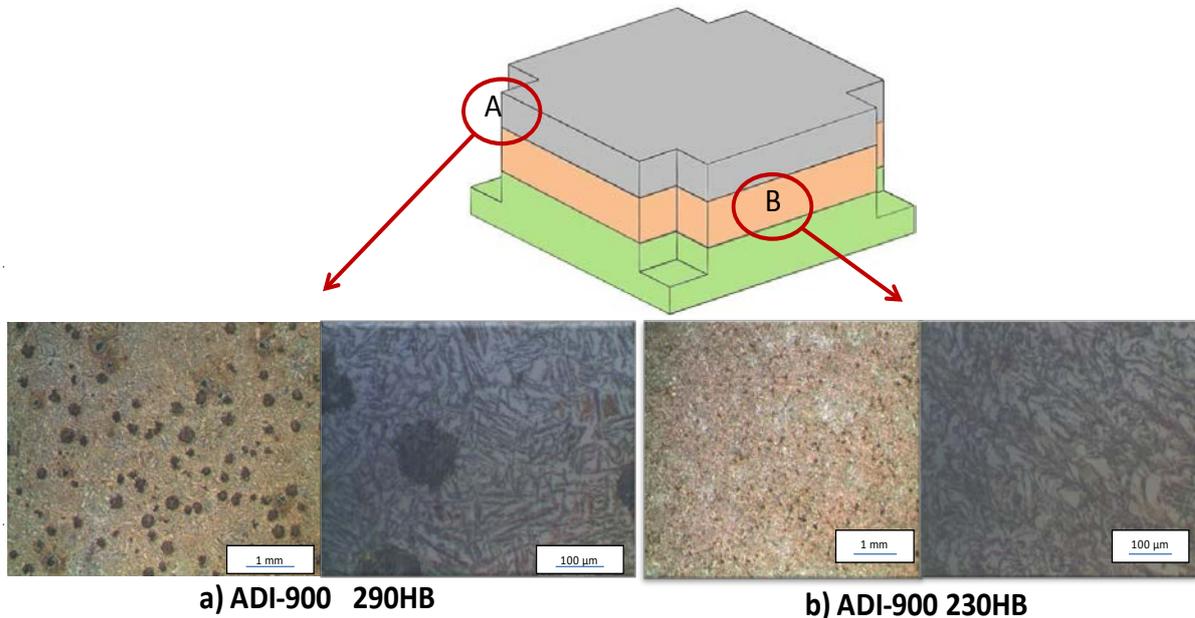


Figura 4.63: Microestructura de ADI en, a) se aprecian los nódulos de grafito y la ferrita filiforme con la austenita. En b) la microestructura no se corresponde con la de los ADI.

En el punto B, el valor de la dureza 230 HB está muy por debajo de la norma casi en un 20 % (280-340 HB). En la imagen al microscopio no se reconoce la microestructura de los ADI. En cambio, en el punto A en una esquina del bloque la dureza alcanza los 290 HB, está dentro de la norma, y la microestructura es la típica de los ADI, con los núcleos de grafito esferoidal distribuidos y la microestructura de ferrita acicular y austenita retenida.

Puestos en contacto con el proveedor de ADI, la explicación a la dispersión de las durezas que da es que se debe al modo de producción. En la fase “as cast”, antes de realizar el tratamiento de austemperización del bloque, la fundición se vierte a través de un orificio situado en la parte superior del molde. La velocidad de enfriamiento de la fundición en las esquinas del bloque, alejadas del punto de alimentación de la fundición es mucho mayor que la de la zona central, por la que pasa todo el hierro fundido caliente. También la velocidad de enfriamiento de la parte inferior del molde y de la superior son distintas. La velocidad de enfriamiento de cada punto puede ser el origen de la dispersión de las durezas y de las características mecánicas. El posterior tratamiento térmico de austenización y temple pueden modificar algo la microestructura, pero la formación de los nódulos de grafito, su número y tamaño están determinados por la fase “as cast”, y el vertido en el molde, que posteriormente favorecerán la austenización. En la Figura 4.64

se muestran los dos puntos A y B, alejado de la zona de alimentación de la fundición al molde y próximo, respectivamente:

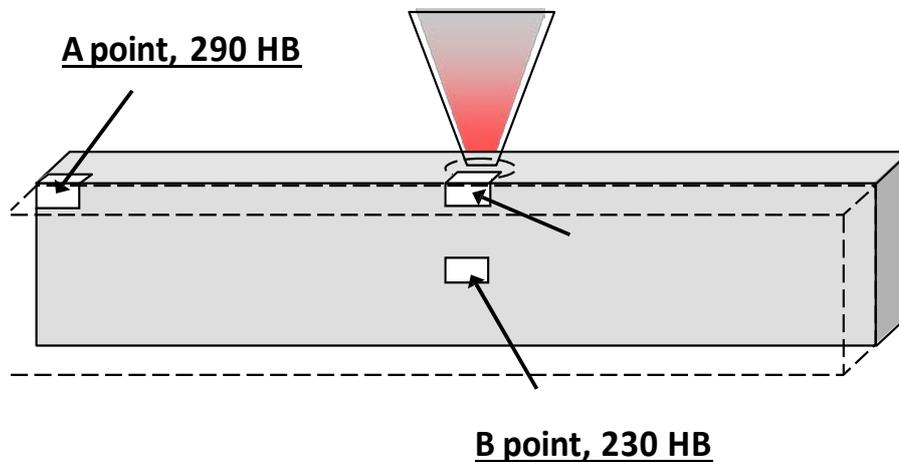


Figura 4.64: Puntos representativos de dónde se miden las durezas

4.12.5 Conclusiones al análisis del material ADI-900

Se concluye que hay una falta de homogeneidad clara en el material debido a las dificultades que se dan en su producción. El origen está en la microestructura, en su formación inicial y en el tratamiento térmico posterior. La dispersión de los valores de la dureza puede oscilar entre un 10 y un 30% dentro de la misma pieza. La mayor o menor dispersión se ha repetido en los tres grados de ADI empleados. Hay que mencionar que los tres tipos proceden de dos proveedores distintos, y por tanto la dificultad para obtener una pieza de ADI con una estructura homogénea y según norma en dureza en todos sus puntos, no es achacable a un proveedor, parece corresponder al material.

También es destacable que en dos de los tres grados, en el ADI-900 y el ADI-1000, ha habido dificultades y no se han obtenido los valores de dureza y la microestructura que corresponden a los ADI en toda la pieza.

4.13 ENSAYO INDUSTRIAL DE ROSCADO DE ADI-1000 EN GAMESA

En un momento dado, la firma industrial eólica Gamesa® requiere realizar unas pruebas de roscado sobre ADI-1000 del mismo proveedor que nos ha suministrado las piezas empleadas, y con machos recubiertos por el mismo recubridor Metal Estalki Platit® que el de las pruebas, pero en piezas de dimensiones mucho mayores y lo requieren para solucionar un problema de roscado que les supone un gran engorro logístico.

4.13.1 Pruebas en Gamesa

Gamesa requiere roscar un porta-satélites de su gama de aerogeneradores de 5Mw. Es una pieza de $\phi 1700$ mm de material ADI-1000, del mismo proveedor. Se quiere realizar el mayor número de agujeros roscados de M52x90 mm de profundidad de los 45 agujeros que tiene la pieza porque tienen dificultades y no consiguen que un solo macho produzca todas las roscas. La operación se lleva a cabo en las instalaciones de Gamesa en Asteasu (Guipúzcoa), en una fresadora Pietro Carnagui®.

En la Figura 4.65 se muestran los machos de roscar ensayados de M52 y M8, y un bolígrafo, para comparar sus dimensiones:



Figura 4.65: Muestra de los machos de roscar ensayados, de M52 y M8

El macho y el recubrimiento los suministran las mismas empresas colaboradoras del presente trabajo, UFS® y Metal Estalki®, respectivamente. Se preparan dos machos iguales, a los que se incorporan las mejoras de pretratamientos, recubrimiento AlTiSiN-G y post recubrimiento definidos en el capítulo de preparaciones superficiales. Se pone especial atención en que la adhesión del recubrimiento sea de calidad y en evitar las gotitas de recubrimiento o “droplets”. Los machos son de acero rápido HSSE, de 5 dientes por vuelta y 5 canales de salida de viruta, con una hélice de 15°. Los dientes de chaflán son 4 - 5 dientes, hasta alcanzar el diámetro nominal. El macho viene con taladro interno axial para refrigeración y evacuación de la viruta.

Previo al roscado se taladran los agujeros a $\phi 47 \times 98$ mm, con plaquitas sobre un mandrino que se sustituyen en varias ocasiones. Se comprueba el diámetro de los agujeros taladrados con un micrómetro, están en tolerancia y se procede a roscar en rígido con los machos suministrados. El roscado se realiza a 35 rpm, esto es una velocidad de corte de 5,7 m/min, muy reducida. Se aplica refrigeración por taladrina interna y externa. No se emplea ningún acoplamiento con dispositivo de compensación axial. En esta prueba se dispone de la señal de potencia en la pantalla de la fresadora.

El macho 1, hace 22 roscas. En la pantalla de la fresadora se monitoriza la potencia consumida en cada instante. La potencia en régimen oscila entre un 30-32% en los primeros agujeros y un 37-40% en los últimos. Se producen picos de potencia máxima de entre un 50 y un 70%. Se decide parar la prueba porque el ruido al roscar es muy elevado y la potencia alta.

El macho 2, hace 12 roscas. La potencia en régimen inicial es más alta y pasa de un 35-45% de las primeras roscas a 40-100% en las últimas, con picos que exigen la máxima potencia a la máquina. En la Figura 4.66 se recoge el número de roscas a vida de los dos machos ensayados en Gamesa:

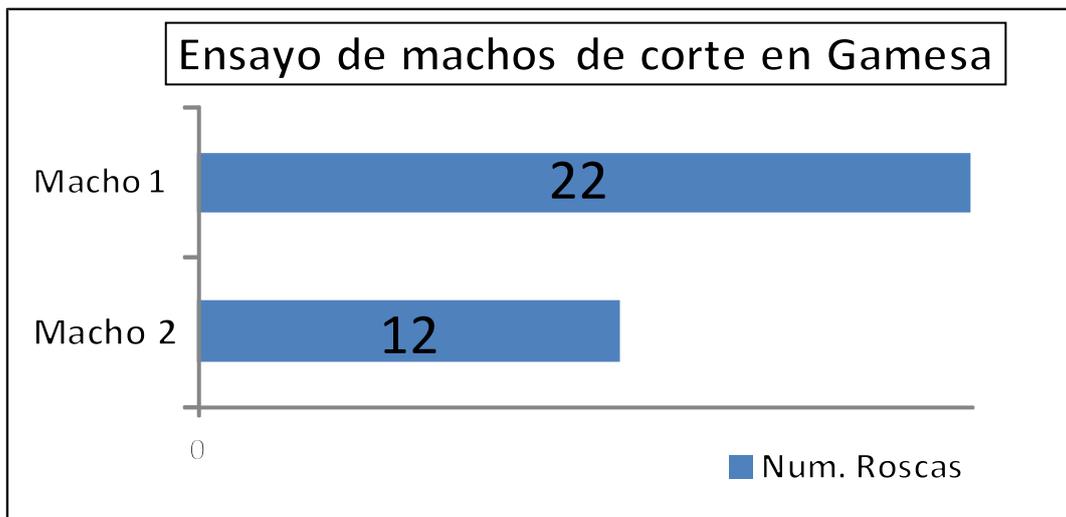


Figura 4.66: Número de roscas realizadas en la prueba en Gamesa

En ambos casos, por precaución debido al repentino aumento de la potencia y del ruido de corte se decide parar la prueba. No se pueden arriesgar a que se rompa un macho y dañe la pieza de tanto valor. El macho 2 llega a pararse en el agujero y hay que sacarlo a mano.

Analizados los dos machos están en buen estado. Como se puede apreciar en la Figura 4.67 del detalle del desgaste, los filos de las caras de desprendimiento han perdido el recubrimiento, pero no se aprecia ningún defecto de desconchado, o diente dañado. Las caras de incidencia de la parte chaflán están brillantes por la pérdida de la capa de recubrimiento y la fricción entre el macho y el ADI.

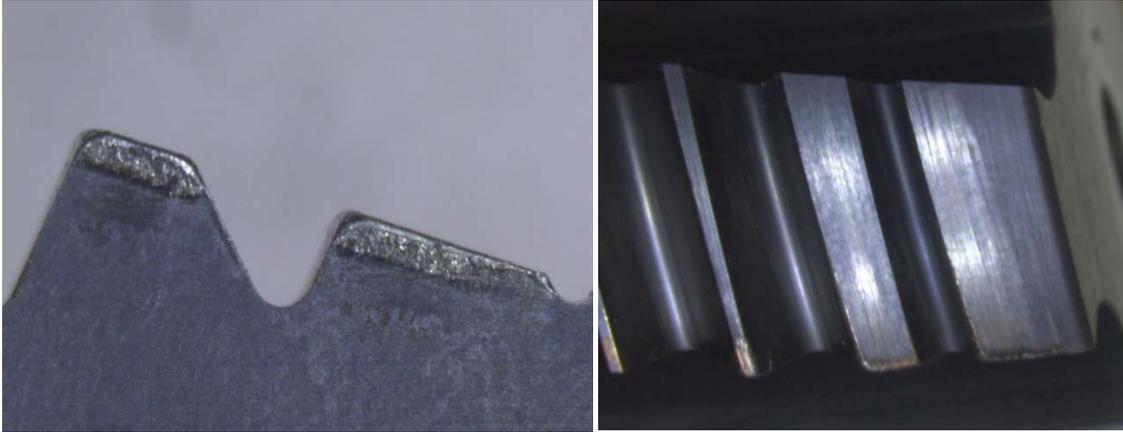


Figura 4.67: Detalle del desgaste en la cara de desprendimiento y el brillo en la cara de incidencia

4.13.2 Conclusiones a la prueba industrial:

El macho 2 desde el primer agujero que rosca requiere más potencia, por lo que la diferencia parece ser debida al material, al ADI-1000, a que haya diferencia de dureza de una zona a otra que exige más potencia. La explicación más razonable y admitida por los asistentes a la prueba, parece ser la de la falta de homogeneidad. Como consecuencia de la diferencia de dureza se produciría también la diferencia en la vida de los dos machos, el primer macho en una zona de la pieza más favorable realiza 22 roscas y el segundo en una zona de mayor dificultad 12 roscas.

Los filos y las caras de desprendimiento, en principio, están bien, no tienen ningún desgaste significativo, no así las caras de incidencia de los dientes de la parte del chaflán que aparecen brillantes. Han sufrido la pérdida del recubrimiento y se ha producido una elevada fricción con el material del agujero. El brillo y el desgaste parecen ser efecto de la adhesión del ADI.

Algunas modificaciones que se podrían introducir para mejorar el comportamiento de los machos, pero no se llegan a realizar porque Gamesa no está interesada en repetir las pruebas y perder el tiempo de una instalación cara en pruebas cuyo resultado aún está lejos del objetivo que se pretendía, serían:

Reducir el contacto en la superficie de las caras de incidencia entre los dientes y el agujero previo, aumentando el número de los dientes y de los canales por vuelta, en lugar de 5, que fueran 6 o 7, para aumentar los filos de corte por vuelta. También se podría reducir la superficie de contacto de la cara de incidencia aumentando el ángulo de alivio.

Se podría cuestionar si los agujeros taladrados con un mandrino y plaquitas en un material heterogéneo como el ADI, de durezas cambiantes produce agujeros totalmente cilíndricos. Aunque el diámetro de los agujeros taladrados esté en tolerancia en varios

puntos, se puede producir una posible falta de cilindridad y que haya sido una dificultad adicional para el roscado con macho.

La velocidad de corte, 5,7 m/mm ha sido especialmente baja y puede haber facilitado el fenómeno de adhesión del ADI sobre la cara de incidencia de los machos.

CAPÍTULO 5

5. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

5.1 EL MACHO DE ROSCAR. CONCLUSIONES

1. El macho para roscar agujeros ciegos de M8 de 25 mm de longitud sobre ADI-900, más adecuado ha sido el de 4 canales rectos de 3 dientes de punta, con ángulo de chaflán de $15^{\circ} 30'$. Los ángulos de los dientes de 0° y la distancia de alivio ("chamfer relief") de 0,11 mm.
2. El radio de filo de los dientes que mejor resultado aparente ofrece es el correspondiente a $22\mu\text{m}$, con el tratamiento superficial previo a recubrir de microchorreado 4,5MPa y 7.5s. por micro granallado de bolitas de vidrio de $\text{Ø}70\mu\text{m}$. Después del recubrimiento se realiza un post-tratamiento de pulido orbital (drag grinding) a baja presión de 0,2 MPa con cáscara de nuez.
3. El efecto de las preparaciones superficiales, previas y posteriores a aplicar el recubrimiento es beneficioso, pero no parece una mejora muy llamativa.
4. El recubrimiento AlTiSiN-G es con el que mejores resultados se han obtenido. Con el de TiAlCN-CBC también se obtiene un buen rendimiento.
5. El mecanismo de desgaste predominante de los machos de roscar recubiertos es el de adhesión de la viruta de ADI, que se pega y recrece hasta tener un volumen excesivo y se libera, y desprende tanto la viruta y como parte del recubrimiento.
6. No se aprecian líneas de desgaste de tipo abrasivo en la dirección del paso de la viruta por la superficie de los filos.
7. Los valores del par medio del roscado obtenidos han sido directamente proporcionales a los menores o a los mayores desgastes de los machos. El par medio es un parámetro de medición del desgaste VB, corroborado con el análisis de imágenes al microscopio óptico y al electrónico. Con la ventaja de que la obtención de la señal de par con el sistema de medición rotor-estator se realiza en el tiempo real de producción de la rosca.

5.2 LA FRESADORA

5.2.1 Conclusión al estudio de la rigidez en Z y de la sincronización

1. Las pruebas se han realizado sobre una fresadora Kondia A6® equipada con un CNC Fagor-8070® y afectan al roscado rígido con la instrucción G63.

2. Se produce un esfuerzo de tracción durante toda la carrera de roscado. La explicación es que el macho se retrasa respecto al paso de la herramienta, avanza menos y el macho tira.
3. El esfuerzo de tracción que sufre el macho a una velocidad de corte $V_c=2\text{m/min}$ (80rpm en M8 es especialmente baja), es del orden 40 veces mayor en el caso de roscado rígido que en el caso de emplear un dispositivo de compensación axial (Artis Softsynchro®). Por tanto, es un efecto que el sistema de compensación axial minimiza.
4. La falta de sincronización entre el cabezal y el paso del macho se reduce falseando el avance, aumentándolo.
5. El error de sincronización aumenta con la velocidad. Roscando a más velocidad $V_c=10\text{m/min}$ se producen mayores errores, que a una velocidad inferior de $V_c=1\text{m/min}$.
6. También influye el material y la geometría de los machos. En condiciones de máquina iguales, y loa machoa con hélice los esfuerzos en Z y de par son mayores con un material como el ADI-900, de mayor resistencia y de menor ductilidad que con uno más dúctil, que con el F-1252. Con el ADI se produce la rotura de los machos, mientras que con el F-1252 se producen roscas no válidas (por la deformación de los hilos).
7. Muestra de la falta de sincronización es que los mayores esfuerzos a los que se ve sometido el macho es en las proximidades del punto muerto inferior y al comenzar la inversión (7000N) y no durante la fase de roscado (200N). Recogido en el ensayo de roscado de ADI a $V_c=10\text{ m/min}$. También durante el roscado el esfuerzo es de tracción y en las proximidades del punto inferior los esfuerzos pasan a ser de compresión, que además no desaparecen y se mantienen durante la salida del macho.
8. En el caso estudiado de la Kondia A6® con CNC Fagor-8070®, las señales son iguales con las instrucciones de roscado G63 y G84, cuando una debería de ser en lazo cerrado y la otra en lazo abierto. Puede deberse a un problema del CNC de la máquina.

5.2.2 Conclusiones al estudio cinemático de las fresadoras

1. La fresadora en principio más rápida, la Ibarria, con electro mandrino y motor de hasta 18.000 rpm tiene un CNC con el que opera de manera más conservadora, en las condiciones expuestas, en el roscado acelera 4,6 veces más lenta que la Kondia, y no alcanza las velocidades de operación asignadas. El posicionamiento

del macho de roscar al agujero y el comienzo de la operación de roscado es más conservador. Después de posicionarse arranca el giro.

2. Este conjunto de operaciones es beneficioso para el roscado y la vida de los machos. Un macho roscando ADI-900 alcanza a vida 996 roscas antes de romperse y la evolución del par medio de roscado es lineal. Para la vida de los machos es mejor.
3. También hay que destacar la gran dispersión en la duración a vida de los dos machos en esta fresadora, uno realiza 648 roscas y el otro 381 hasta romperse, a pesar de que las condiciones deberían de ser iguales por tratarse de la misma máquina, los machos y las condiciones, en principio iguales.
4. El uso de acoplamientos intermedios de compensación axial es favorable desde el punto de vista de la calidad de las roscas. Puede parecer que son elementos que corrigen errores de funcionamiento y considerarse que son negativos por enmascarar la idealización de producir con cero defectos, pero la realidad es que por la geometría de los agujeros, por las dificultades que ofrecen los materiales o por la falta de sincronización y de precisión de las fresadoras hoy día son aconsejables para la producción de elevados volúmenes de roscas y para elevar la calidad de producción de los agujeros roscados.

5.3 LAS FUNDICIONES ADI. CONCLUSIONES

1. No se aprecia ningún efecto de endurecimiento por el roscado. Incluso los resultados pueden mostrar lo contrario, ya que el punto más blando es el más próximo al corte y el más duro el más alejado.
2. La dispersión de las durezas muestra una falta de homogeneidad clara en el material que parece ser debida a las dificultades de producción. El origen está en la microestructura los ADI, en su formación inicial y en el tratamiento térmico posterior. La dispersión de los valores de la dureza ha oscilado entre un 10 y un 30 % dentro de la misma pieza.
3. La dispersión de las durezas se ha repetido en los tres grados de ADI empleados. Los tres tipos proceden de dos proveedores distintos.
4. En dos de los tres grados, en el ADI-900 y el ADI-1000, ha habido dificultades y no se han obtenido los valores de dureza y la microestructura que corresponden a los ADI, según norma.
5. La dificultad para obtener una pieza de ADI con una microestructura más o menos homogénea y que las durezas cumplan los valores de la norma en la mayoría de

los puntos no es achacable a un proveedor y parece corresponder al propio material.

5.4 LA PRUEBA INDUSTRIAL. CONCLUSIONES

Al roscar con dos machos iguales sobre la misma pieza, el segundo requiere desde el primer agujero más potencia, diferencia que parece ser debida al material, al ADI-1000, a que haya diferencia de dureza de una zona a otra. La explicación más razonable parece ser la de la falta de homogeneidad de las fundiciones (quizá en velocidad de enfriamiento, o del tratamiento térmico,). Como consecuencia de la diferencia de dureza se produciría también la diferencia en la vida de los dos machos, el primer macho, en una zona de la pieza más favorable, realiza 22 roscas y el segundo en una de mayor dificultad 12 roscas.

CAPÍTULO 6

6. APORTACIONES Y LÍNEAS FUTURAS

6.1 APORTACIONES

1. Se ha propuesto un método en el que se expone un conjunto de factores que intervienen en la operación de roscado, la geometría y el recubrimiento de los machos adecuados al material, las preparaciones superficiales, el montaje de herramienta, la cinemática de la fresadora, la sincronización, etc y no solo puntos aislados. Un conjunto de puntos que hay que tener en cuenta si se quiere roscar con éxito y a elevada productividad en otras condiciones.
2. El material a roscar condiciona la geometría de los machos y el recubrimiento más adecuado, pero no se pueden olvidar el tipo de viruta, las características del agujero (ciego o pasante), la velocidad de operación, .
3. Las características de operación de la máquina son fundamentales para que el proceso sea consistente y las roscas de calidad. La secuencia de posicionamiento, aceleraciones, frenado, la transmisión de los esfuerzos, más que automática se debe de adecuar al proceso de intervención humana, produciendo movimientos en vacío,
4. En la operación de roscado por las dificultades del proceso, resulta más importante la seguridad de operación y la consistencia, que la rapidez de las secuencias. Una de las fresadoras he resultado más idónea que la otra, aunque su velocidad de operación fuera más lenta, también intervienen las aceleraciones.
5. Se ha empleado la señal de medición del par obtenida a través de un sistema (basado en un sistema rotor-estator) mínimamente invasivo en la máquina como es el Softsyncho® de Emuge con el que se monitoriza en tiempo real y de manera fiable la evolución del desgaste del macho de roscar.
6. El material ADI se ha comportado con especial heterogeneidad y ha ofrecido dificultades añadidas a un proceso especialmente difícil. La falta de homogeneidad se ha producido no sólo con grados de ADI diferentes sino también con proveedores, por lo que se trata de una característica inherente al propio material, al proceso metalúrgico, a su microestructura y al tratamiento térmico. Se han dado variaciones de la dureza de un 30% dentro de una misma pieza e incluso se ha observado que no se obtenía la microestructura de ADI en algunas partes de la pieza.
7. Se ha obtenido un macho adecuado para roscar ADI-900, en geometría, de dientes de chaflán, ranuras rectas, ángulos y zonas de alivio y el recubrimiento AlTiSiN-G. También en las preparaciones superficiales y microgeometría (se ha definido

el radio de filo más adecuado) se ha dado un paso positivo en la definición del mejor macho de corte.

8. Actualmente parece casi imprescindible el empleo de elementos de asistencia al roscado que admitan ciertas discrepancias axiales y discernen entre la transmisión del par, con el que se arranca el material, y el esfuerzo axial que tiene el inconveniente de que puede dañar las roscas y es innecesario para sacar el macho del agujero roscado.
9. Se ha trabajado conjuntamente con los fabricantes de los machos, de los recubrimientos, y con el proveedor de las fundiciones ADI, por lo que los ensayos han sido beneficiosos en la adquisición de conocimiento de estas empresas, pero no se ha logrado colaborar con el fabricante de la fresadora analizada, ni con el del CNC.

6.2 LINEAS FUTURAS

1. El estudio del roscado ha de tener cada vez más factores en cuenta, debe de ser más completo. Además de adecuar la geometría y el recubrimiento del macho de roscar al material y al tipo de agujero, las características del material a roscar, en este caso una fundición de hierro especialmente difícil, el tipo de agujero y las propiedades de la máquina en la que se rosca, la velocidad de roscado, etc.
2. El modo de trabajo de las máquinas fresadoras en las que se rosca, tienen que parecerse al proceso de roscado manual, o inteligente, en el que se complementen una secuencia ordenada y rigurosa como el que ofrece la máquina, con una secuencia de operaciones adaptadas a las dificultades que ofrece cada uno de los pasos de operación. Teniendo en cuenta que la transmisión del par es más importante que la del esfuerzo axial, salvo al comienzo del roscado y que la salida se debe de realizar casi en vacío para no dañar las roscas producidas.
3. El uso de elementos de asistencia al roscado, y de seguridad del tipo de los dispositivos de compensación axial, el roscado con vibraciones torsionales, o con actuación neumática todavía tienen mucho que aportar, para fiabilizar la operación de roscado cuando se trate de elevados volúmenes de roscas.
4. En el roscado de las fundiciones ADI, se podría ensayar algún tipo de lubricante más específico que minimizara el desgaste por adhesión.
5. Respecto de las preparaciones superficiales y la microgeometría del radio de filo introducidos, los ensayos han mostrado que las mejoras iban en la dirección adecuada, pero habría que seguir probando más casos.

CAPÍTULO 7

7. REFERENCIAS

[Walter Prototyp®] <http://www.walter-tools.com> (Accesoo 2014)

[Fer15] Fernández Landeta J., Fernández Valdivielso A., Girot F., López de Lacalle L.N., “High performance form tapping of cold forging steel” *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol.137, Issue 3 (2015)

[Emuge®] <http://www.emuge.com>

[Klo07] Klocke F., Klöpper C., Lung D., & Essig C. “Fundamental wear mechanisms when machining austempered ductile iron (ADI)”. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 56(1), 73–76. <http://doi.org/10.1016/j.cirp.2007.05.020>, (2007).

[Sah10] Sahin Y., Kilicli V., Ozer M., Erdagon M., “Comparison of abrasive wear behavior of ductile iron with different dual matrix structures”. *Wear*, (2010) 268:153–165.

[Bar15] Barbosa P. A., Costa E. S., Guesser W. L., & Machado A. R. “Comparative study of the machinability of austempered and pearlitic ductile irons in drilling process”. *Journal of Brazilian Society of Mechanical Science Engineering*, 37, (2015). p. 115–122.

[ADI Treatmets®] <http://www.aditreatments.com> (2017)

[Doy74] Doyle E.D., Dean S.K., “Effect of axial forces on dimensional accuracy during tapping” *International Journal of Machine Tool Design and Research*, Pergamon press, (1974) Vol.14,p. 325-333.

[Lor80] Lorenz G. “On tapping torque and tap geometry” *Division of manufacturing technology, Annals of CIRP*, (1980) CSIRO, Melbourne, Australia, p. 1-4.

[Pat87] Patil S.S., Pande S.S. and Somasundaram S., “Some investigations of vibratoty tapping process”, *International Journal of Machine tools & Manufacturing*, Vol. 27 (3) (1987), p. 343-350.

[DeY98] De-Yuan Zhang and Ding Chang Chen, (1998), “Relief face friction in vibration tapping”, *International Journal of Mechanical sciences*, 40, (12), (1998), p. 1209-1222.

[Arm01] Armarego E. J. A. and Chen M. N. P., “ Predictive cutting models for the forces and torque in machine tapping with straight flute taps”, *Department of Mechanical Engineering, University of Melbourne, Australia*, (2001).

[Ahn02] Ahn J.H., Lee D.J., Kim S.H., Kim H.Y. and Cha K.K., “Effects of synchronizing error son cutting performance in the ultra high speed tapping”, *School of Mechanical Engeneering, Pusan National University and ERC-NSDM, Pusan, Korea*, (2002).

[Ten02] Tengyun C. and Sutherland J.W., “Investigation of the thread tapping load characteristics through mechanistic modeling and experimentation”, *International Journal of Machine tools & Manufacturing*, Vol. 42 (14), (2002), p. 1527-1538.

[Mez02] Mezentsev O.A., Zhu R., De Vor R.E., Kapoor S.G. and Klein W.A., “ Use of radial forces for fault detection in tapping”, *International Journal of Machine tools & Manufacturing*, Vol. 42, Issue 4, (2002), p. 479-488.

[Li03] W.Li, D. Li and J. Ni, “Diagnosis of tapping process using spindle motor current” *International Journal of Machine tools & Manufacturing*, Vol. 43, Issue 1, (2003), 73-79.

[Zha03] Zhang B., Yang F. and Wang J., (2003), “Fundamental aspects in vibration assisted tapping”, *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 132, Issue 1-3, (2003), p. 245-352.

[Ada05] Adams J.D., Manning L., Rogers B., Jones M., and Minne S.C., “Self sensing mode atomic forces microscopy” *Sensors and Actuators*, Vol. 121, (2005), p. 262-266.

[Kuo07] Kuo K.L., “Experimental investigation of ultrasonic vibration assisted tapping”, *Journal of Material Processing Technology*, (2007), Vol. 192-193, p. 306-311.

[Fro10] Fromentin G., Bierla A., Minfray C., and Pouchalon G., “An experimental study on the effects of lubrication in form tapping” *Tribology International, Teratology International*, Vol 43, Issue 9, (2010), p. 1726-1734.

[Har12] Hardik J. P., Bhaveshkuamr P.P. and Patel S.M., “A Review of Threading tapping operation and parametric study” *International Journal of Engineering Research and Applications*. Vol. 2, Issue 3, (2012), p.109-113.

[Gil13] Gil Del Val A., Fernández J., Arizmendi M., Veiga F., Urizar J.L., Berriozábal A., Axpe A., Diéguez P.M., “On line Diagnosis Strategy of Thread Quality in tapping”. *Proceedings of the 5th Manufacturing Engineering Society International Conference-Zaragoza-2013*

[Gil15] Gil-Del-Va, A., Diéguez P.M., Arizmendi M., Estrems M. “Experimental study of tapping wear mechanism on nodular cast iron” *The Manufacturing Engineering Society International Conference, MESIC 2015. Procedia Engineering* 132, (2015) p. 190-196.

[Dog02] Dogra A.P., Kapoor S.G., DeVor R. “Mechanistic Model for tapping Process with Emphasis on Process Fault and Hole Geometry” *Master’s thesis (1999) University of Illinois at Urbana-Champaign*.

[Che90] Chen Y.B., Sha J.L., Wu S.M. “Diagnosis of tapping process by information measure and probability voting approach”. *Journal of Engineering for Industry*, 112 (1990), p. 319-325.

[Liu91] Liu T., Ko E.J., Sha S.L. “Diagnosis of Tapping Processes Using an AI Approach” *J. Mater. Shaping Tech.*, 9 (1991) p. 39-46.

[Pop16] Popovic M., Stoic A., Tanovic L. "Prediction of tapping forces and torque for 16MnCr5 alloyed steel" Univ. of Belgrade (2016) ISSN 1848-6339 (On line)

[Bou12] Bouzakis K.-D., Michailidis N., Skordaris G., Bouzakis E., Biermann D. and M'Saoubi R., "Cutting with coated tools: Coating technologies, characterization methods and performance optimization," CIRP Ann. - Manuf. Technol., vol. 61, no. 2, (2012) p. 703–723. 14

[Fer15] Fernández de Larrinoa J. "Optimización de procesos de recubrimiento para herramientas de corte. Tecnologías de recubrimiento, métodos de caracterización y optimización de las propiedades". Tesis Doctoral UPV-EHU (2016).

[Metal Estalki (Platit®)] Catálogo de Metal Estalki Platit 2012.

[Ins14] Inspektor A., and Salvador P.A. "Architecture of PVD coatings for metalcutting applications: A review," Surf. Coatings Technol., , vol. 257, (2014) p. 138–153.

[Mat10] Mattox D.M. Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing, William Andrew, (2010).

[Fer14] Fernández-Abia A.I., Barreiro J., López de Lacalle L.N., and González-Madruga D., "Effect of mechanical pre-treatments in the behaviour of nanostructured PVD-coated tools in turning," International Journal of Advanced. Manufacturing Technology, (2014), vol. 73, p. 1119–1132.

[Ins14b] Inspektor A., Mcnerny C., Rowe, M., Beblo M., Waggle N., "Engineered Coatings for Machining Stainless Steel and High Temperature Alloys", Presented at the 41st Int. Conf. on Metall. Coat. and Thin Films, San Diego, (2014).

[Pal03] Paldey, S. et al.: "Single layer and Multilayer Wear Resistant Coating of (Ti,Al)N; A Review". Materials Science and Engineering, Vol. 342, Issues 1-2 (2003) p. 58-79.

[Pal03b] Paldey, S. et al.: "Properties of Single and Gradient (Ti,Al)N Coatings" Materials Science and Engineering, Vol. 361, Issues 1-2, (2003) p.1-8.

[Platit®] <http://www.platit.com/> (Acceso 2014)

[Lop11] López de Lacalle L.N., Lamikiz A., Fernández de Larrinoa J. and Azkona I. "Machining of Hard Materials" ed. J. Paulo Davim (2011) Springer, Chapter 2 "Advanced Cutting Tools" p. 33-86.

[Cse09] Cselle T., Galamand C., Holubar P., Jilek M., Jilek J., Luemkemann A., Morstein M., “Triple Coatings- New Generation of PVD Coatings for Cutting Tools” *Journal of Machine Manufacturing*, Vol. XLIX. 2009, Issue E1, p. 19-25.

[Sil15] Silva W. M., Jesus L. M., Carneiro J. R., Souza P. S., Martins P. S., and Trava-Airoldi V. J.. “Performance of carbide tools coated with DLC in the drilling of SAE 323 aluminum alloy”. *Surface and Coatings Technology*, 284, (2015) p. 404–409.

[Mee11] Meena A., & El Mansori M., “Study of dry and minimum quantity lubrication drilling of novel austempered ductile iron (ADI) for automotive applications. *Wear*, 271(9-10), p. 2412–2416. (2011)

[Ste15] Steininger A., Siller A., & Bleicher F. (2015). Investigations Regarding Process Stability Aspects in Thread Tapping Al-Si Alloys. *Procedia Engineering*, 100, p. 1124–1132. (2015)

[Bho10] Bhowmick S., Lukitsch M. J., & Alpas A. T. (2010). Tapping of Al-Si alloys with diamond-like carbon coated tools and minimum quantity lubrication. *Journal of Materials Processing Technology*, 210(15), p. 2142–2153.

[Rei06] Reiter A. E., Brunner B., Ante M., & Rechberger J. (2006). Investigation of several PVD coatings for blind hole tapping in austenitic stainless steel. *Surface and Coatings Technology*, 200, p. 5532–5541.

[Klo10] Klocke F., Arft M., & Lung D. “Material-related aspects of the machinability of Austempered Ductile Iron. *Production Engineering*”, 4, p. 433–441. (2010).

[Klo00] Klocke F., Klöpper C., Fallböhmer M. “Fundamentals in machining of Austempered ductile iron”. *Production Engineering*, (2000) VII/2, pp. 49–52.

[Klr06] Klöper C.F., “Untersuchungen zur zerspanbarkeit von austenitisch-ferritischem guissen mit kugelgraphit (ADI)”, (2006).

[Cor09] Cortés Rodríguez C.J. “Cutting edge of precision cutting tools by applying micro-abrasive jet machining and brushing” *Tesis Doctoral* (2009), Kassel University.

[Rec05] Rech, J. “Cutting Edge Preparation and Surface Issues”, *HSS Forum’s International Conference “Smart solutions for metal cutting”*, Aachen 2-3 february 2005.

[Bou02] Bouzakis K.-D., Michailidis N., Skordaris G., Kombogiannis S., Hadjiyiannis S., Efstathiou K., Erkens G., Rambadt S., Wirth I., “Effect of the cutting edge radius and its manufacturing procedure on the milling performance of PVD coated cemented carbide inserts” *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, (2002) vol. 51, no. 1, p. 61–64

[Tus02] Tushinsky L., Kovensky I., Plokhov A., Sindeyev V., Reshedko P., “Structure and properties of metal cutting compositions” Coated Metal. 1st ed berlin, Heidelberg: Springer-Verlag (2002).

[Sad09] Sadik M. Ibrahim and Myrtveil T. “The Performance of PVD Coated grade in Milling of ADI-800”. World Academy of Science, Engineering and Technology, vol:3 (2009).

[Bra01] Brandenburg K. “Successfully Machining Austempered Ductile Iron”. Applied Process Inc. Technologies Div. (2001).

[Arf13] Arft M., Klocke F. “High performance turning of austempered ductile iron (ADI) with adapted cutting inserts”. CIRP Conference on Modeling of Machining Operations (2013), p. 129–134.

[WZL] “Cutting of the High Strength ADI Materials Basics and Optimisation” WZL RWTH Aachen University of Technology (2007).

[Vas13] Vasconcelos de Carvalho M., Melo D., de Oliveira J. “An analysis of the machinability of ASTM grades 2 and 3 austempered ductile iron”. Journal of Materials Processing Technology. (2013) 213: p. 560-573.

[Klo10b] Klocke F., “Manufacturing Processes 1–Cutting,” Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York (2010).

[Metal Estalki®] Cortesía de Azkona I. Director Técnico de Metal Estalki.

[Uri06] Uriarte L.G., Zatarain M., Santiso G., López de Lacalle L.N., lamikiz A., Albizuri J., “Evaluación de la Rigidez en Microfresado” Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica. Vol.11, n°1, pp13-36, (2007).

[Ibarmia®] Catálogo de Ibarmia (Catálogo 2008).

[Lop09] López de Lacalle L.N., Sánchez J.A., Lamikiz A., “Mecanizado de Alto Rendimiento” pp 88-89 y p.57. Procesos de Arranque 1ª edición (2009). Editorial Izaro, ISBN: 84-609-1380-5.

[Kistler®] <http://www.kistler.com/> (Acceso 2015)