



## TESIS DOCTORAL

# OPTIMIZACIÓN DE PROCESOS DE RECUBRIMIENTO PARA HERRAMIENTAS DE CORTE. TECNOLOGÍAS DE RECUBRIMIENTO, MÉTODOS DE CARACTERIZACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES

*Presentada por:*

D. Javier Fernández de Larrinoa

*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, Septiembre de 2015

eman ta zabal zazu



Universidad  
del País Vasco

Euskal Herriko  
Unibertsitatea

Departamento de Ingeniería Mecánica

Escuela técnica superior de ingeniería de Bilbao

TESIS DOCTORAL

**OPTIMIZACIÓN DE PROCESOS DE  
RECUBRIMIENTO PARA HERRAMIENTAS DE  
CORTE. TECNOLOGÍAS DE RECUBRIMIENTO,  
MÉTODOS DE CARACTERIZACIÓN Y  
OPTIMIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES**

*Autor:*

**D. Javier Fernández de Larrinoa**

*Director de tesis:*

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

Bilbao, Septiembre de 2015



# **AGRADECIMIENTOS**

Esta tesis no hubiera sido posible sin la ayuda de un gran número de personas, a las que quiero dar mi más sincero agradecimiento.

Quiero agradecer en primer lugar a Luis Norberto López de Lacalle, director de mi tesis, su ayuda y sus constantes consejos, pero sobre todo quiero agradecerle su confianza en mi persona.

Al Departamento de Ingeniería Mecánica de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Bilbao, de la UPV/EHU, en especial a Carlos Angulo, Aitzol Lamikiz, Iñigo Elosegui, Frank Girot, Asier Fernández; espero no haberme olvidado a nadie. A todos ellos por su ayuda durante estos años, en las distintas investigaciones realizadas con mi empresa Metal Estalki.

A mis compañeros de trabajo, en especial a Ibon Azkona, por compartir su conocimiento y experiencia, y a Sara Rodríguez y Ariadna Gil, por su ayuda en la realización de los ensayos.

A mi familia, a mi mujer, Carmen, y a mis hijos, Patricia y Jon, por su paciencia y cariño, que han sido un estímulo en todo momento. Gracias a mi madre, al resto de mi familia y amigos que siempre han confiado en mí.



# ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>AGRADECIMIENTOS .....</b>	<b>iii</b>
<b>ÍNDICE DE CONTENIDOS .....</b>	<b>v</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>xi</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS .....</b>	<b>xxi</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>2</b>
1.1. Planteamiento del problema: Antecedentes y oportunidades .....	2
1.2. Objetivos.....	3
1.3. Organización de la tesis .....	3
<b>2. ESTADO DEL ARTE .....</b>	<b>6</b>
2.1. Aplicación de los recubrimientos PVD.....	6
2.2. Procesos de recubrimientos actuales y tendencias .....	8
2.2.1. Tipos de recubrimientos .....	10
2.2.2. Deposición PVD .....	12
2.2.2.1. Evaporación en Vacío.....	14
2.2.2.2. Deposición por “Sputtering” .....	16
2.2.2.3. Deposición asistida por iones, “Ion Plating” .....	17
2.2.2.4. Deposición por Arco de vaporización, o Arco catódico .....	17
2.2.3. Propiedades de los recubrimientos .....	22
2.2.3.1. Recubrimiento TiN.....	23
2.2.3.2. Recubrimiento (Ti, Al)N .....	26
2.2.3.3. Recubrimiento CrN.....	30
2.2.3.4. Recubrimiento (Cr, Al)N.....	31
2.2.4. Estructuras y combinación de capas .....	32
2.2.4.1. Monocapa.....	33
2.2.4.2. Multicapa .....	33
2.2.4.3. Gradiente .....	34
2.2.4.4. Nanocapa.....	35
2.2.4.5. Nanocomposite .....	35
2.2.4.6. Combinada.....	36
2.3. Acondicionamiento de los sustratos: Pre y Post-tratamientos .....	37

2.3.1.	Necesidad del acondicionamiento: consideraciones en la fabricación de herramientas de corte .....	37
2.3.1.1.	Procedimiento de fabricación de plaquitas de metal duro .....	38
2.3.1.2.	Procedimiento de fabricación de plaquitas de c-BN.....	40
2.3.1.3.	Procedimiento de fabricación de herramientas integrales-sólidas....	41
2.3.2.	Preparación del filo de corte.....	43
2.3.2.1.	Ejemplo de aplicación industrial de la preparación de filo de corte en fresado de acabado.....	47
2.3.2.2.	Ejemplo de aplicación industrial de la preparación de filo de corte en tallado de engranajes a alta velocidad en seco .....	48
2.3.3.	Pre-tratamientos del sustrato.....	49
2.3.4.	Post-tratamientos del recubrimiento .....	53
2.4.	Técnicas de caracterización .....	58
2.4.1.	Caracterización de los recubrimientos.....	58
2.4.1.1.	Ensayo Calotest .....	60
2.4.1.2.	Ensayo Rockwell C.....	61
2.4.1.3.	Scratch Test .....	62
2.4.1.4.	Microscopio de Fuerza Atómica (AFM).....	65
2.4.1.5.	Microscopía electrónica de barrido SEM y FEG-SEM.....	66
2.4.1.6.	Microscopía electrónica de transmisión TEM.....	68
2.4.1.7.	Difracción de Rayos X.....	70
2.4.1.8.	Método de deflexión: Ensayo de Stoney.....	73
2.4.1.9.	Nanoindentación.....	76
2.4.2.	Caracterización de los procesos.....	80
2.4.2.1.	Monitorización de esfuerzos de mecanizado .....	81
2.4.2.2.	Control de desgaste .....	84
<b>3.</b>	<b>MÉTODO PARA LA DEFINICIÓN DEL PROCESO DE RECUBRIMIENTO.....</b>	<b>90</b>
3.1.	Conocimientos de partida para la optimización en herramientas recubiertas	90
3.1.1.	Geometría .....	94
3.1.2.	Materiales.....	95
3.1.3.	Microgeometría en los filos.....	96
3.1.4.	Estado superficial .....	97
3.2.	Análisis de fallo .....	99
3.3.	Mecanismos de desgaste en herramientas de corte .....	100
3.3.1.	Desgaste abrasivo.....	103
3.3.2.	Desgaste adhesivo.....	103

3.3.3.	Deformación plástica a gran escala.....	105
3.3.4.	Fatiga y fractura .....	106
3.3.5.	Mecanismos de desgaste de herramientas recubiertas.....	106
3.3.5.1.	Desprendimientos del recubrimiento debido a una pobre preparación del sustrato.....	107
3.3.5.2.	Desprendimiento del recubrimiento debido a un ablandamiento térmico del sustrato (en herramientas de corte de HSS).....	108
3.3.6.	Distribución y evolución del desgaste del filo.....	109
3.4.	Como mejorar el rendimiento de las herramientas de corte .....	112
3.4.1.	Mejora del material de la herramienta-sustrato.....	112
3.4.2.	Mejora de la integridad de la superficie .....	113
<b>4.</b>	<b>VALIDACIÓN DEL MÉTODO A TRAVÉS DE ENSAYOS EXPERIMENTALES: TALADRADO DE ACEROS DE BAJA ALEACIÓN EN CONDICIONES DE ALTO RENDIMIENTO.....</b>	<b>118</b>
4.1.	Introducción .....	118
4.2.	Equipos y materiales.....	121
4.2.1.	Equipos de recubrimiento.....	122
4.2.2.	Equipo de limpieza .....	123
4.2.3.	Equipos de decapaje.....	123
4.2.4.	Equipos de chorreado .....	124
4.2.5.	Equipo de Drag Grinding (pulido) .....	124
4.2.6.	Centro de mecanizado y sistema de monitoreo de esfuerzos.....	125
4.2.7.	Sierra automática MOD 350 .....	126
4.2.8.	Material para los ensayos: Prehardenedsteel Tool 42CrMo4 .....	127
4.2.9.	Herramienta de ensayo: Broca de metal duro Lumi W119.....	129
4.2.10.	Herramienta de preparación de ensayo: Fresa y plaquitas RCKT 12 04 MO-PM 4240 de Sandvik .....	131
4.2.11.	Calotest.....	131
4.2.12.	Durómetro Rockwell C.....	132
4.2.13.	Microscopio óptico, microscopio multifoco y microscopio confocal 3D..	133
4.2.14.	Microdurómetro y perfilómetro .....	134
4.2.15.	Cortadora, encapsuladora y pulidora metalográfica.....	135
4.2.16.	Microscopio electrónico de barrido: Microscopía SEM y análisis EDX..	136
4.3.	Análisis realizados .....	136
4.3.1.	Espesor, adhesión y rugosidad de los recubrimientos.....	136
4.3.2.	Medida de tensiones residuales de los recubrimientos.....	139
4.3.3.	Esfuerzos en el mecanizado .....	143

4.3.4.	Desgaste de flanco.....	145
4.3.5.	Daño en la superficie de desprendimiento.....	146
4.3.6.	Desgaste de los filos secundarios o diametrales .....	148
4.3.7.	Microscopia SEM y análisis EDX.....	149
4.4.	Ensayos previos: Definición de los parámetros de corte para acelerar el desgaste .....	151
4.5.	Antecedentes, objeto de la optimización, y descripción de los procesos de fabricación y tareas a realizar.....	153
4.6.	Resultados experimentales y observaciones Fase I.....	156
4.6.1.	AlCrSiN .....	156
4.6.1.1.	Espesor, adhesión y rugosidad.....	157
4.6.1.2.	Esfuerzos .....	158
4.6.1.3.	Desgaste de flanco.....	160
4.6.1.4.	Microscopía SEM y análisis EDX.....	160
4.6.2.	$\mu$ AlTiN .....	162
4.6.2.1.	Espesor, adhesión y rugosidad.....	164
4.6.2.2.	Esfuerzos .....	164
4.6.2.3.	Desgaste de flanco.....	166
4.6.2.4.	Daño en la superficie de desprendimiento.....	167
4.6.2.5.	Microscopia SEM y análisis EDX.....	168
4.6.3.	TiAlCrN .....	169
4.6.3.1.	Espesor, adhesión y rugosidad.....	170
4.6.3.2.	Esfuerzos .....	171
4.6.3.3.	Desgaste de flanco.....	172
4.6.3.4.	Daño en la superficie de desprendimiento.....	173
4.6.3.5.	Microscopia SEM y análisis EDX.....	174
4.6.4.	AlTiCrN .....	176
4.6.4.1.	Espesor, adhesión y rugosidad.....	177
4.6.4.2.	Esfuerzos .....	177
4.6.4.3.	Desgaste de flanco.....	179
4.6.4.4.	Daño en la superficie de desprendimiento.....	179
4.6.4.5.	Microscopía SEM y análisis EDX.....	181
4.6.5.	TiAlSiN .....	181
4.6.5.1.	Espesor, adhesión y rugosidad.....	182
4.6.5.2.	Esfuerzos .....	183
4.6.5.3.	Desgaste de flanco.....	184

4.6.5.4.	Daño en la superficie de desprendimiento .....	185
4.6.5.5.	Microscopía SEM y análisis EDX.....	186
4.6.6.	AlCrN .....	187
4.6.6.1.	Espesor, adhesión y rugosidad.....	187
4.6.6.2.	Esfuerzos .....	188
4.6.6.3.	Desgaste de flanco.....	190
4.6.6.4.	Daño en la superficie de desprendimiento .....	190
4.6.6.5.	Microscopía SEM y análisis EDX.....	192
4.6.7.	Tensiones residuales: Validación y ajuste de las probetas, y tensiones de los recubrimientos ensayados .....	193
4.6.8.	Conclusiones Fase I.....	194
4.7.	Resultados experimentales y observaciones Fase II.....	203
4.7.1.	AlTiSiN + .....	204
4.7.1.1.	Espesor, adhesión y rugosidad.....	205
4.7.1.2.	Esfuerzos .....	206
4.7.1.3.	Desgaste de flanco.....	207
4.7.1.4.	Daño en la superficie de desprendimiento .....	208
4.7.2.	AlTiSiN – .....	209
4.7.2.1.	Espesor, adhesión y rugosidad.....	210
4.7.2.2.	Esfuerzos .....	210
4.7.2.3.	Desgaste de flanco.....	212
4.7.2.4.	Daño en la superficie de desprendimiento .....	213
4.7.3.	Conclusiones Fase II.....	214
4.8.	Resultados experimentales y observaciones Fase III.....	218
4.8.1.	AlTiSiN Mejorado .....	219
4.8.1.1.	Espesor, adhesión y rugosidad.....	219
4.8.1.2.	Esfuerzos .....	220
4.8.1.3.	Desgaste de flanco.....	221
4.8.1.4.	Daño en la superficie de desprendimiento .....	222
4.8.2.	Conclusiones Fase III.....	223
<b>5.</b>	<b>CONCLUSIONES GENERALES .....</b>	<b>232</b>
<b>6.</b>	<b>LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO.....</b>	<b>236</b>
	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>237</b>



## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 2.1.</i> Cuotas de mercado de recubrimientos sobre herramientas de metal duro y de acero rápido [5].....	7
<i>Figura 2.2.</i> Disminución de las cargas mecánicas y térmicas de herramientas de metal duro en fresado por la aplicación de recubrimientos de PVD [13].....	9
<i>Figura 2.3.</i> Tecnologías de deposición de recubrimientos para herramientas de corte [14] .....	9
<i>Figura 2.4.</i> Diagrama de flujo del proceso PVD .....	12
<i>Figura 2.5.</i> Imágenes de distintas estructuras de recubrimiento (monocapa y multicapa), depositados por la técnica PVD por Arco Catódico [17].....	13
<i>Figura 2.6.</i> Técnicas de deposición por PVD, [18]: .....	14
<i>Figura 2.7.</i> Esquema de la técnica de deposición en vacío PVD.....	15
<i>Figura 2.8.</i> Esquema de la técnica de deposición por “Sputtering” o pulverización PVD .....	16
<i>Figura 2.9.</i> Esquema de la técnica de deposición por Ion Plating .....	17
<i>Figura 2.10.</i> Esquema general de la técnica de deposición por Arco catódico PVD....	18
<i>Figura 2.11.</i> Esquema del depósito de iones sobre el sustrato y la formación de “droplets” durante el depósito por Arco catódico PVD [17].....	19
<i>Figura 2.12.</i> Cátodos planos y rotativos [17].....	20
<i>Figura 2.13.</i> Herramientas recubiertas por Arco Catódico PVD [17].....	22
<i>Figura 2.14.</i> Evolución de los materiales de recubrimiento para las herramientas de corte [13].....	23
<i>Figura 2.15.</i> Herramientas recubiertas con TiN [17].....	24
<i>Figura 2.16.</i> Diagrama de fases en equilibrio del sistema binario Ti-N [46].....	24
<i>Figura 2.17.</i> Influencia de un tratamiento térmico sobre la dureza del recubrimiento AlTiN y TiN [55].....	26
<i>Figura 2.18.</i> Herramientas recubiertas con AlTiN [17].....	26
<i>Figura 2.19.</i> Monóculo de TiN con incrustaciones de átomos de Al [32] .....	27
<i>Figura 2.20.</i> Diagrama de fases ternario Ti-Al-N a 1273K.....	28
<i>Figura 2.21.</i> Dureza y módulo de Young en función del contenido de Al en un sistema $Ti_{1-x}Al_xN$ [65].....	29
<i>Figura 2.22.</i> Diagrama de fases en equilibrio del sistema binario Cr-N calculado con el programa Thermo-calc versión TCW <sub>4</sub> .....	30
<i>Figura 2.23.</i> Imagen de herramientas recubiertas con CrN [17] .....	31

<i>Figura 2.24.</i> Tipos de estructura cristalinas para el AlCrN según el contenido de AlN, NaCl (B1) y wurtzita (B4) .....	32
<i>Figura 2.25.</i> Estructura monocapa. Izqda. Sin capa de adhesión. Dcha. Con capa de adhesión [17].....	33
<i>Figura 2.26.</i> Estructura multicapa [17] .....	34
<i>Figura 2.27.</i> Estructura gradiente [17].....	34
<i>Figura 2.28.</i> Recubrimiento nanocapa. Dureza según la dimensión del periodo en una estructura nanocapa [17] .....	35
<i>Figura 2.29.</i> Estructura nanocomposite (nc-TiAlN) ( $\alpha$ -Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ) [17] .....	36
<i>Figura 2.30.</i> Recubrimientos con estructura combinada [17].....	36
<i>Figura 2.31.</i> Influencias del pre- y post-procesos a la deposición PVD [100] .....	37
<i>Figura 2.32.</i> Influencia de la preparación del filo en las herramientas recubiertas [17] .....	38
<i>Figura 2.33.</i> Ejemplo de procedimiento de fabricación de plaquitas de Metal Duro [17], [103] y [104].....	39
<i>Figura 2.34.</i> Comparación de la preparación de filo y del rompevirutas en dos plaquitas de metal duro [103], [105] y [106].....	40
<i>Figura 2.35.</i> Algunas preparaciones de filo típicas de plaquitas de c-BN [107] y [108] .....	41
<i>Figura 2.36.</i> Ejemplo de procedimiento de fabricación de una herramienta integral-sólida [17], [103] y [109].....	42
<i>Figura 2.37.</i> Ejemplo de micro-geometría del filo de corte de una fresa madre de HSS, y su influencia en acabado superficial y en la vida de la herramienta [103] y [110].....	42
<i>Figura 2.38.</i> Ejemplo de micro-geometría del filo de corte de una fresa de acabado de metal duro [17] y [103] .....	43
<i>Figura 2.39.</i> Defectos típicos observados en el filo de corte [111].....	44
<i>Figura 2.40.</i> Efecto de tamaño (descomposición de la fuerza resultante R en la fuerza de penetración P y la fuerza sobre la cara de desprendimiento Q) [117] .....	45
<i>Figura 2.41.</i> Esquema de los parámetros de los que depende la vida de una herramienta [103].....	46
<i>Figura 2.42.</i> Influencia del radio del filo de corte en fresado con fresa de acabado PM-HSS (66 HRC) [103] .....	47
<i>Figura 2.43.</i> Influencia del radio del filo de corte en fresado con fresa de acabado PM-HSS (70 HRC) [103] .....	48
<i>Figura 2.44.</i> Influencia del radio del filo de corte en tallado de engranajes [103].....	49
<i>Figura 2.45.</i> Efectos del micro-chorreado y lapeado (a) sobre la estructura superficial del metal duro y (b) sobre la adhesión de película y vida de la herramienta recubierta [13] .....	50
<i>Figura 2.46.</i> (a) Influencia de los pre-tratamientos mecánicos del sustrato sobre la topografía del metal duro. (b) Comportamiento mejorado al desgaste debido a un pre-tratamiento adicional al sustrato [13], [130] y [131] .....	51

<i>Figura 2.47.</i> Vida útil de la herramienta en el mecanizado de G-AlSi9Cu4Mg [13] y [133] .....	52
<i>Figura 2.48.</i> Efecto del tamaño de grano abrasivo sobre la rugosidad de la superficie con un micro-chorreado húmedo [13] .....	54
<i>Figura 2.49.</i> (a) Medidas de rugosidad en recubrimientos con post-tratamiento por micro-chorreado húmedo con Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> con granos de diferentes tamaños, a varias presiones. (b) Cambios de límites de elasticidad y tensión residual en recubrimientos con post-tratamientos [13].....	55
<i>Figura 2.50.</i> Comparación del desarrollo del desgaste de flanco de herramientas recubiertas sujetas a un micro-chorreado húmedo con grano fino o grueso a distintas presiones [13].....	56
<i>Figura 2.51.</i> (a) Radio del filo de corte $\rho_{\text{elf}}$ . (b) geometrías del filo de corte. (c) Espesor de recubrimiento mínimo $t_{p \text{ min}}$ de plaquitas recubiertas con micro-chorreado húmedo a varias condiciones. (d) Desarrollo del desgaste de flanco frente al número de cortes en fresado con varios bordes de filos de corte [13].....	57
<i>Figura 2.52.</i> (a) Cálculos de la distribución de las tensiones plásticas de Von Mises en un recubrimiento TiAlN después de un micro-chorreado. (b) Distribución de tensiones en la región de un filo de corte recubierto después de un micro-chorreado a una presión de 0.2 MPa. (c) Número logrado de cortes hasta un desgaste de flanco de ca. 0.2 mm en el caso de solo recubierto, y recubierta y después de micro-chorreado a 0.2 MPa [13].....	58
<i>Figura 2.53.</i> Métodos principales para determinar las propiedades dimensionales y funcionales de las herramientas recubiertas y del material [13] .....	59
<i>Figura 2.54.</i> Esquema del ensayo de Calotest, y ecuación para obtener el espesor del recubrimiento.....	61
<i>Figura 2.55.</i> Esquema del ensayo de adhesión VDI 3198 [139].....	62
<i>Figura 2.56.</i> a) equipo de Scratch Test; b) detalle del equipo de Scratch Test; c) esquema ilustrativo de la realización del Scratch Test; d) canal producido durante el ensayo.....	63
<i>Figura 2.57.</i> Atlas de huellas de Scratch [144].....	64
<i>Figura 2.58.</i> Esquema del principio de operación del AFM .....	65
<i>Figura 2.59.</i> Imágenes de un perfilómetro óptico: a) filo de corte después del rectificado; b) redondeamiento del filo después del post-tratamiento; c) vista 3D del filo de corte de una plaquita [17].....	66
<i>Figura 2.60.</i> Diagrama de un microscopio FEG-SEM .....	67
<i>Figura 2.61.</i> Microscopio FEG-SEM JEOL JSM-7100F [145].....	67
<i>Figura 2.62.</i> Microscopio TEM JOEL JEM-2010 [145].....	68
<i>Figura 2.63.</i> Equipo FIB Quanta 3D FEG [146].....	69
<i>Figura 2.64.</i> Metodología usada para la obtención de foils para TEM por medio de FIB .....	70

<i>Figura 2.65.</i> Técnica de ángulo rasante.....	71
<i>Figura 2.66.</i> Ilustración del difractómetro Philips X'Pert MRD y esquema de la configuración típicamente empleada en la medida de tensiones residuales [150].....	72
<i>Figura 2.67.</i> Esquema del montaje de las pletinas.....	74
<i>Figura 2.68.</i> a) Esquema del nanoindentador: Nano Indenter II, b) Esquema del indentador [155].....	77
<i>Figura 2.69.</i> Representación esquemática de una sección de huella de indentación [156] .....	77
<i>Figura 2.70.</i> Esquema de una secuencia de datos de carga versus desplazamiento, y ecuación para obtener la profundidad de contacto [156].....	78
<i>Figura 2.71.</i> Ilustración de cómo el (a) pile-up y (b) sink-in influyen en el área real de contacto $a_c^{real}$ comparado con el área de contacto $a_c$ [160].....	79
<i>Figura 2.72.</i> Evolución de una indentación en un sistema sustrato-recubrimiento al aumentar la profundidad de penetración [161].....	80
<i>Figura 2.73.</i> Variación de la sección de la viruta con el desgaste en una broca.....	81
<i>Figura 2.74.</i> Galgas extensométricas.....	82
<i>Figura 2.75.</i> Montaje mesa dinamométrica [166] .....	83
<i>Figura 2.76.</i> Dinamómetro rotativo [166].....	83
<i>Figura 2.77.</i> Esquema de distribución de los mecanismos de desgaste; descripción de desgaste adhesivo, abrasivo y de difusión.....	84
<i>Figura 2.78.</i> Evolución del desgaste de flanco en herramientas .....	86
<i>Figura 2.79.</i> Sonda de verificación de herramientas por contacto y sin contacto [167].....	87
<i>Figura 2.80.</i> a) Imagen cámara termográfica por infrarrojos en un corte ortogonal en seco; b) termopar; c) Cabezal de medición de rugosidad de una MMC [169][172].....	88
<i>Figura 3.1.</i> Esquema para la optimización de procesos de recubrimiento.....	91
<i>Figura 3.2.</i> Conocimientos de partida para la optimización en herramientas recubiertas .....	92
<i>Figura 3.3.</i> Evolución del desgaste de una herramienta. Los tres óvalos representan el desgaste inicial, el estado estable y el desgaste catastrófico de la herramienta, respectivamente. Se indica la influencia de la preparación superficial y el recubrimiento [173]. .....	93
<i>Figura 3.4.</i> Proceso general de fabricación de una herramienta recubierta.....	94
<i>Figura 3.5.</i> Acumulación preferente en los filos de herramientas de corte: “efecto gota” .....	94
<i>Figura 3.6.</i> Preparación de filos en los aspectos de regularidad y morfología [17] .....	96
<i>Figura 3.7.</i> Resultante en un filo agudo $\sigma_{n1}$ y en un filo romo $\sigma_{n2}$ , siendo $\sigma_{n1} > \sigma_{n2}$ .....	96
<i>Figura 3.8.</i> Fallo del recubrimiento inducido por un incorrecto rectificado, que produce el desprendimiento del recubrimiento a lo largo de las crestas del rectificado [173]....	98

<i>Figura 3.9.</i> Análisis de fallo .....	100
<i>Figura 3.10.</i> Acción principal y distribución de temperaturas del filo de una herramienta de corte [173].....	101
<i>Figura 3.11.</i> Gráficos de la Fuerza de corte vs. Velocidad de corte y avance [173] ..	101
<i>Figura 3.12.</i> Distribución para distintos tipos de desgaste en una herramienta [184]..	102
<i>Figura 3.13.</i> Típica apariencia de desgaste abrasivo: domina el desgaste de flanco y cráter de una fresa. Las flechas apuntan a las crestas del material de HSS relativamente resistente a la abrasión. Hay también evidencia de fracturas en el filo. Material de trabajo acero al carbono [173] .....	103
<i>Figura 3.14.</i> Desgaste del flanco, producido por un mecanismo de erosión, arrastre: desgaste abrasivo.....	103
<i>Figura 3.15.</i> Cráter en una fresa que ha estado mecanizando acero con bajo carbono. En bajo aumento (a) el mecanismo de desgaste dominante parece ser abrasivo. Sin embargo, una aproximación (b) revela que es dominado por un componente adhesivo leve con fragmentación de cizalladura del material en la dirección del flujo de viruta (flecha) [173].....	104
<i>Figura 3.16.</i> a) Micrografía óptica de una sección transversal de un diente de una fresa madre después de mecanizar acero inoxidable austenítico. b) Detalle de a) en la zona del cráter. Las flechas indican la dirección del flujo de la viruta y el patrón de flujo de la superficie del material respectivamente. Esto último es indicativo del desgaste adhesivo severo [173].....	105
<i>Figura 3.17.</i> Deformación plástica del filo de una herramienta de HSS: a) La línea de filo en la parte del centro de la foto está plásticamente movida hacia abajo y pronto abandonará el filo, como ya sucede en las partes adyacentes del filo. b) Sección transversal del filo deformado plásticamente mostrando signo de cizalla adiabática [173] .....	105
<i>Figura 3.18.</i> Roturas de filo pequeñas (a) y algo más grandes (b), debido a la sobrecarga local y a la fatiga del diente en una fresa [173].....	106
<i>Figura 3.19.</i> Las tensiones compresivas laterales $\sigma$ presentes en la mayoría de los recubrimientos PVD generarían tensiones entre capas S. En la parte superior de las crestas de rectificado, esta tensión es de tracción (“despega”), y puede alcanzar el mismo orden de magnitud que la tensión residual $\sigma$ [173] y [185].....	108
<i>Figura 3.20.</i> Grietas de fatiga microscópicas observadas en la cara de desprendimiento cerca del filo del diente de una fresa madre que ha estado mecanizando acero al carbono. (b) es una ampliación de (a). Observar que la dirección de las grietas coincide con la dirección del acabado de la superficie [173] .....	108
<i>Figura 3.21.</i> Desprendimiento del recubrimiento de un diente de fresa madre usada para el tallado de engranajes de acero al carbono: a) fractura del recubrimiento debido al ablandamiento térmico del sustrato; b) desprendimiento de pequeños fragmentos de recubrimiento y desgaste inicial del material de HSS subyacente. El espesor de los fragmentos es el mismo que el espesor original del recubrimiento [173].....	109

<i>Figura 3.22.</i> Desgaste sucesivo de los dientes de una fresa madre recubierta de TiN revelado por SEM e imagen metalográfica de la sección transversal [173]: .....	110
<i>Figura 3.23.</i> Evolución del desgaste de una herramienta. Los tres óvalos representan el desgaste inicial, el estado estable y el desgaste catastrófico de la herramienta, respectivamente [173].....	111
<i>Figura 3.24.</i> Reduciendo el tamaño de la microestructura de los constituyentes y mejorando la limpieza, se puede mejorar el ratio dureza/tenacidad [173] .....	113
<i>Figura 3.25.</i> Esquema de la tecnología LARC, para el “virtual shutter”, que permite situar el arco en la parte trasera, de tal forma que el cátodo está limpio antes de recubrir [17] .....	114
<i>Figura 3.26.</i> Comparativa de la conductividad térmica de los distintos recubrimientos [17] .....	115
<i>Figura 3.27.</i> Gráficos comparativos de la dureza en caliente de distintos recubrimientos [17] .....	115
<i>Figura 4.1.</i> Proceso general de una herramienta recubierta. Las etapas sombreadas en rojo son las que forman parte del proceso de recubrimiento .....	118
<i>Figura 4.2.</i> Esquema para la optimización de procesos de recubrimiento. La parte recuadrada es la evaluación comparativa de pruebas de mecanizado para la optimización de los procesos de recubrimiento.....	119
<i>Figura 4.3.</i> Análisis de fallo .....	120
<i>Figura 4.4.</i> Esquema del proceso de recubrimiento [17] .....	122
<i>Figura 4.5.</i> a) Equipo π80; b) Equipo PL-50; c) Equipo PL-1001 [17].....	122
<i>Figura 4.6.</i> Esquema del proceso de limpieza [17].....	123
<i>Figura 4.7.</i> a) Módulos de decapaje; b) Herramienta recubierta, antes y después de decapar [17].....	123
<i>Figura 4.8.</i> Chorreado de arena.....	124
<i>Figura 4.9.</i> Máquina de Drag Grinding OTEC DF-35 [17].....	124
<i>Figura 4.10.</i> Centro de mecanizado Kondia A6.....	125
<i>Figura 4.11.</i> a) Estator y rotor del Artis DDU4; b) Transductor del Artis DDU4; c) Software de adquisición de datos QuickData .....	126
<i>Figura 4.12.</i> Sierra automática MOD 350.....	126
<i>Figura 4.13.</i> Estructura metalográfica del 42CrMo4 .....	127
<i>Figura 4.14.</i> Dureza superficial del 42CrMo4 .....	128
<i>Figura 4.15.</i> Parámetros de corte recomendados para el 42CrMo4 .....	129
<i>Figura 4.16.</i> Características de la herramienta de trabajo .....	130
<i>Figura 4.17.</i> Fresa y plaquitas utilizadas para el planeado.....	131
<i>Figura 4.18.</i> Calotest y pasta de diamante abrasiva .....	132
<i>Figura 4.19.</i> Durómetro Rockwell C .....	133

<i>Figura 4.20.</i> a) Microscopio óptico Olympus; b) Microscopio óptico multifoco Leica Z6 APO; c) Microscopio confocal Leica DCM 3D .....	134
<i>Figura 4.21.</i> a) Microdurómetro Future Tech FM 800; b) perfilómetro Taylor Hobson From Talysurf Series 2.....	134
<i>Figura 4.22.</i> a) Cortadora metalográfica Remet TR 100 Evolution; b) encapsuladora térmica Remet IPA 40 Evolution; c) pulidora metalográfica de plato Remet LS1 con discos de lija .....	135
<i>Figura 4.23.</i> Microscopio electrónico de barrido JEOL JSM-6400 .....	136
<i>Figura 4.24.</i> Pulidora metalográfica de plato Remet LS1 y discos de lija .....	137
<i>Figura 4.25.</i> Calotest.....	138
<i>Figura 4.26.</i> a) Muesca del calotest sobre broca; b) muesca de calotest sobre probeta .....	138
<i>Figura 4.27.</i> Muestras de distintos grados de adhesión .....	139
<i>Figura 4.28.</i> Montaje de las probetas.....	140
<i>Figura 4.29.</i> Montaje de arandelas entorno a la chapa de medida de tensiones.....	140
<i>Figura 4.30.</i> Zona a medir de la probeta de las tensiones.....	141
<i>Figura 4.31.</i> Pasos a seguir para la medida del desplazamiento de las probetas de medida de tensión. a) recta paralela a la pletina de referencia; b) medida de la distancia .....	142
<i>Figura 4.32.</i> Montaje de broca, pinza y portaherramientas Artis .....	144
<i>Figura 4.33.</i> a) Montaje de estator y rotor del Artis DDU4; b) cableado del transductor del Artis.....	144
<i>Figura 4.34.</i> Posición de la herramienta para la medida con la cámara de alta resolución .....	146
<i>Figura 4.35.</i> a) Medida típica del desgaste; b) medida del desgaste con pérdida de filo .....	146
<i>Figura 4.36.</i> Colocación de la broca en el microscopio multifoco .....	147
<i>Figura 4.37.</i> Cortes realizados al perfil de rugosidad en la cara de desprendimiento de una broca con el microscopio confocal 3D.....	148
<i>Figura 4.38.</i> Adquisición de imágenes de los filos diametrales .....	149
<i>Figura 4.39.</i> Corte metalográfico de las brocas.....	150
<i>Figura 4.40.</i> Señal de la fuerza registrada en la operación de taladrado con punteo	152
<i>Figura 4.41.</i> Estrategia de mecanizado.....	153
<i>Figura 4.42.</i> Rendimiento para distintos recubrimientos sobre el acero 16CrMn5.....	154
<i>Figura 4.43.</i> Imágenes del calotest del recubrimiento AlCrSiN: a) sobre probeta; b) sobre broca.....	158
<i>Figura 4.44.</i> Imagen del ensayo Rockwell C del recubrimiento AlCrSiN.....	158

<i>Figura 4.45.</i> Evolución de los esfuerzos de la broca recubierta con AlCrSiN .....	159
<i>Figura 4.46.</i> Imagen de la cámara de alta resolución del filo de las brocas recubiertas con AlCrSiN en las que se medirá el desgaste de flanco: a) al inicio; b) al final de su vida útil .....	160
<i>Figura 4.47.</i> Imagen SEM de la zona de desprendimiento del recubrimiento AlCrSiN .....	161
<i>Figura 4.48.</i> Imagen SEM de la zona de incidencia del AlCrSiN .....	161
<i>Figura 4.49.</i> Composición EDX de la masa apreciada en la zona de desprendimiento .....	162
<i>Figura 4.50.</i> Pérdida de recubrimiento en los filos secundarios al aumentar el número de taladros realizados.....	163
<i>Figura 4.51.</i> Imágenes del calotest del recubrimiento $\mu$ AlTiN: a) sobre probeta; b) sobre broca.....	164
<i>Figura 4.52.</i> Imagen Rockwell C del $\mu$ AlTiN.....	164
<i>Figura 4.53.</i> Evolución de los esfuerzos de la broca recubierta con $\mu$ AlTiN .....	166
<i>Figura 4.54.</i> Filo principal: a) broca nueva; b) broca desgastada .....	167
<i>Figura 4.55.</i> Superficie de desprendimiento de la broca recubierta con $\mu$ AlTiN .....	168
<i>Figura 4.56.</i> Imágenes SEM de la zona de desprendimiento del $\mu$ AlTiN.....	168
<i>Figura 4.57.</i> Imágenes SEM de la superficie de incidencia del $\mu$ AlTiN.....	169
<i>Figura 4.58.</i> Imágenes del calotest del recubrimiento TiAlCrN: a) sobre probeta; b) sobre broca.....	170
<i>Figura 4.59.</i> Imagen del ensayo Rockwell C del recubrimiento TiAlCrN.....	170
<i>Figura 4.60.</i> Evolución de los esfuerzos de la broca recubierta con TiAlCrN .....	172
<i>Figura 4.61.</i> Imagen del filo principal: a) broca nueva; b) broca desgastada .....	172
<i>Figura 4.62.</i> Superficie de desprendimiento de la broca recubierta con TiAlCrN.....	174
<i>Figura 4.63.</i> Adhesión de material al filo de la broca recubierta con TiAlCrN .....	174
<i>Figura 4.64.</i> Imágenes SEM de la zona de desprendimiento del TiAlCrN .....	174
<i>Figura 4.65.</i> Imágenes SEM de la zona de incidencia del TiAlCrN.....	175
<i>Figura 4.66.</i> Resultado del análisis EDX de la masa apreciada en la zona de desprendimiento .....	175
<i>Figura 4.67.</i> Enmarañamiento de la viruta ocasionado en la broca recubierta con AlTiCrN.....	176
<i>Figura 4.68.</i> Imagen del calotest del recubrimiento AlTiCrN realizado sobre la broca.....	177
<i>Figura 4.69.</i> Evolución de los esfuerzos de broca recubierta con AlTiCrN .....	178
<i>Figura 4.70.</i> Imagen de la cámara de alta resolución del filo de las brocas recubiertas con AlTiCrN en las que se medirá el desgaste de flanco: a) broca nueva; b) broca desgastada.....	179

<i>Figura 4.71.</i> a) Cráter en la superficie de desprendimiento; b) Rotura posterior.....	180
<i>Figura 4.72.</i> Imágenes SEM de la zona de desprendimiento AlTiCrN.....	181
<i>Figura 4.73.</i> Imágenes SEM de la zona de incidencia del recubrimiento AlTiCrN .....	181
<i>Figura 4.74.</i> Imagen del calotest del recubrimiento TiAlSiN realizado sobre la broca	182
<i>Figura 4.75.</i> Evolución de los esfuerzos de la broca recubierta con TiAlSiN .....	184
<i>Figura 4.76.</i> Imagen de la cámara de alta resolución del filo de la broca recubierta con TiAlSiN en la que se medirá el desgaste de flanco .....	185
<i>Figura 4.77.</i> Superficie de desprendimiento de la broca recubierta con TiAlSiN .....	186
<i>Figura 4.78.</i> Imágenes SEM de la zona del desprendimiento del recubrimiento TiAlSiN .....	186
<i>Figura 4.79.</i> Imágenes SEM de la zona de incidencia del recubrimiento TiAlSiN.....	187
<i>Figura 4.80.</i> Imágenes del calotest del recubrimiento AlCrN: a) sobre probeta; b) sobre broca .....	188
<i>Figura 4.81.</i> Imagen del ensayo Rockwell C del recubrimiento AlCrN.....	188
<i>Figura 4.82.</i> Evolución de los esfuerzos de la broca recubierta con AlCrN .....	189
<i>Figura 4.83.</i> Imagen de la cámara de alta resolución del filo de las brocas recubiertas con AlCrN en las que se medirá el desgaste de flanco: a) broca nueva; b) broca desgastada.....	190
<i>Figura 4.84.</i> Superficie de desprendimiento de la broca recubierta con AlCrN.....	191
<i>Figura 4.85.</i> Material adherido al filo de la herramienta recubierta con AlCrN .....	192
<i>Figura 4.86.</i> Imágenes SEM de la zona de desprendimiento del AlCrN .....	192
<i>Figura 4.87.</i> Imágenes SEM de la zona de incidencia del AlCrN .....	192
<i>Figura 4.88.</i> Gráfica comparativa de la fuerza de avance para los diferentes recubrimientos ensayados en la Fase I.....	195
<i>Figura 4.89.</i> Gráfica comparativa del aumento de la fuerza de avance al final de 100 metros taladrados .....	195
<i>Figura 4.90.</i> Gráfica comparativa del par para los diferentes recubrimientos ensayados en la Fase I.....	196
<i>Figura 4.91.</i> Gráfica comparativa de la evolución del desgaste de flanco para los diferentes recubrimientos ensayados en la Fase I .....	196
<i>Figura 4.92.</i> Imágenes de los filos diametrales al finalizar los ensayos de taladrado	197
<i>Figura 4.93.</i> Evolución de la dureza con la temperatura para distintos recubrimientos .....	201
<i>Figura 4.94.</i> Evolución de la resistencia a la oxidación con la temperatura para distintos recubrimientos .....	202
<i>Figura 4.95.</i> Imágenes del calotest del recubrimiento AlTiSiN+: a) sobre probeta; b) sobre broca.....	205

<i>Figura 4.96.</i> Imagen del ensayo Rockwell C del recubrimiento AlTiSiN+ .....	206
<i>Figura 4.97.</i> Evolución de los esfuerzos máximos de la broca recubierta con AlTiSiN + .....	206
<i>Figura 4.98.</i> Desgaste de flanco del recubrimiento AlTiSiN +: a) al de 100 agujeros; b) al de 1000 agujeros .....	208
<i>Figura 4.99.</i> Imagen del calotest del recubrimiento AlTiSiN-: a) sobre probeta; b) sobre broca .....	210
<i>Figura 4.100.</i> Imagen del ensayo Rockwell C del recubrimiento AlTiSiN- .....	210
<i>Figura 4.101.</i> Evolución de los esfuerzos de la broca recubierta con AlTiSiN – .....	212
<i>Figura 4.102.</i> Desgaste de flanco del recubrimiento AlTiSiN -: a) al de 100 agujeros; b) al de 1000 agujeros .....	213
<i>Figura 4.103.</i> Gráfica comparativa de la fuerza de avance de los recubrimientos de la Fase I y II.....	214
<i>Figura 4.104.</i> Gráfica comparativa del aumento de la fuerza de avance al realizar 100 m de taladrado.....	215
<i>Figura 4.105.</i> Gráfica comparativa de la tendencia del par en el taladrado de los recubrimientos de la Fase I y II .....	216
<i>Figura 4.106.</i> Gráfica comparativa del desgaste de flanco de las brocas recubiertas en la Fase I y II .....	216
<i>Figura 4.107.</i> Imagen del calotet del recubrimiento AlTiSiN-Mejorado .....	219
<i>Figura 4.108.</i> Imagen del ensayo Rockwell C del recubrimiento AlTiSiN-Mejorado ..	220
<i>Figura 4.109.</i> Evolución de los esfuerzos de la broca recubierta con AlTiSiN-Mejorado .....	220
<i>Figura 4.110.</i> Evolución del desgaste de flanco en la herramienta, a medida que se taldran agujeros .....	222
<i>Figura 4.111.</i> Superficie de desprendimiento de la broca recubierta AlTiSiN-Mejorado tras 850 operaciones .....	223
<i>Figura 4.112.</i> Gráfica comparativa de la magnitud de la fuerza de avance en las tres fases realizadas .....	224
<i>Figura 4.113.</i> Gráfica comparativa de la tendencia de la fuerza de avance. ....	224
<i>Figura 4.114.</i> Gráfica comparativa del incremento de fuerza durante los primeros 100 metros taladrados con las brocas recubiertas .....	225
<i>Figura 4.115.</i> Gráfica comparativa del par máximo de los recubrimientos ensayados en las Fases I, II y III.....	225
<i>Figura 4.116.</i> Gráfica comparativa de la evolución del desgaste de flanco .....	226
<i>Figura 4.117.</i> Imagen del filo principal de las dos brocas ensayadas: a) broca nueva; b) broca al finalizar el ensayo (850 operaciones) .....	226
<i>Figura 4.118.</i> Imagen del filo secundario de la broca recubierta con AlTiSiN-Mejorado: a) broca nueva; b) al final de su vida útil (850 operaciones).....	227

## ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 2.1.</i> Clasificación de los recubrimientos según el modo de deposición .....	10
<i>Tabla 2.2.</i> Comparativa de recubrimientos metálicos o cerámicos más extendidos para componentes y herramientas.....	11
<i>Tabla 2.3.</i> Comparación de los parámetros típicos de diferentes procesos PVD .....	21
<i>Tabla 2.4.</i> Características de los principales métodos de realización de pre-tratamientos [5] y [17] .....	53
<i>Tabla 2.5.</i> Tensiones medidas con el primer diseño .....	75
<i>Tabla 2.6.</i> Tensiones medidas con las chapas de Stoney.....	75
<i>Tabla 3.1.</i> Mecanismos de desgaste comunes de las herramientas de corte, sus causas y cómo combatirlas [173].....	112
<i>Tabla 4.1.</i> Propiedades del acero 42CrMo4.....	128
<i>Tabla 4.2.</i> Parámetros de corte utilizados .....	130
<i>Tabla 4.3.</i> Resultados de los ensayos previos .....	151
<i>Tabla 4.4.</i> Propiedades de los recubrimientos utilizados actualmente en taladrado..	154
<i>Tabla 4.5.</i> Propiedades de los recubrimientos aplicados a la broca, en la Fase I.....	156
<i>Tabla 4.6.</i> Valores de la evolución de la fuerza máxima y par máximo a medida que se realizan taladros con la broca recubierta con AlCrSiN .....	159
<i>Tabla 4.7.</i> Desgaste de flanco de la broca recubierta con AlCrSiN .....	160
<i>Tabla 4.8.</i> Valores de la evolución de la fuerza máxima y del par a medida que se realizan taladros con la broca recubierta con $\mu$ AlTiN .....	165
<i>Tabla 4.9.</i> Valores obtenidos para el desgaste de flanco del recubrimiento $\mu$ AlTiN ..	166
<i>Tabla 4.10.</i> Diferentes perfiles de rugosidad de la superficie de desprendimiento ....	167
<i>Tabla 4.11.</i> Valores de la evolución de la fuerza máxima y del par a medida que se realizan taladros con la broca recubierta con TiAlCrN.....	171
<i>Tabla 4.12.</i> Valores obtenidos para el desgaste de flanco del recubrimiento TiAlCrN .....	172
<i>Tabla 4.13.</i> Diferentes perfiles de rugosidad de la superficie de desprendimiento ....	173
<i>Tabla 4.14.</i> Valores de la evolución de la fuerza máxima y par a medida que se realizan taladros con la broca recubierta con AlTiCrN.....	178
<i>Tabla 4.15.</i> Valores obtenidos para el desgaste de flanco del recubrimiento AlTiCrN .....	179
<i>Tabla 4.16.</i> Diferentes perfiles de rugosidad de la superficie de desprendimiento ....	180
<i>Tabla 4.17.</i> Valores de la evolución de la fuerza y par máximo a medida que se realizan taladros con la broca recubierta con TiAlSiN .....	183

<i>Tabla 4.18.</i> Valores obtenidos para el desgaste de flanco del recubrimiento TiAlSiN184	
<i>Tabla 4.19.</i> Diferentes perfiles de rugosidad de la superficie de desprendimiento ....	185
<i>Tabla 4.20.</i> Valores de la evolución de la fuerza y del par máximo a medida que se realizan taladros con la broca recubierta con AlCrN.....	189
<i>Tabla 4.21.</i> Valores obtenidos para el desgaste de flanco del recubrimiento AlCrN..	190
<i>Tabla 4.22.</i> Diferentes perfiles de rugosidad de la superficie de desprendimiento ....	191
<i>Tabla 4.23.</i> Tensiones residuales de los recubrimientos ensayados en la Fase I ....	193
<i>Tabla 4.24.</i> Resultados del diseño final de las probetas .....	194
<i>Tabla 4.25.</i> Tabla comparativa del perfil de la zona de desprendimiento para los diferentes recubrimientos ensayados en la Fase I .....	198
<i>Tabla 4.26.</i> Tabla comparativa de las propiedades ensayadas para los diferentes recubrimientos .....	199
<i>Tabla 4.27.</i> Propiedades de los recubrimientos aplicados a la broca, en las Fases I y II .....	204
<i>Tabla 4.28.</i> Valores de la evolución de la fuerza y del par máximo a medida que se realizan taladros con la broca recubierta con AlTiSiN + .....	207
<i>Tabla 4.29.</i> Valores obtenidos para el desgaste de flanco del recubrimiento AlTiSiN+ .....	208
<i>Tabla 4.30.</i> Diferentes perfiles de rugosidad de la superficie de desprendimiento ....	209
<i>Tabla 4.31.</i> Valores de la evolución de la fuerza y del par máximo a medida que se realizan taladros con la broca recubierta con AlTiSiN – .....	211
<i>Tabla 4.32.</i> Valores obtenidos para el desgaste de flanco del recubrimiento AlTiSiN - .....	212
<i>Tabla 4.33.</i> Diferentes perfiles de rugosidad de la superficie de desprendimiento ....	213
<i>Tabla 4.34.</i> Tensiones residuales de los recubrimientos ensayados en las Fases I y II .....	214
<i>Tabla 4.35.</i> Comparación de la superficie de desprendimiento de los diferentes recubrimientos de la Fase I y II .....	217
<i>Tabla 4.36.</i> Propiedades de los recubrimientos aplicados a la broca, en las Fases I, II y III .....	218
<i>Tabla 4.37.</i> Valores de la evolución de la fuerza máxima y par a medida que se realizan taladros con la broca recubierta con AlTiSiN-Mejorado .....	221
<i>Tabla 4.38.</i> Valores obtenidos para el desgaste de flanco del recubrimiento AlTiSiN-Modificado .....	222
<i>Tabla 4.39.</i> Rugosidad de la superficie de desprendimiento de la broca.....	222
<i>Tabla 4.40.</i> Tensiones residuales de los recubrimientos ensayados.....	223
<i>Tabla 4.41.</i> Comparación de la superficie de desprendimiento de los diferentes recubrimientos de la Fase I, II y III .....	228

# **CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN**

# 1. Introducción

## 1.1. Planteamiento del problema: Antecedentes y oportunidades

La situación actual plantea retos que obligan a desarrollar y a mejorar los procesos de fabricación en distintos ámbitos. Desde una reducción de los costes de fabricación, mayor eficiencia, procesos más sostenibles desde un punto de vista medioambiental, nuevos materiales con mayores prestaciones, con una disminución del peso y mejores características mecánicas, que en muchos casos, implica una mayor dificultad en su manufactura, hasta una mejora en la calidad, reducción en tolerancias, y reducción de los tiempos de fabricación.

En el área del mecanizado, el desarrollo del mecanizado de alta velocidad o mecanizado de alto rendimiento, necesita de los avances tanto en las máquinas herramienta, como de las propias herramientas: desarrollo de nuevas geometrías, materiales de la herramienta y un gran conocimiento tanto de los materiales a mecanizar como de otros aspectos relevantes como las condiciones de trabajo, microgeometría, el estado superficial o el recubrimiento.

El uso del recubrimiento es la mejor alternativa para proteger al sustrato-herramienta frente al desgaste, limitándolo mediante el depósito de materiales cerámicos de baja reactividad con el material a mecanizar y con el entorno, a las temperaturas de corte. Con los recubrimientos se consiguen mejoras importantes en la vida de las herramientas de corte, así como trabajar en condiciones, que no serían posibles, sin la utilización de los mismos.

La búsqueda de nuevos recubrimientos, así como su optimización, se basan en la aplicación concreta, buscando las propiedades más adecuadas: resistencia al desgaste, coeficiente de fricción, dureza, tenacidad, resistencia a la oxidación, etc., para obtener en cada caso, el recubrimiento más óptimo a las condiciones de trabajo.

Sin embargo, el recubrimiento no puede considerarse como un factor aislado. Para obtener los resultados esperados, se deben tener en cuenta otros factores como: propiedades del material del sustrato, tratamiento térmico, estado superficial, micro-

geometría de los filos, etc., de la herramienta a recubrir que junto a los del recubrimiento permitirán la consecución del rendimiento final esperado.

## 1.2. Objetivos

Teniendo en cuenta lo anterior, el objetivo de esta tesis es identificar los conocimientos y establecer pautas para la optimización de los procesos de recubrimiento en las herramientas de corte.

Los conocimientos de partida para esta optimización, no sólo involucran al proceso de recubrimiento, sino a otros aspectos como son el tipo de trabajo, el material y las condiciones de trabajo, y la propia herramienta: su geometría, material, estado superficial y preparación de filos.

Por otro lado, se debe analizar el comportamiento de distintos tipos de recubrimiento, con variaciones en los procesos de recubrimiento, entendiendo como procesos de recubrimiento no solo la deposición del mismo, sino todo lo que le rodea, es decir, el acondicionamiento de los sustratos y del recubrimiento (pre y post-tratamientos).

Para analizar que propiedades se deben buscar, según la aplicación y las condiciones concretas de trabajo, que optimicen los procesos de recubrimientos, se realiza un análisis de fallo, a partir de una evaluación comparativa de pruebas. El conocimiento e identificación de las causas de fallo proporciona cuáles son las propiedades que se deben buscar en los procesos de recubrimiento. El conocimiento de los mecanismos de desgaste en las herramientas es fundamental para determinar las causas del fallo: tipo de mecanismo de desgaste, evolución y distribución del desgaste, causa del desgaste y propiedades para combatirlo.

## 1.3. Organización de la tesis

Este documento está estructurado en seis capítulos, siendo el presente, el **Capítulo 1** la **introducción**.

En el **Capítulo 2** se describe el **estado del arte** en distintos aspectos de los recubrimientos para herramientas de corte, en especial para los recubrimientos por deposición PVD (Physical Vapor Deposition), así como las distintas técnicas de deposición PVD, aunque todas ellas tienen en común que es un proceso de depósito

atomístico, donde se vaporiza un material a partir de una fuente sólida o líquida en forma de átomos o moléculas a baja temperatura (entre 400°C y 500°C). Estos átomos o moléculas son transportados en forma de vapor a través de un ambiente gaseoso en vacío o baja presión, denominado plasma, hasta un sustrato-herramienta donde el material se deposita. Los compuestos de las capas depositadas se forman por la reacción del material vaporizado con un ambiente gaseoso.

Se revisarán las propiedades de los recubrimientos más significativos, tipos de estructuras y combinaciones de capas, acondicionamiento de los sustratos-herramientas con los pre- y post-tratamientos.

Por último, en este capítulo 2 del estado del arte, se revisarán las principales técnicas de caracterización para recubrimientos con películas delgadas de PVD, considerando que son materiales duros y frágiles, donde propiedades como la fatiga, tenacidad, tensiones residuales, adhesión, propiedades tribológicas y espesor son fundamentales en el rendimiento de las herramientas de corte recubiertas.

En el **Capítulo 3** se describe el **método para la definición de un proceso de recubrimiento**, desde los conocimientos de partida y análisis del fallo, hasta la optimización de los procesos de recubrimiento.

El conocimiento e identificación de las causas de fallo, proporcionan la información necesaria para determinar el tipo, evolución y distribución del desgaste de una herramienta, y por tanto las causas del mismo y las propiedades para combatirlo, y así optimizar los procesos de recubrimiento de una herramienta de corte.

En el **Capítulo 4**, se describen los distintos **ensayos experimentales**, así como los resultados en distintas condiciones y procesos de recubrimiento, para unas brocas de metal duro, en taladrado de alto rendimiento sobre acero 42CrMo4, buscando la optimización de los procesos de recubrimiento, utilizando el método definido en el capítulo 3, método para la definición de un proceso de recubrimiento.

Finalmente, en el **Capítulo 5** se presentan las **conclusiones generales** de este trabajo, y en el **Capítulo 6** se muestran las **líneas futuras de trabajo**.

# **CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE**

## 2. Estado del arte

En este Capítulo, se hace una revisión del estado del arte en lo referente a los procesos de recubrimiento para herramientas de corte, que son utilizados actualmente en la industria para el mecanizado, así como diferentes aportaciones teóricas de autores que han trabajado sobre la caracterización de los recubrimientos, estudios sobre el desgaste de herramientas de corte, y procesos para la mejora de herramientas de corte recubiertas.

### 2.1. Aplicación de los recubrimientos PVD

La aplicación de los recubrimientos PVD en herramientas de corte, es uno de los campos más importantes para su utilización, donde el desarrollo e investigación están encaminados a alargar la vida de las herramientas [1], en combinación con la utilización, cada vez mayor, de nuevos materiales de baja maquinabilidad, condiciones de trabajo cada vez más exigentes (alta velocidad, mecanizado en seco), y la demanda de una mejor calidad de las superficies mecanizadas. El 50% de las herramientas de acero rápido y el 85% de las herramientas de metal duro usadas en la industria están recubiertas [2]. Sólo en EEUU durante 1998 se estimó que el ahorro en herramientas de corte por la utilización de recubrimientos ascendió a 1000 millones de dólares [3].

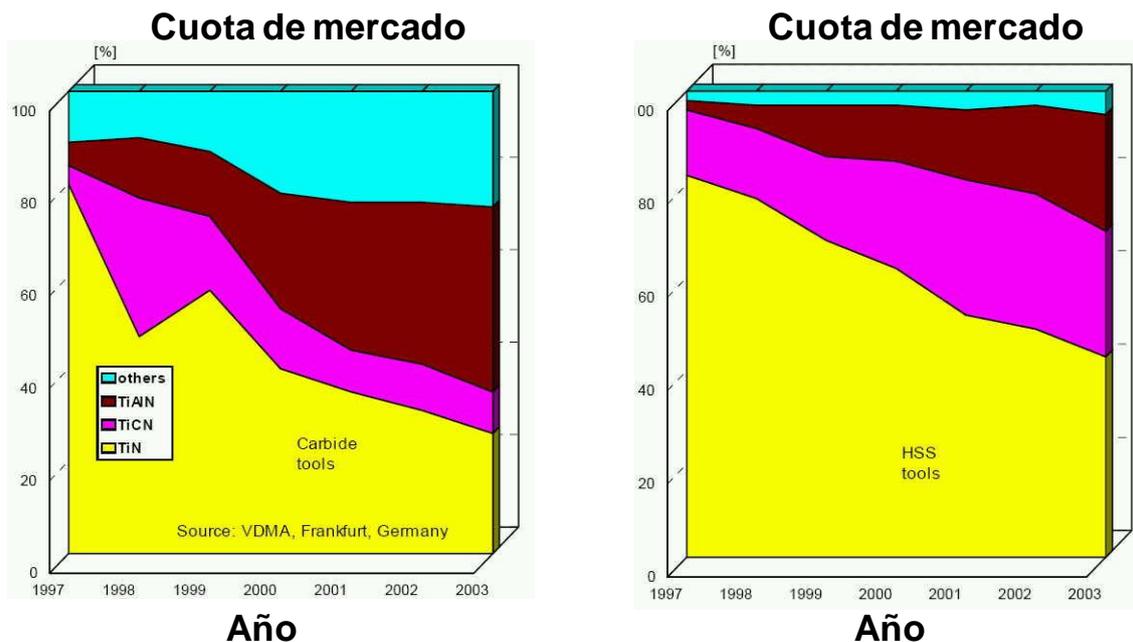
Los recubrimientos en las herramientas de corte buscan mejorar los siguientes aspectos [4]:

- Aumentar la **dureza superficial**.
- Aumentar la **resistencia al desgaste** abrasivo, adhesivo, al desgaste en flanco y en cráter.
- Reducir el **coeficiente de fricción** facilitando el deslizamiento de la viruta. Reduce la temperatura por rozamiento, las fuerzas de corte y previene la adhesión de material a la superficie de la herramienta.
- Reducir la **transmisión de calor** hacia la herramienta.
- Aumentar la **resistencia a la corrosión y oxidación**.

- Mejorar la **calidad de las superficies** mecanizadas.

La aplicación de capas duras en herramientas de corte se inició en los años 70, con los procesos de CVD (Chemical Vapor Deposition). No fue hasta mediados de los 80 cuando comenzó la utilización de los recubrimientos PVD (Physical Vapor Deposition), que permiten mayor variabilidad en la composición, siendo el Nitruro de Titanio (TiN) el primero en ser comercializado. En los años 90, surgieron nuevos recubrimientos como el Carbonitruro de Titanio (TiCN) y el Nitruro de Titanio Aluminio (TiAlN) de mejores características, más dureza, resistencia al desgaste y estabilidad térmica.

Los recubrimientos de PVD cuya base es el TiAlN, actualmente suponen más del 50% del mercado de las herramientas recubiertas (ver Figura 2.1) [5]. El desarrollo de este recubrimiento ha llevado a incrementar los porcentajes de aluminio, dando lugar al AlTiN (con contenido en aluminio superior al 50%), pero donde existe un límite, que se encuentra en el entorno del 67%, donde superarlo no aporta ningún beneficio [6].



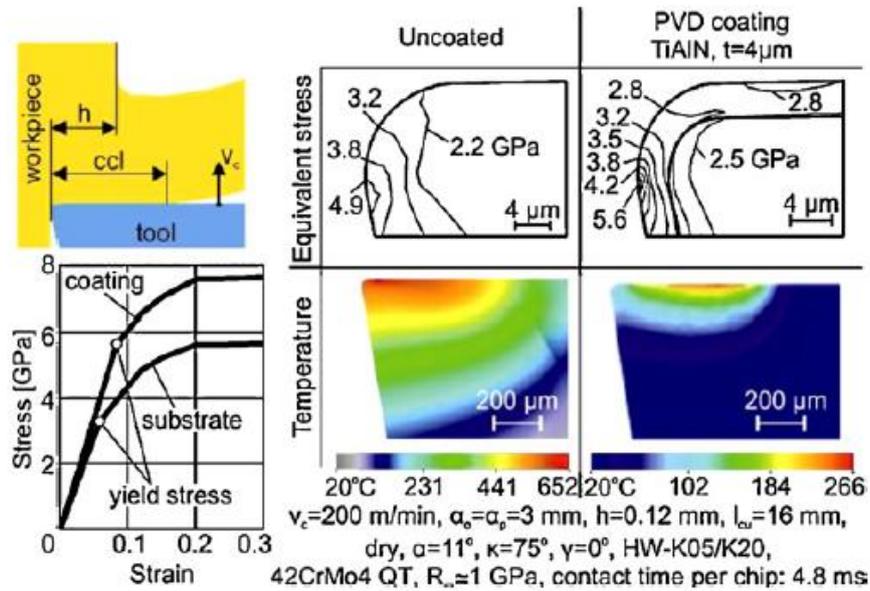
**Figura 2.1.** Cuotas de mercado de recubrimientos sobre herramientas de metal duro y de acero rápido [5]

En los últimos años ha surgido el desarrollo de recubrimientos nanoestructurados [7] para la aplicación en herramientas de corte, con elevada resistencia térmica y mayor dureza, destacando el TiAlN-TiSiN, de Hitachi, y el AlTiSiN (también conocido como nACo) , de Platit, con una estructura nanocomposite.

## 2.2. Procesos de recubrimientos actuales y tendencias

Las herramientas recubiertas tienen una estructura de material compuesto, que consiste en un sustrato cubierto con una capa dura, anti-fricción, químicamente inerte y aislante térmicamente, de unas pocas micras de espesor. Así, las herramientas recubiertas comparadas con las que no lo están, ofrecen una mejor protección contra cargas mecánicas y térmicas, disminuye la fricción e interacción entre herramienta y viruta, y mejora la resistencia al desgaste en un amplio rango de temperaturas de corte [8].

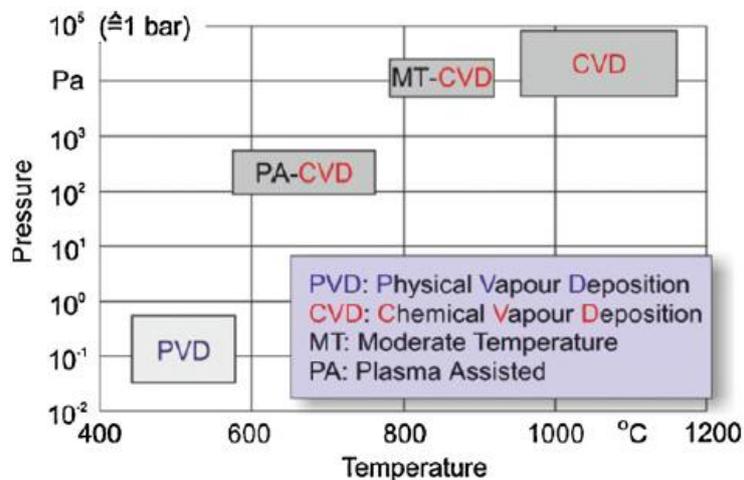
El elevado rendimiento de corte de las herramientas recubiertas también puede ser explicado por la acción de las cargas mecánicas y térmicas actuando en la cuña de corte durante el arranque de material. En un ejemplo de fresado de acero templado, la tensión máxima equivalente determinada en el recubrimiento por el método de elementos finitos (FEM) alcanza las 5.6 GPa en la redondez del filo de corte cerca del flanco, manteniéndose por debajo del límite de elasticidad de la película 5.9 GPa (ver Figura 2.2). Además el sustrato está menos tensionado (máxima tensión equivalente 3 GPa) comparado con una herramienta sin recubrir (4.9 GPa). En la herramienta sin recubrir, la tensión de 4.9 GPa excede el límite elástico de ca. 3.2 GPa, lo que conduce a la formación de micro-roturas y acelerar el crecimiento de desgaste en el filo de corte. La máxima temperatura en plaquitas recubiertas es de ca. 266°C, en un tiempo de contacto de 4.8 ms entre herramienta-viruta (ver Figura 2.2). En el caso de una herramienta sin recubrir, una cantidad comparativamente mayor del total de la energía térmica de corte es transferida durante el mismo tiempo de contacto entre viruta y herramienta, que conduce a un aumento significativo de la temperatura máxima hasta los 652°C. En corte interrumpido, dependiendo del tiempo de contacto de herramienta-pieza, la temperatura máxima de la herramienta es frecuentemente menor que la correspondiente a un proceso en estado estable de arranque continuo de viruta [9], [10], [11] y [12].



**Figura 2.2.** Disminución de las cargas mecánicas y térmicas de herramientas de metal duro en fresado por la aplicación de recubrimientos de PVD [13]

Actualmente, las mayores velocidades de corte y de avance, aumentan el calor generado, por lo que los proveedores de herramientas ponen el énfasis en el desarrollo de materiales de corte resistentes al calor y en recubrimientos inertes también a elevadas temperaturas, especialmente para procesos de corte con arranque continuo de material.

La Figura 2.3 presenta las tecnologías de deposición de recubrimientos para herramientas de corte, clasificadas según la presión y temperatura requerida para los procesos de recubrimiento.



**Figura 2.3.** Tecnologías de deposición de recubrimientos para herramientas de corte [14]

### 2.2.1. Tipos de recubrimientos

Los recubrimientos se pueden clasificar siguiendo distintos criterios, dada la gran variedad de técnicas que existen. Si se clasifican estas técnicas en función de cómo se produce la deposición en el sustrato [15], se pueden distinguir tres grupos:

- **Fase vapor:** El recubrimiento se produce a partir de una fase vapor que condensa.
- **Disolución:** El recubrimiento se sintetiza a partir de una disolución que precipita.
- **Fundido o semifundido:** el recubrimiento se produce a partir de una fase sólida o semi-sólida que precipita.

MÉTODOS DE DEPOSICIÓN DE RECUBRIMIENTOS		
FASE VAPOR	DISOLUCIÓN	FUNDIDO O SEMIFUNDIDO
<ul style="list-style-type: none"> <li>• CVD (Chemical Vapor Deposition)</li> <li>• PVD (Physical Vapor Deposition)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Electro-Química</li> <li>• Sol-Gel</li> <li>• Disolución Química</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Laser</li> <li>• Proyección térmica</li> <li>• Soldadura</li> </ul>

**Tabla 2.1.** Clasificación de los recubrimientos según el modo de deposición

Atendiendo a esta clasificación de las técnicas de recubrimiento (ver Tabla 2.1), y dependiendo de las aplicaciones, idoneidad de los procesos de fabricación y las características que aportan, se puede seleccionar la técnica o técnicas más adecuadas (ver Tabla 2.2).

Los procesos que se producen en fase vapor son el CVD (Chemical Vapor Deposition) o Deposición Química de Vapor, y el PVD (Physical Vapor Deposition) o Deposición Física de Vapor. La principal diferencia es que en el CVD se parte de un gas, y a través de una reacción química se genera un nuevo producto que se deposita en los sustratos, realizándose la deposición a una temperatura aproximada de 1000°C, mientras que en el PVD alguno de los materiales que van a formar parte del recubrimiento se evapora desde un sólido (“target”), depositándose sobre el sustrato a una temperatura de 500°C o inferior.

RECUBRIMIENTOS ELECTROLÍTICOS (CROMODURO)	RECUBRIMIENTOS CVD	RECUBRIMIENTOS PVD
<p>Los más conocidos. Se aplican desde hace décadas.</p>	<p>Usados desde los años 60-70.</p>	<p>Aparecen en el mercado de herramientas en los años 80.</p>
<p>Aplicaciones decorativas, componentes y algo en herramientas (deformación).</p>	<p>Se usan en diversidad de tipos de herramientas de corte, deformación, en materiales de acero o metal duro.</p>	<p>Herramientas de corte, deformación; materiales de acero o metal.</p>
<p>Durezas de hasta 1000 Vickers, mucho más pequeñas que las durezas de PVD o CVD.</p>	<p>Durezas hasta 4000 Vickers, parecidas a las de PVD, mucho mayores que las de cromoduro.</p>	<p>Durezas hasta 4500 Vickers, parecidas a las de CVD, mucho mayores que las de cromoduro.</p>
<p>Grado de adhesión mucho menor que la adhesión de recubrimientos de PVD o CVD.</p>	<p>Grado de adhesión mayor que la adhesión de recubrimientos PVD.</p>	<p>Adhesión PVD menor que la del CVD, pero mucho mayor que la del cromoduro.</p>
<p>Espesores aplicables (cientos de micras), mucho mayores que los espesores de PVD o CVD (en componentes o herramientas de precisión poco factible).</p>	<p>Espesores aplicables en CVD, mucho mayores que los de PVD, pero mucho menores que los de cromoduro.</p>	<p>Espesores de PVD menores que los de CVD, mucho menores que los de cromoduro (ideal en herramientas de precisión).</p>
<p>Procesos a T<sup>a</sup> amb. en medios ácidos. Flexibilidad de aplicación a diferentes metales y diferentes geometrías.</p>	<p>Procesos CVD a alta T<sup>a</sup> (1000°C). Problemas con acero (tratamiento térmico tras CVD), no aplicable a herramientas de precisión; redondeamiento de filos en herramientas de metal duro; grados de metal duro limitados.</p>	<p>Procesos PVD a baja T<sup>a</sup> (200-450°C); sin tratamientos térmicos posteriores; grados de acero y metales duros variados.</p>
<p>Enmascaramiento de algunas superficies de las piezas posibles.</p>	<p>Enmascaramiento de superficies complicado.</p>	<p>Enmascaramiento de superficies poco problemático.</p>
<p>Recubrimiento de superficies interiores sin problemas.</p>	<p>Recubrimiento de interiores sin problemas.</p>	<p>Superficies interiores depende del caso.</p>

**Tabla 2.2.** Comparativa de recubrimientos metálicos o cerámicos más extendidos para componentes y herramientas

### 2.2.2. Deposición PVD

En este punto se van a comentar las principales técnicas de deposición por la técnica PVD, prestando especial atención a la Técnica de Deposición por Arco Catódico, que es la más extendida en aplicaciones de herramientas y la que se utiliza en este proyecto de investigación.

El proceso de PVD, es un proceso de depósito atomístico, en el cual el material es vaporizado a partir de una fuente sólida o líquida en forma de átomos o moléculas a baja temperatura (entre 400°C y 500°C) [16], transportadas en forma de vapor a través de un ambiente gaseoso en vacío o a baja presión (plasma) hasta un sustrato donde el material se deposita, (ver Figura 2.4).

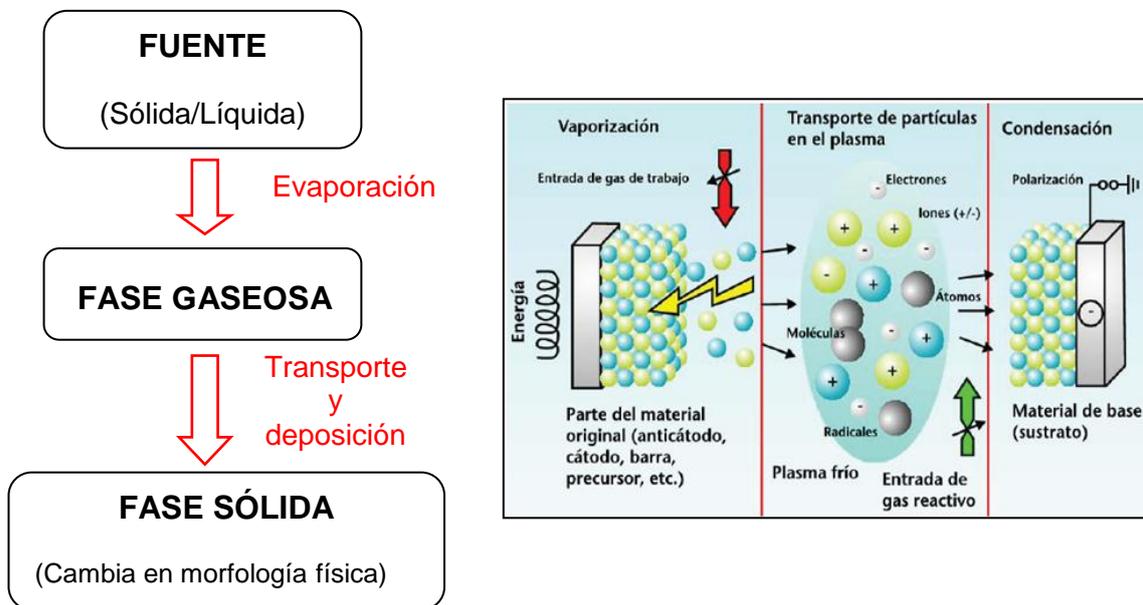
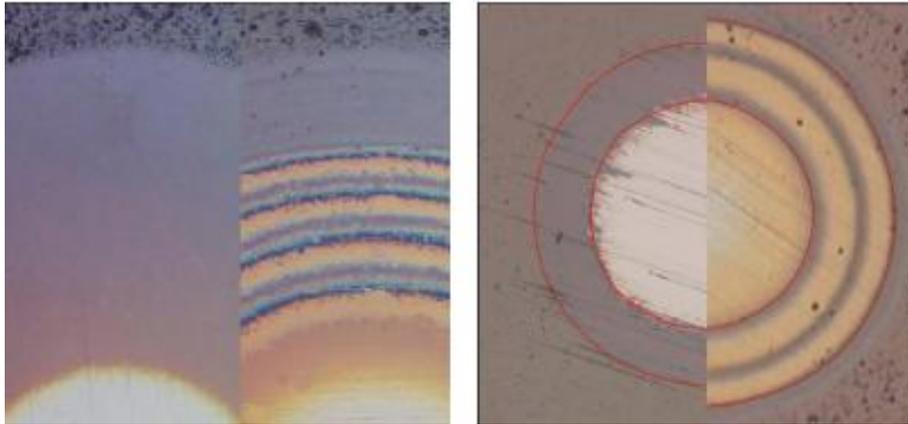


Figura 2.4. Diagrama de flujo del proceso PVD

Normalmente, el proceso de PVD es usado para depositar recubrimientos con espesores en un rango desde unos pocos a miles de nanómetros, con la posibilidad de formar recubrimientos con estructuras multicapa, de composición gradiente, nanoestructurados y combinación de éstos (ver Figura 2.5).

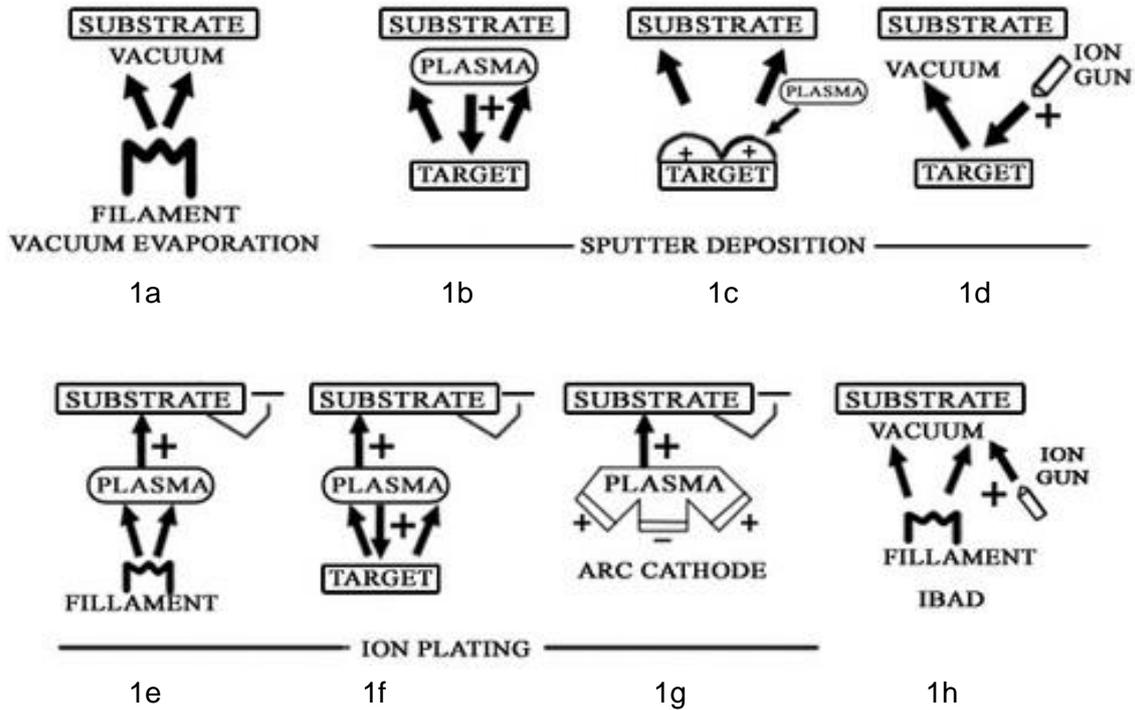


**Figura 2.5.** Imágenes de distintas estructuras de recubrimiento (monocapa y multicapa), depositados por la técnica PVD por Arco Catódico [17]

El proceso PVD se usa para depositar películas de elementos y aleaciones, así como de compuestos, usando un proceso de depósito que sea reactivo. En los procesos reactivos, los compuestos se forman por la reacción del material depositado con un ambiente gaseoso como el nitrógeno (ej. Nitruro de Titanio, TiN) o con un material co-depositado (ej. Carburo de Titanio, TiC) [18] y [19].

Las principales categorías de procesos PVD se ilustran en la Figura 2.6, las cuales son:

- Evaporación en Vacío
- Deposición por “Sputtering” (pulverización)
- Deposición Asistida por Iones (“Ion Plating”)

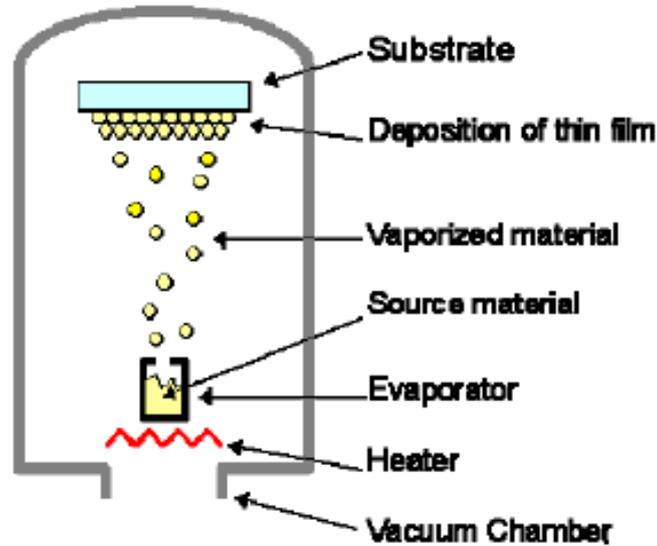


**Figura 2.6.** Técnicas de deposición por PVD, [18]:

- (1 a). Evaporación en Vacío
- (1b, 1c). Deposición por Sputtering en ambiente gaseoso-plasma
- (1d). Deposición por Sputtering en Vacío
- (1e). Deposición asistida por iones-Ion Plating en ambiente gaseoso-plasma con fuente térmica de evaporación
- (1f). Deposición asistida por iones-Ion Plating con fuente de Sputtering
- (1g). Deposición asistida por iones-Ion Plating con fuente de Arco de evaporación
- (1h). Ion Beam Assisted Deposition (IBAD) o Deposición por chorro de electrones con fuente térmica de evaporación y bombardeo de iones desde un cañón de iones

### 2.2.2.1. Evaporación en Vacío

La evaporación en vacío o también conocida como deposición en vacío es un proceso PVD en el que el material se vaporiza desde una fuente térmica, alcanzando el sustrato con muy poca colisión con las moléculas en el espacio entre la fuente y el sustrato. La trayectoria del material vaporizado es una proyección, “line-of-sight”, por lo que no se deposita el material en zonas que no estén orientadas al haz de partículas (ver Figura 2.7.).



**Figura 2.7.** Esquema de la técnica de deposición en vacío PVD

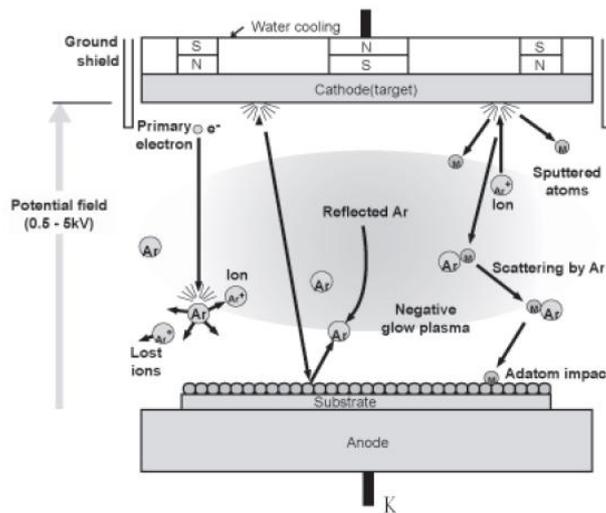
El sistema de vacío proporciona un ambiente que reduce la contaminación gaseosa en el sistema de deposición a niveles muy bajos. Normalmente, la deposición al vacío tiene lugar en el rango de presión de  $10^{-5}$  Torr a  $10^{-9}$  Torr dependiendo del nivel de contaminación de gases que puede tolerar el sistema de deposición [18].

La velocidad de deposición, con el sistema de vaporización-térmica es muy alta comparada con otros métodos de vaporización. El material vaporizado desde la fuente tiene una composición que es una proporción de la presión de vapor relativa del material en estado fundido. La vaporización térmica se hace generalmente usando calefactores espirales de tungsteno o por calentadores que emiten haces de electrones de alta energía. Los sustratos son montados a una distancia apreciable de la fuente de evaporación para reducir el calentamiento de los sustratos por la radiación de calor de la fuente de vaporización [18] y [19].

La deposición en vacío se usa para obtener recubrimientos de interfase óptica, para espejos, decorativos, membranas permeables, capas conductoras eléctricas, capas resistentes al desgaste, y capas protectoras a la corrosión.

### 2.2.2.2. Deposición por “Sputtering”

La deposición por “Sputtering” o pulverización, es la deposición de partículas vaporizadas de la superficie de un blanco (“target”), por el proceso de pulverización física. La pulverización física es un proceso no-térmico, donde los átomos de la superficie son físicamente eyectados desde el blanco (“target”) por la transferencia de momento de una partícula energética de tamaño atómico que bombardea el blanco (“target”), que usualmente es un ión gaseoso acelerado por una diferencia de potencial (ver Figura 2.8) [19], [20] y [21].



**Figura 2.8.** Esquema de la técnica de deposición por “Sputtering” o pulverización PVD

La deposición por sputtering se puede realizar por el bombardeo iónico de partículas de la superficie de un blanco (“target”) en vacío usando un cañón de iones o de plasma de baja presión (<5 mTorr), donde las partículas proyectadas tienen muy pocas colisiones con la fase gaseosa en el espacio entre el blanco (“target”) y el sustrato [22] y [23].

El plasma usado en sputtering puede ser confinado cerca de la superficie a recubrir o podría encontrarse en la zona entre la fuente y el sustrato. La fuente de sputtering (electrodo) puede ser un elemento, una aleación o un compuesto. El blanco (“target”) proporciona una larga vida a la fuente de vaporización que puede ser montada, así como vaporizarse en cualquier dirección [18].

La deposición por sputtering es ampliamente usada para la metalización de películas delgadas sobre materiales semiconductores, recubrimiento de cristal en arquitectura,

recubrimiento reflectante sobre compact discs, películas magnéticas, películas lubricantes secas, y recubrimientos decorativos [24] y [25].

### 2.2.2.3. Deposición asistida por iones, “Ion Plating”

La deposición asistida por iones (IAD, Ion Assisted Deposition) o deposición de vapor de iones (IVD, Ion Vapor Deposition) también llamada Ion Plating, utiliza de modo continuo o periódico el bombardeo de la película que se deposita con partículas energéticas de tamaño atómico, para modificar y controlar las propiedades de la película depositada o recubrimiento. La deposición del material puede ser vaporizada por evaporación, sputtering, erosión por arco, o por descomposición química de un gas precursor (ver Figura 2.9).

La deposición Ion Plating, se puede hacer en un plasma donde los iones para el bombardeo son extraídos del propio plasma o puede hacerse en vacío, donde los iones para el bombardeo son formados separadamente en un cañón de iones. La última configuración Ion Plating es frecuentemente llamada Ion Beam Assisted Deposition (IBAD) o chorro de electrones [18].

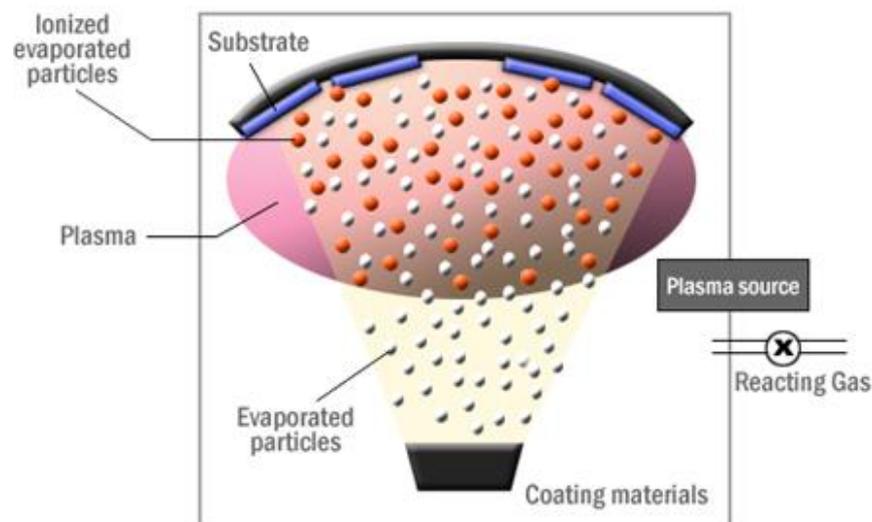


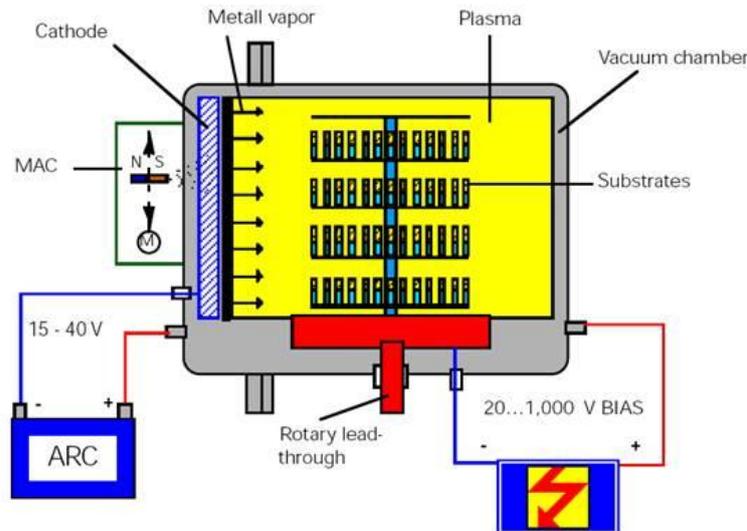
Figura 2.9. Esquema de la técnica de deposición por Ion Plating

### 2.2.2.4. Deposición por Arco de vaporización, o Arco catódico

Este proceso es de gran relevancia en este proyecto de investigación, ya que ha sido la técnica utilizada para los recubrimientos realizados. Por tanto, se dará un mayor énfasis en esta tecnología, que además tiene un gran potencial en los recubrimientos de herramientas, basado en su simplicidad, fácil implementación, bajo coste de

operación y rapidez. Sobresale por la buena adhesión a los sustratos debido a la muy alta tasa de ionización [26] y [27].

La técnica de PVD por depósito por arco usa la vaporización de un electrodo, mediante arco eléctrico, como fuente de material de vaporización [28], [29], [30], [31] y [32]. El arco precisa una alta corriente, bajo voltaje de corriente eléctrica pasando a través de un gas o vapor del material del electrodo. El voltaje del arco debe ser cercano al potencial de ionización del gas o vapor (>25 volts) [18].



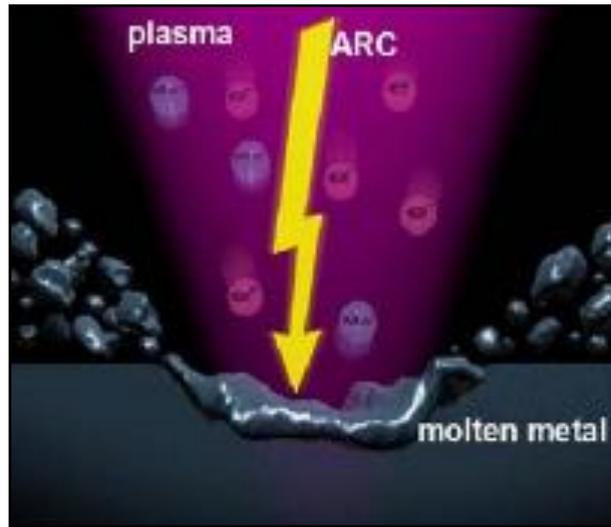
**Figura 2.10.** Esquema general de la técnica de deposición por Arco catódico PVD

El ión bombardea al cátodo y el electrón bombardea al ánodo calentando de esta manera los electrodos. La mayoría del material eyectado es evaporado térmicamente pero una parte del material es eyectado en forma de gotas fundidas (“droplets”) o partículas sólidas desde el cátodo. Un gran porcentaje de los átomos vaporizados son ionizados en el proceso de vaporización por arco.

Para que se forme un arco estable, debe existir un mínimo de corriente pasando a través del arco. El valor de la corriente varía desde 50-100 A para materiales con bajo punto de fusión, tales como el cobre y titanio, hasta 300-400 A para materiales refractarios, como el tungsteno. El voltaje del arco puede estar entre 15 a 100 volts dependiendo de la facilidad de movimiento del electrón desde el cátodo hasta el ánodo [18]. La Figura 2.10 muestra un esquema general de la técnica de deposición por arco catódico [15] y [32].

Los problemas que supone el uso de esta técnica, se fundamentan en la estabilización y movimiento del arco sobre la superficie del sólido, y la formación de “droplets”

fundidos de tamaño micrométrico, que son eyectados desde la superficie sólida (ver Figura 2.11), [26], [27] y [33].



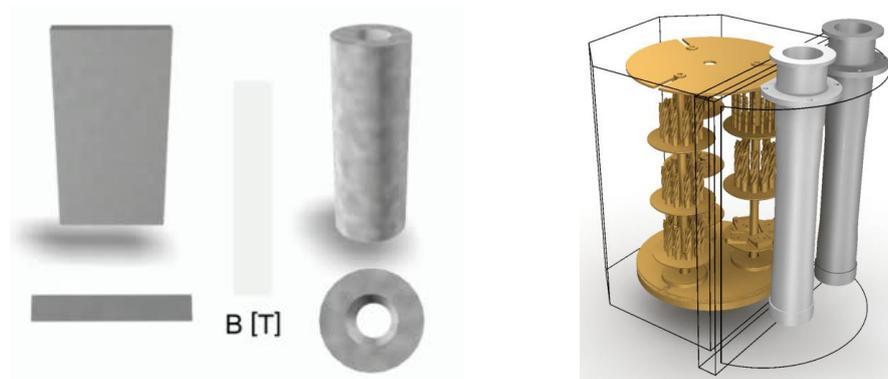
**Figura 2.11.** Esquema del depósito de iones sobre el sustrato y la formación de “droplets” durante el depósito por Arco catódico PVD [17]

El arco puede moverse de manera aleatoria sobre la superficie, en cuyo caso, la fuente es llamada una fuente de arco aleatoria; o por el contrario, si el arco es confinado y obligado a moverse sobre la superficie en una dirección particular, la fuente es llamada fuente de arco dirigido.

La gran densidad de electrones sobre el sólido del arco catódico forma un foco que normalmente se mueve sobre la superficie hasta que éste se extingue. Si la densidad de corriente es muy alta, el arco se dispersará formando dos o más focos. Durante el movimiento aleatorio, el foco del cátodo debe atacar a una superficie protuberante o a una región de alta emisión de electrones hasta vaporizar completamente la región.

La composición del gas y la presión, el material del cátodo y sus impurezas, y la presencia de campos magnéticos, afectan al movimiento del arco sobre el cátodo. Si no hay campos magnéticos, el arco se mueve de una manera completamente aleatoria. Si el cátodo es un disco, estadísticamente el arco está mayormente en el centro y la erosión se producirá en el centro del disco. Si hay un campo magnético débil perpendicular a la superficie del cátodo, el arco trazará una espiral aleatoria en la superficie, pero si el campo magnético es fuerte, el movimiento del arco será determinado por el ángulo que forma el campo magnético con la superficie.

El electrodo es uno de los elementos más importantes en el sistema de deposición por arco. Existen diversas formas geométricas para este elemento, discos con diámetros están entre los 50 y 150 mm, y rectangulares, con medidas que pueden ir entre los 100-150 mm por 500-1000 mm [26]. En los últimos años, también están siendo utilizados cátodos rotativos con forma cilíndrica, como una alternativa a los más tradicionales de forma plana, ya sean discos o rectangulares (ver Figura 2.12) [17].



**Figura 2.12.** Cátodos planos y rotativos [17]

Los electrodos para materiales costosos son pequeños (Hf, W, etc.). Sin embargo, hay varios factores importantes a tener en cuenta en su elección como: la carga térmica, la emisión de “droplets”, la implementación de un eficiente y bien definido campo magnético y el uso de varias fuentes durante la deposición.

Para electrodos de tamaños grandes, se han desarrollado geometrías rectangulares, con ciertas ventajas como, una velocidad de evaporación constante, una erosión más homogénea y la posibilidad de adaptar diferentes sistemas que permitan una variedad de configuraciones a partir del material, la corriente de arco y otros parámetros del proceso [27].

En el depósito por arco reactivo, la generación del plasma se hace en presencia de un gas que también se ioniza y reacciona con los elementos presentes en el cátodo durante la deposición. Normalmente, la deposición se hace en un plato iónico, por ejemplo, los iones tanto del material a depositar y el gas reactivo son acelerados hacia el sustrato [34], [35] y [36]. Como la vaporización de los electrodos no se realiza mediante impacto iónico, como en el caso del “sputtering”, no es necesario limpiar el sustrato. Para ayudar a mantener el arco, cuando la composición de la película depositada es graduada, se debe usar una presión parcial de gas inerte, controlando así la disponibilidad del gas reactivo.

Sobre los materiales de los cátodos, estos deben estar realizados a partir de un material completamente denso. Se deben evitar la fabricación de cátodos a partir de polvo compactado, porque no generan un arco estable, eyectándose desde su superficie partículas del tamaño del polvo de partida.

Una de las ventajas que ofrece este método de vaporización por arco, es que proporciona una mayor velocidad de vaporización que el método de “sputtering” [37] (ver Tabla 2.3). La vaporización desde la superficie del sólido permite a la fuente de arco catódico ser montada sin ninguna configuración. La producción de abundante gas e iones, proporcionan un gran flujo de estos hacia el sustrato, permitiendo modificar las propiedades de la película por el continuo bombardeo durante el depósito.

PARÁMETROS	ARCO CATÓDICO	SPUTTERING	BOMBARDEO DE ELECTRONES
Tipos de evaporación	Arco térmico	Efecto sputter	Bombardeo de electrones
Transformación de fases	Sólido-Vapor	Sólido-Vapor	Líquido-Vapor
Geometría del cátodo	Ilimitado	Ilimitado	Limitado
Cantidad de átomos ionizados (%)	50-100	1-5	< 1
Droplets	Si	No	No
Gas inerte (necesario)	No	Si	Variable

**Tabla 2.3.** Comparación de los parámetros típicos de diferentes procesos PVD

La limitación o desventaja de esta técnica es básicamente la formación de pequeñas gotas ó “droplets” que son depositados sobre la superficie del sustrato, que generan una rugosidad superior a la superficie original. Esta rugosidad puede tener un efecto negativo sobre las fuerzas de corte ya que al aumentar, el coeficiente de fricción aumenta.

Las aplicaciones de la deposición por Arco Catódico son muy variadas, pero principalmente se utilizan para la deposición de recubrimientos duros resistentes al desgaste (ver Figura 2.13) [31], [32], [38], [39], [40], [41], [42] y [43].



**Figura 2.13.** Herramientas recubiertas por Arco Catódico PVD [17]

### **2.2.3. Propiedades de los recubrimientos**

El primer recubrimiento comercial de PVD fue el nitruro de titanio (TiN), y desde entonces la mayoría de los recubrimientos industriales se han basado en nitruros. En 1979, la producción de recubrimientos de TiN, se basó en la tecnología de recubrimiento iónico por chorro de electrones, industrialmente aplicada por primera vez en recubrimientos de herramientas de corte. La siguiente generación de recubrimientos, ampliamente usada en aplicaciones industriales, fueron el nitruro de cromo (CrN) y el carbonitruro de titanio (TiCN). La evolución al TiAlN, añadiendo aluminio a la composición base del TiN, proporcionó no solo una mayor dureza, sino también una importante mejora de resistencia a alta temperatura e inertividad. Ambas propiedades, dureza con calor y resistencia a la oxidación hasta aproximadamente 900 °C, contribuyeron a la mejora de las principales condiciones de corte.

La siguiente evolución de los recubrimientos TiAlN, es conocido como recubrimientos de AlTiN, por su alto contenido en Al, lo que implica una mejor resistencia térmica. La dureza de los recubrimientos AlCrN es similar a los de TiAlN, pero lo que lo hace excepcional es su alta adhesión debido al alto contenido de Cr, así como su alta resistencia a la oxidación, hasta 1200°C. Además, una nueva tendencia de mecanizar a altas temperaturas fue la aplicación de Si en la composición de películas. Los recubrimientos basados en AlCrSiN han sido satisfactoriamente aplicados en tallado,

taladrado y fresado, donde se requiere alta resistencia de temperatura y resistencia a la oxidación de los recubrimientos [13].

Desde un punto de vista del material, recubrimientos de aleaciones de TiAlN con diferentes elementos (dopantes) abre un camino a un sinfín de composiciones: TiAlCrN, TiAlCrSiN y TiAlCrYSiN, añadiendo también Zr, V, B o O [44] y [45]. La Figura 2.14, muestra la evolución en el tiempo de los tipos de recubrimiento y las tecnologías de deposición aplicadas.

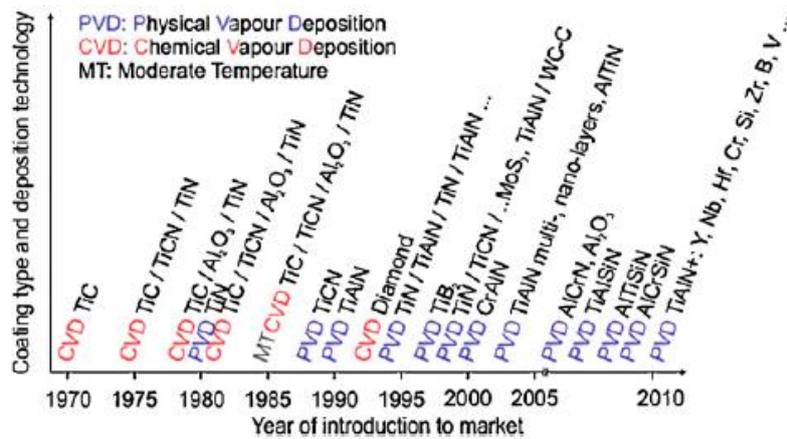
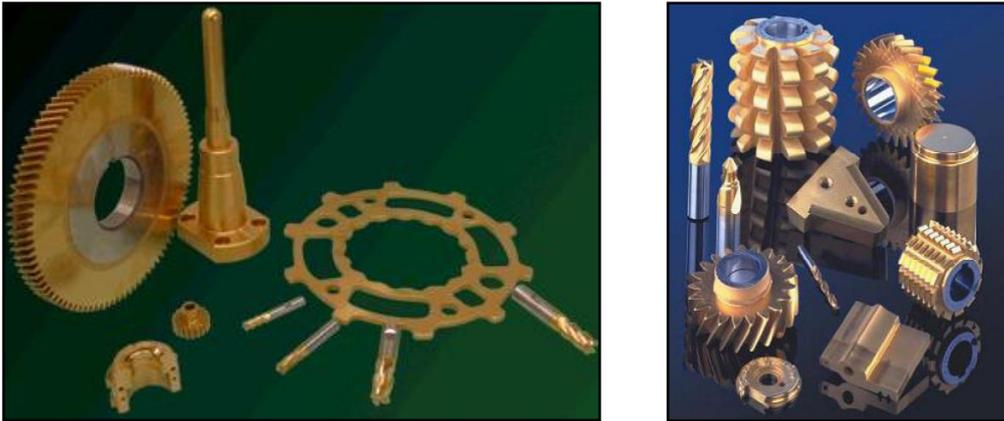


Figura 2.14. Evolución de los materiales de recubrimiento para las herramientas de corte [13]

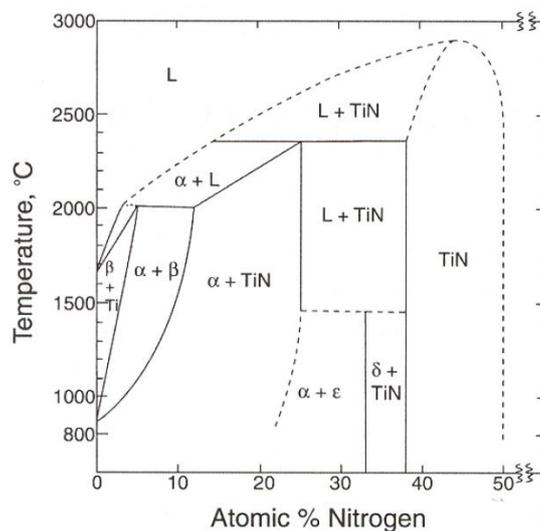
### 2.2.3.1. Recubrimiento TiN

El recubrimiento de nitruro de Titanio ha sido extensamente estudiado y usado para evitar el desgaste de las herramientas por sus propiedades. Tiene una estructura cúbica del tipo B1 NaCl, es de color amarillo oro (ver Figura 2.15), y existe como solución sólida con un contenido de nitrógeno que está en el rango de 37.5 – 50% [46], (ver Figura 2.16). Su densidad es baja, 5.22 gr/cm<sup>3</sup>, y su punto de fusión es de 2930°C [16].



**Figura 2.15.** Herramientas recubiertas con TiN [17]

Las características del TiN son: una excelente adhesión al sustrato, baja reactividad química, resistencia a altas temperaturas, alta dureza (2400 HV) para reducir el desgaste, bajo coeficiente de fricción con la mayoría de los materiales normalmente usados, con lo cual se incrementa la lubricidad, lo que mejora la superficie de acabado, aumenta la capacidad de mantener tolerancias y la estabilidad a alta temperatura, y aumenta la resistencia a la oxidación [16], [32], [38], [39], [40], [41], [47], [48] y [49].



**Figura 2.16.** Diagrama de fases en equilibrio del sistema binario Ti-N [46]

La vida de una herramienta puede aumentar considerablemente con el uso de este recubrimiento en comparación con la herramienta sin recubrir. En algunos casos el aumento del tiempo de vida ha llegado a ser de hasta un 1000%, básicamente porque

este recubrimiento actúa como barrera frente a la difusión entre los materiales que constituyen la herramienta y la viruta [16].

Las propiedades químicas del TiN y de los recubrimientos en general son función de la microestructura, la morfología, la densidad y la estequiometría. Las propiedades físicas y mecánicas más importantes de un recubrimiento, para las aplicaciones de mecanizado son, el espesor del recubrimiento, densidad (o porosidad), dureza, adhesión, resistencia a la temperatura, desgaste, resistencia a la corrosión y oxidación, etc.

Los espesores usados en herramientas de corte suelen ser de 3 a 5 micras, típicos de la técnica de deposición PVD. Su estructura es habitualmente columnar y los tamaños de grano suelen ser del mismo espesor que el recubrimiento. Estas estructuras columnares se suelen caracterizar por la alta porosidad que generan, lo que afecta negativamente a las propiedades mecánicas de la película.

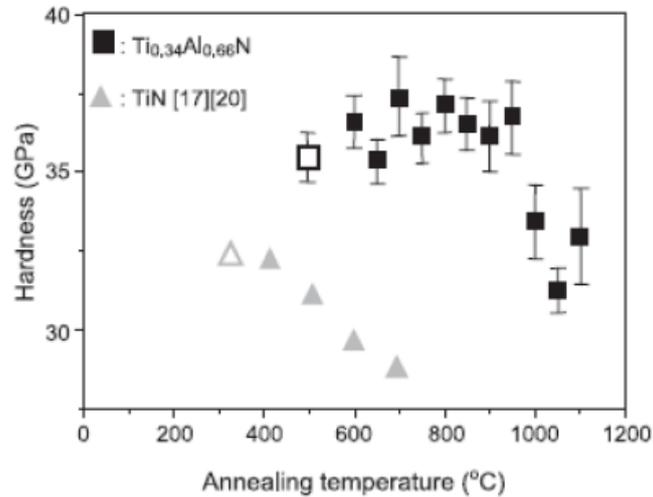
Los parámetros de la deposición afectan de manera significativa en la estequiometría. Por ejemplo, el color del TiN es función de la velocidad de flujo del nitrógeno y del potencial usado [50], pudiendo variar del amarillo oro, al color plata, o al color cobre. La variación de la estequiometría de TiN da diferencias sobre las propiedades mecánicas, donde la dureza y la adhesión son las más comunes. Según la estequiometría, se han observado valores de durezas de 22 a 69 GPa, y el módulo de Young entre 350 y 550 MPa [51].

La temperatura de deposición es determinante para obtener ciertas propiedades mecánicas. Diversos estudios concluyen que las mejores propiedades para el TiN se obtienen con una temperatura de deposición de 400°C, mediante las técnicas de PVD [52] y [53].

Por tanto, el TiN ofrece una buena adhesión al sustrato, una gran dureza, y un bajo coeficiente de fricción, ideal para aplicaciones de mecanizado. Sin embargo, la estabilidad térmica es limitada y la oxidación del recubrimiento empieza a temperaturas entre 500 a 600°C [54]. Esta es la razón por la que adiciones de otros elementos al TiN, por ejemplo Al, pueden mejorar el rendimiento de un recubrimiento.

### 2.2.3.2. Recubrimiento (Ti, Al)N

Distintos estudios demuestran que la adición de aluminio al recubrimiento TiN, puede mejorar las propiedades, en especial, a alta temperatura (ver Figura 2.17 ) [55], [56] y [57].



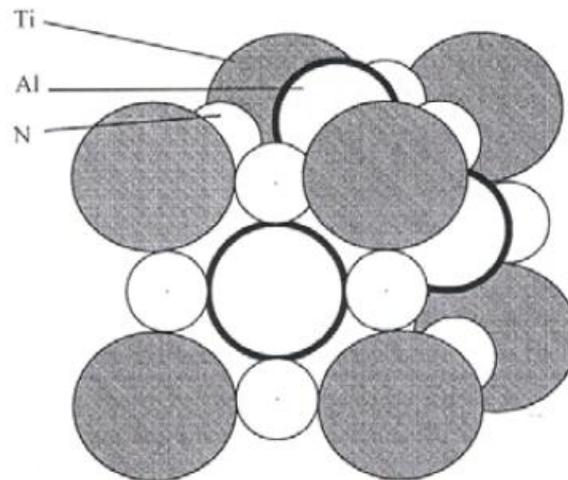
**Figura 2.17.** Influencia de un tratamiento térmico sobre la dureza del recubrimiento AlTiN y TiN [55]

Se observó que el compuesto formado,  $Ti_{1-x}Al_xN$ , tiene una mayor resistencia a la oxidación, lo que permitió incrementar las velocidades de corte en el mecanizado, aumentando la vida de la herramienta, así como el mecanizado de materiales más duros [32] y [38]. El recubrimiento AlTiN tiene una apariencia oscura (ver Figura 2.18).



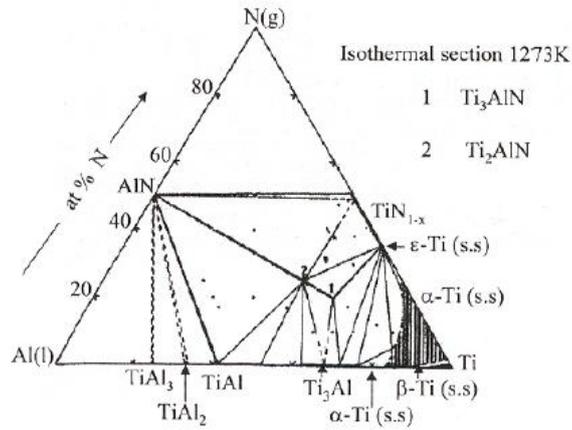
**Figura 2.18.** Herramientas recubiertas con AlTiN [17]

El sistema  $\gamma$ -TiAl tiene una estructura L1<sub>0</sub>, que es una estructura cúbica centrada en las caras-fcc, con una ligera distorsión tetragonal ( $c/a=1.02$ ) [32]. Esta estructura cambia completamente a la estructura de TiN cuando se forma (Ti, Al)N. El compuesto (Ti, Al)N es el resultado de la sustitución de átomos de Ti por átomos de Al en la estructura B1-NaCl (estructura fcc) del TiN. Como resultado de esta sustitución, el parámetro de red decrece gradualmente de 4.23 a 4.17 Å, cuando aumenta el contenido de Al, ya que el tamaño atómico del Al es más pequeño que el Ti [58] y [59]. Una representación esquemática de la red del (Ti,Al)N, (ver Figura 2.19), indica que el Al reemplaza algunos sitios del Ti del compuesto TiN.



**Figura 2.19.** Monóculo de TiN con incrustaciones de átomos de Al [32]

En cuanto a la información disponible del diagrama de fases ternario, ésta es muy limitada. La fase mayoritaria obtenida en los recubrimientos AlTiN no es una fase en equilibrio. Sin embargo, co-existen dos fases ternarias a 1000°C con una composición aproximada de  $Ti_3AlN$  y  $Ti_2AlN$ . El  $Ti_3AlN$  tiene una estructura cúbica con un parámetro de red de  $a=4.112$  Å. Este compuesto coexiste con  $TiN_{1-x}$ ,  $Ti_3Al$  y  $Ti_2AlN$ . El parámetro de red de la fase hexagonal  $Ti_2AlN$  es  $a=2.991$  Å y  $c=13.621$  Å. Esta fase coexiste con las fases  $TiN_{1-x}$ ,  $Ti_3AlN$ ,  $TiAl$  y  $AlN$  a 1000°C (ver Figura 2.20) [60].



**Figura 2.20.** Diagrama de fases ternario Ti-Al-N a 1273K

La máxima solubilidad del Al en el compuesto metaestable  $(\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x)\text{N}$  es aproximadamente  $x=0.6-0.7$  [58]. La estructura cambia al tipo wurtzita del compuesto AlN a composiciones por arriba de  $x=0.7$  [32].

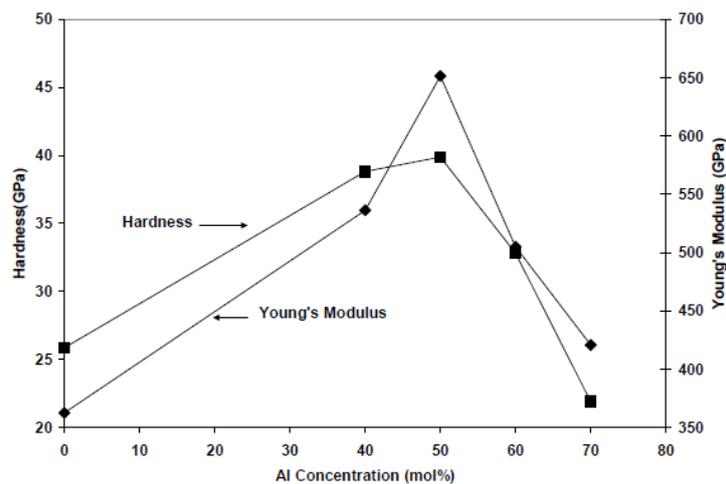
El mecanismo responsable del excelente desempeño durante el corte con recubrimientos de  $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$  está asociado con la resistencia a la oxidación del recubrimiento. El aumento del contenido de aluminio en el compuesto  $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$  muestra una mayor resistencia a la oxidación, debido a la formación de una película densa de  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  sobre la superficie del recubrimiento [56] y [61]. Como se mencionó en el apartado anterior, el TiN se oxida a temperaturas entre 500 y 600°C, mientras que la oxidación del  $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$  comienza a temperaturas entre 750 y 900°C [62].

La solubilidad del AlN en el TiN es extremadamente baja y solamente a 2427°C, ésta alcanza aproximadamente el 5% molar [63]. Para mayores fracciones de AlN, o a temperaturas más bajas, el sistema en equilibrio consiste en TiN cúbico (c-TiN) y AlN hexagonal (h-AlN). Sin embargo, el compuesto  $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$  puede ser depositado como una estructura cúbica metaestable [38] y [56]. Durante el mecanizado, las temperaturas generadas durante el corte pueden llegar a los rangos antes citados y descomponer dicha fase metaestable produciendo las fases de equilibrio c-TiN y h-AlN. Una vez formada la fase h-AlN, la resistencia al desgaste del recubrimiento se deteriora, debido a que esta estructura hexagonal es blanda [38].

Un estudio anterior midió el volumen ocupado por un átomo en las estructuras “wurtzite” y “rocksalt” (NaCl) y se encontró que el volumen en la estructura formada en la wurtzite es aproximadamente 20% mayor que en la estructura NaCl [64]. Esta transformación de la estructura del recubrimiento produce tensiones residuales

asociadas a un cambio de volumen positivo, por lo tanto, conduce a una aceleración de la velocidad de desgaste de la herramienta o incluso a fallos cohesivos del recubrimiento. Es muy importante encontrar una composición adecuada de recubrimiento, a la vez que unas condiciones óptimas durante el proceso, que eviten la separación de fases durante el depósito, para que el recubrimiento depositado pueda mantener su estabilidad mecánica a regímenes de temperaturas altos, es allí donde la técnica de depósito por arco catódico se hace muy importante debido a que las temperaturas de depósito son bajas,  $T < 500^{\circ}\text{C}$  [17].

La dureza del (Ti,Al)N depende del contenido de Al en la película. La Figura 2.21 muestra que la dureza y el módulo de Young aumenta cuando el contenido de Al aumenta, alcanzando su máximo valor a una concentración de Al del 50%. Las propiedades sin embargo caen drásticamente por encima del 50% de Al debido a la formación de la fase hexagonal "wurtzite".



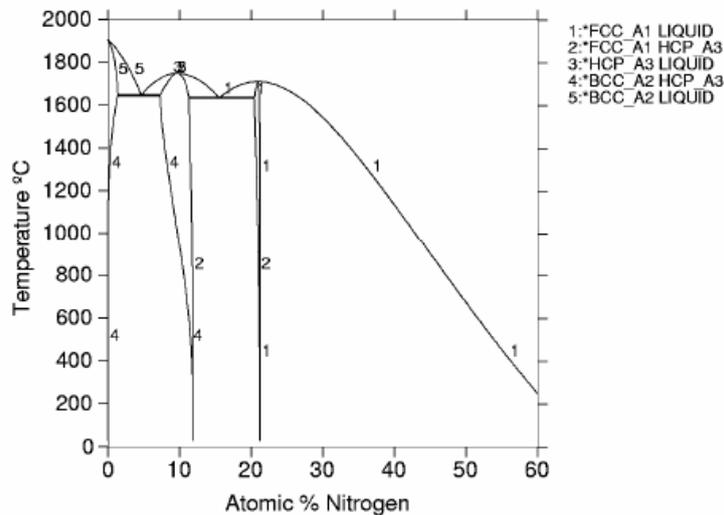
**Figura 2.21.** Dureza y módulo de Young en función del contenido de Al en un sistema  $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$  [65]

El aumento de la dureza puede explicarse por la disminución de la distancia interatómica producto de la adición de Al, la cual está asociada con el incremento de la energía covalente del sistema  $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$  [47].

### 2.2.3.3. Recubrimiento CrN

El recubrimiento de CrN puede ser producido en un amplio rango de durezas y estructura de fases (ver Figura 2.22), teniendo solamente una fase simple de CrN (estructura fcc y bcc) ó Cr<sub>2</sub>N (estructura hcp) ó una mezcla de estas fases, dependiendo principalmente de la presión parcial del nitrógeno y del método de deposición [66], [67], [68], [69], [70] y [71]. Tiene una apariencia gris como se puede ver en la Figura 2.23.

La orientación preferencial en la dirección 220 ha sido reportada por varios autores a partir de la técnica de deposición por arco catódico [72], [73], [74] y [75], aunque las direcciones 200 y 111 también han sido observadas [72].



**Figura 2.22.** Diagrama de fases en equilibrio del sistema binario Cr-N calculado con el programa Thermo-calc versión TCW<sub>4</sub>

Este recubrimiento es empleado satisfactoriamente en operaciones de conformado, principalmente para mecanizado de aleaciones de cobre [76] y [77], etc., ya que muestra mayor capacidad de deformación plástica que los recubrimientos anteriormente mencionados. Además se caracteriza por su alta ductilidad en diferentes aplicaciones como flexión e indentación entre otras [42].



**Figura 2.23.** Imagen de herramientas recubiertas con CrN [17]

Su principal característica es la buena resistencia a la corrosión y sus buenas propiedades frente a la oxidación [78], [79], [80], [81], [82], [83], [84] y [85], que combinada con las propiedades que exhibe de dureza y desgaste, hacen del CrN un material apropiado para el mecanizado de materiales [86] y [87].

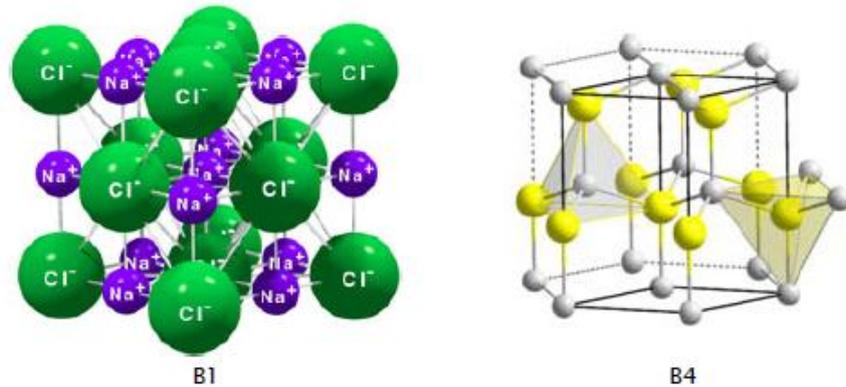
Algunos autores, sin embargo, reportan un alto porcentaje de desgaste del CrN comparado con otros recubrimientos debido a la poca adhesión con el sustrato, incluso comparándolo con una herramienta sin recubrir [80]. Este comportamiento puede estar relacionado con las fases presentes en el recubrimiento que a su vez depende del porcentaje de nitrógeno y en general de la estequiometría del CrN [87].

#### **2.2.3.4. Recubrimiento (Cr, Al)N**

Al igual que en el caso del AlTiN, la aplicación de las técnicas de depósito por arco catódico han permitido la introducción del Al en la red del CrN generando los recubrimientos denominados AlCrN. Estos nitruros mixtos, aunque también son metaestables como el AlTiN, alcanzan niveles de dureza semejantes y los mantienen a temperaturas de hasta 1050°C (150°C por encima de la temperatura máxima de uso descrita para el AlTiN). Este comportamiento se asocia a la estabilización de la fase cúbica AlN aún a altas concentraciones de aluminio [88].

Se ha observado que la dureza del  $Al_xCr_{1-x}N$  aumenta cuando en la composición, el contenido de aluminio aumenta ( $x=0.75$ ); si este límite se excede, parte de la fase cúbica se transforma en hexagonal tipo wurtzita, que es mucho más blanda [89] (ver Figura 2.24). Cabe recordar que este comportamiento ya se había descrito para el

caso de AlTiN, con la salvedad de que en este caso el límite de solubilidad para el Al en la red del TiN era inferior.



**Figura 2.24.** Tipos de estructura cristalinas para el AlCrN según el contenido de AlN, NaCl (B1) y wurtzita (B4)

De acuerdo con los trabajos de diversos autores [90], [91] y [92], la transición entre fases B1 y B4 ocurre entre el 67 y 75% mol de contenido de AlN. La presencia de la fase B4 disminuye la tenacidad del recubrimiento, aunque a veces se fuerza su aparición por buena conductividad térmica [90].

Otra propiedad interesante de este recubrimiento es su excelente resistencia a la oxidación que se debe a la formación de óxidos pasivantes de cromo y aluminio que limitan la difusión del oxígeno hacia el interior del recubrimiento [88], [89], [91] y [93]. Esta propiedad, unida a las ya citadas, hacen del AlCrN un recubrimiento de los más utilizados en aplicaciones tribológicas [88] y [94].

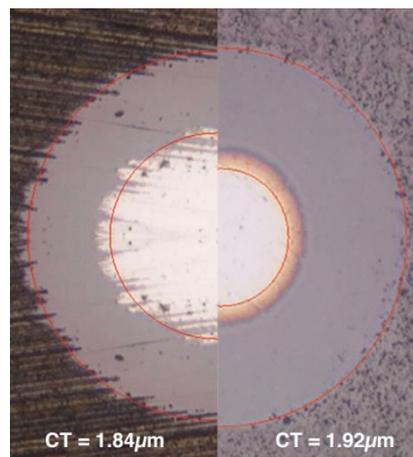
#### 2.2.4. Estructuras y combinación de capas

Los recubrimientos pueden tener distintas estructuras, dependiendo de cómo se aplique sobre el sustrato, siendo las más destacadas: monocapa, multicapa, gradiente, nanocapa, nanocomposite y estructuras combinadas (estructura de doble, triple,... recubrimiento), de forma que se pueden combinar las propiedades individuales de cada una de las capas para obtener un recubrimiento mejorado [17].

Son numerosos los estudios que analizan el efecto positivo de las distintas estructuras y combinaciones de los recubrimientos que tienen sobre el rendimiento de las herramientas de corte [47], [95], [96] y [97].

### 2.2.4.1. Monocapa

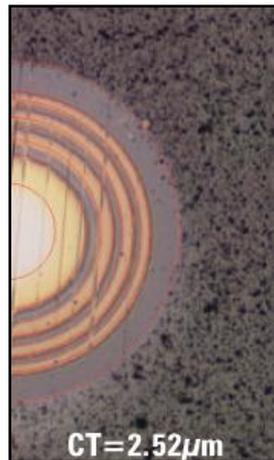
Los recubrimientos monocapa son los más sencillos de obtener y los más antiguos. Constan de una única capa, aunque a menudo incluyen también una capa de adhesión (ver Figura 2.25) [17]. Esta capa de adhesión será de Ti si el recubrimiento es TiN, TiAlN, TiCN, etc, ó de Cr si el recubrimiento es CrN, AlCrN, etc., y es así porque proporcionan una óptima adherencia al sustrato, garantizando que no se desprenda el recubrimiento durante su uso, aportando las características para las que fue creado.



**Figura 2.25.** Estructura monocapa. Izqda. Sin capa de adhesión. Dcha. Con capa de adhesión [17]

### 2.2.4.2. Multicapa

Los recubrimientos multicapa constan de dos capas de materiales diferentes que se depositan sobre el sustrato de forma alternada y generalmente periódica (ver Figura 2.26) [17]. Al igual que los anteriores suele tener una primera capa de adhesión contigua al sustrato. El espesor de las capas varia, pero se pueden producir capas con espesores de 1nm o menos. Estos recubrimientos presentan ventajas sobre los recubrimientos monocapas depositados en condiciones similares: muestran un aumento en su dureza al mejorar la resistencia a la propagación de las grietas; la relajación de las tensiones del recubrimiento disminuyen la acumulación de esfuerzos compresivos, los cuales, aumentan con el espesor de los recubrimientos monocapa; presentan mejores propiedades tribológicas al aumentar la adhesión; el depósito periódico de capas restringe el crecimiento de grano columnar. Estas ventajas conducen a minimizar la delaminación y fractura frágil que se puede dar en los recubrimientos monocapa [98] y [99].



**Figura 2.26.** Estructura multicapa [17]

### 2.2.4.3. Gradiente

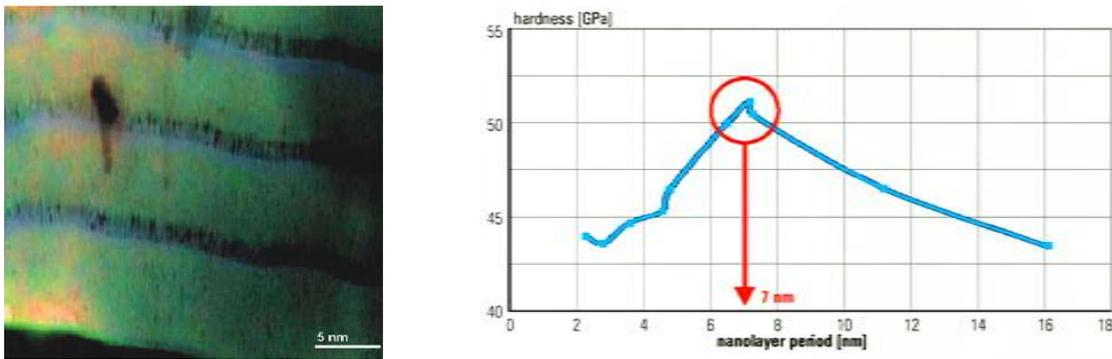
Los recubrimientos gradiente, son adecuados para aplicaciones en las que se requiera una gran resistencia frente a los choques térmicos. Presentan una variación gradual de una de sus propiedades o de uno de sus componentes. La ausencia de interfases entre componentes con diferentes coeficientes de expansión térmica logra minimizar las tensiones en el interior del recubrimiento durante los choques térmicos y, por tanto, aumenta la vida de este tipo de recubrimientos. La estructura de gradiente se inicia con una capa de adhesión y después con componentes como el TiN o el CrN se va gradualmente aumentando la proporción de un componente duro, como el AlN, hasta alcanzar la mayor dureza en la superficie del recubrimiento (ver Figura 2.27) [17].



**Figura 2.27.** Estructura gradiente [17]

#### 2.2.4.4. Nanocapa

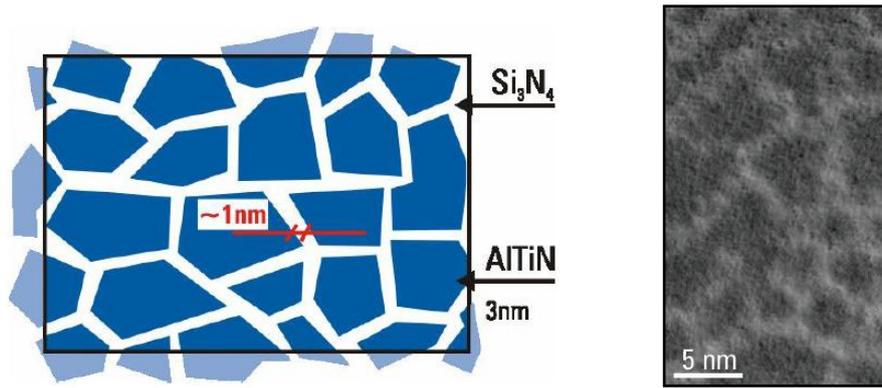
Los recubrimientos nanocapa o nanoestructurados son una variante del recubrimiento multicapa con espesor de capa, o periodo, inferior a 20 nm. Estos recubrimientos son una solución para aumentar la dureza de los recubrimientos PVD, especialmente en caliente. Un periodo óptimo es capaz de aumentar significativamente la dureza (ver Figura 2.28) [17].



**Figura 2.28.** Recubrimiento nanocapa. Dureza según la dimensión del periodo en una estructura nanocapa [17]

#### 2.2.4.5. Nanocomposite

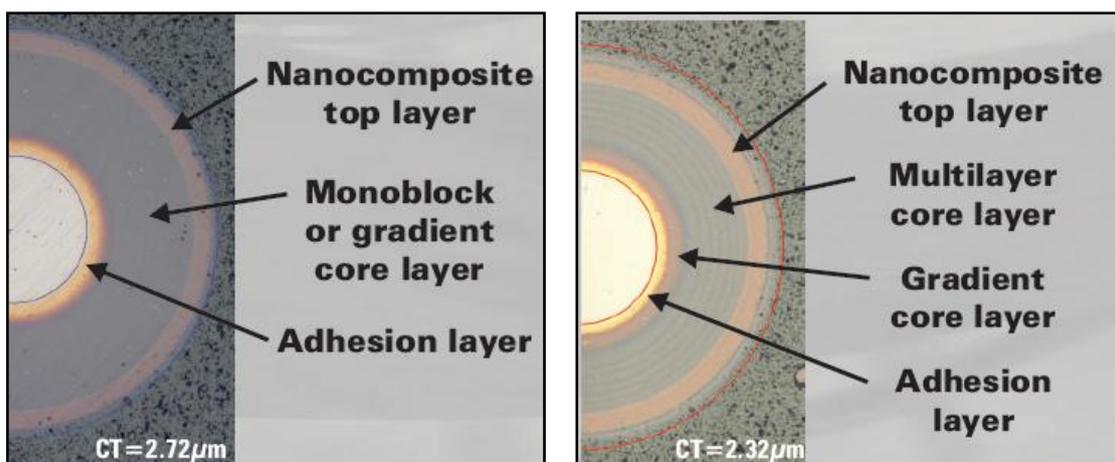
Los recubrimientos nanocomposite son relativamente recientes, y surgieron por la dificultad de reproducir los recubrimientos nanocapas en el periodo óptimo de máxima dureza. Estos recubrimientos permiten conseguir la mayoría de las características de los recubrimientos nanocapas, alta dureza y estabilidad de sus propiedades a altas temperaturas, pero se generan de manera espontánea bajo determinados parámetros en la deposición. Un ejemplo de estos recubrimientos es el AlTiSiN (con marca comercial nCo, de Plaitit). Con estos de estructura nanocomposite se han alcanzado durezas extremadamente altas, del orden de 40-50 GPa y elevada resistencia térmica. Estos recubrimientos nanocomposites han sido posibles gracias a la tecnología LARC (Lateral Rotating ARC-Cathodes) y consisten en granos nanocristalinos (AlTiN) insertados en una matriz amorfa ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) (ver Figura 2.29) [17]. El silicio, que actúa como aglomerante de los cristales AlTiN en una matriz de nitruro de silicio, asegura la estabilidad de la nanoestructura hasta 1200°C, por lo que se reduce al mínimo la pérdida de dureza a elevadas temperaturas. Otra característica importante de estos materiales, dada por el tamaño nanométrico de las partículas, es que se combina la elevada dureza con una alta tenacidad, propiedades que por lo general son contradictorias en los materiales.



**Figura 2.29.** Estructura nanocomposite (nc-TiAlN) ( $\alpha$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) [17]

#### 2.2.4.6. Combinada

Los recubrimientos con estructura combinada, aplican dos o más estructuras de las anteriormente explicadas, formando recubrimientos con estructura doble, triple, cuádruple, etc. Un ejemplo de estructura de triple recubrimiento, fue la desarrollada en el 2007 gracias a al tecnología LARC (Lateral Rotating ARC-Cathodes) que junta ventajas de los recubrimientos convencionales y de los recubrimientos nanocomposites. Tiene una primera capa para una óptima adhesión, con TiN o CrN, a continuación se forma un núcleo con AlTiN o AlCrN, y la capa exterior está formada por una estructura nanocomposite, AlTiSiN o AlCrSiN, que proporciona una extrema dureza y resistencia al desgaste. De esta manera, en un solo recubrimiento, se tiene la adhesión óptima en la capa interna, las adecuadas tenacidades y durezas en la capa intermedia, y las extremas durezas en la capa exterior (ver Figura 2.30) [17].



**Figura 2.30.** Recubrimientos con estructura combinada [17]

## 2.3. Acondicionamiento de los sustratos: Pre y Post-tratamientos

En el Capítulo 3 (“Método para la definición del proceso de recubrimiento”), se verá que para optimizar los procesos de recubrimiento se necesitan unos conocimientos de partida (punto 3.1). En este punto se explica que hay una “clara relación entre las mejoras en el sustrato-herramienta con el recubrimiento”, si se busca su optimización. En la Figura 2.31, se pueden ver algunas de las influencias que producen los pre- y post-procesos al proceso de recubrimiento.

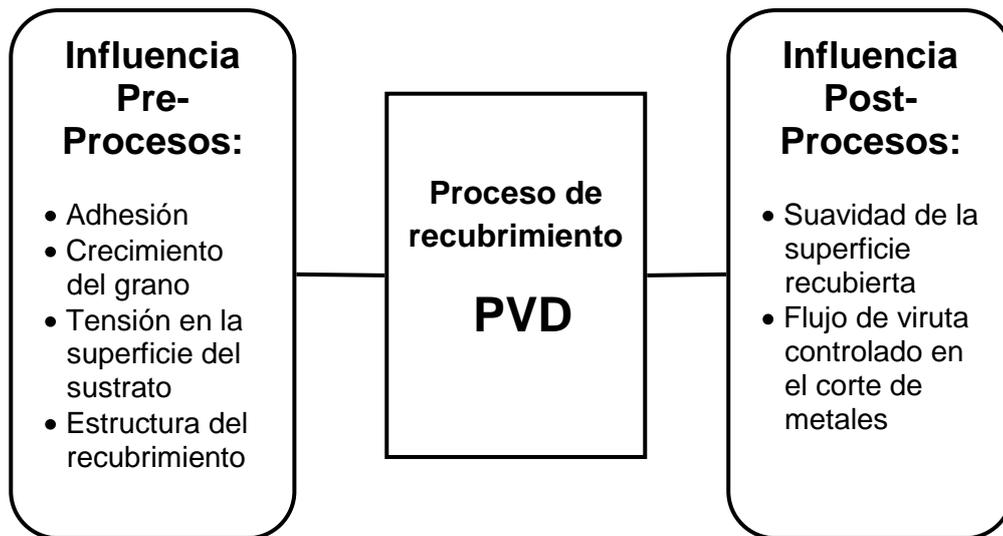


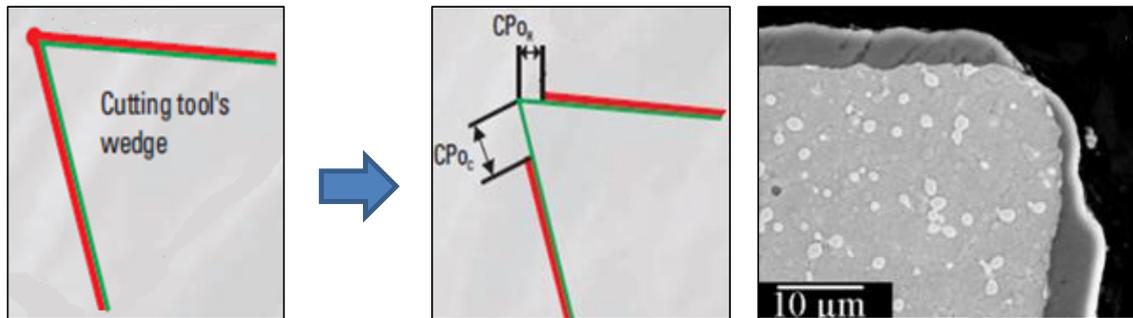
Figura 2.31. Influencias del pre- y post-procesos a la deposición PVD [100]

### 2.3.1. Necesidad del acondicionamiento: consideraciones en la fabricación de herramientas de corte

El proceso de mecanizado-corte es una de las aplicaciones más extremas en mecánica: presiones locales extremas entre la herramienta y el material de trabajo ( $100-10000 \text{ N/mm}^2$ ), temperaturas extremas ( $300-1200^\circ\text{C}$ ), velocidades extremas ( $1-30 \text{ m/s}$ ) [101]. En este contexto, los usuarios esperan una mayor productividad (alto ratio de extracción de material) y un bajo desgaste de sus herramientas de corte (larga vida de herramienta). Esta demanda requiere mayores mejoras en el diseño de las herramientas de corte: nuevos sustratos, nuevos recubrimientos, etc. Además, los fabricantes de herramientas saben que los procedimientos de fabricación de sus herramientas de corte, y especialmente la micro-geometría (rugosidad, preparación de filos de corte, etc.) tienen una gran influencia en su rendimiento y fiabilidad. Este

aspecto tiene una alta importancia en herramientas de corte destinadas a plantas de producción masiva.

Las consecuencias de los procedimientos de fabricación conciernen por un lado a la adhesión del recubrimiento y por otro lado al reforzamiento del filo de corte, para evitar el astillamiento impredecible en el filo de corte. El interés para fabricar una preparación del filo de corte es conocida por la experiencia de los trabajadores en máquina-herramienta, que suelen redondear los filos por la aplicación de una piedra. Dependiendo de la presión aplicada por la piedra en el filo, la micro-geometría obtenida es diferente, con el fin de adaptarla a la aplicación: torneado de desbaste de aceros, operaciones de acabado de aluminio, etc. Dependiendo del trabajador, los resultados son también inciertos [102].



CPoR: desprendimiento del recubrimiento en la superficie de desprendimiento  
 CPoC: desprendimiento del recubrimiento en la superficie de incidencia

**Figura 2.32.** Influencia de la preparación del filo en las herramientas recubiertas [17]

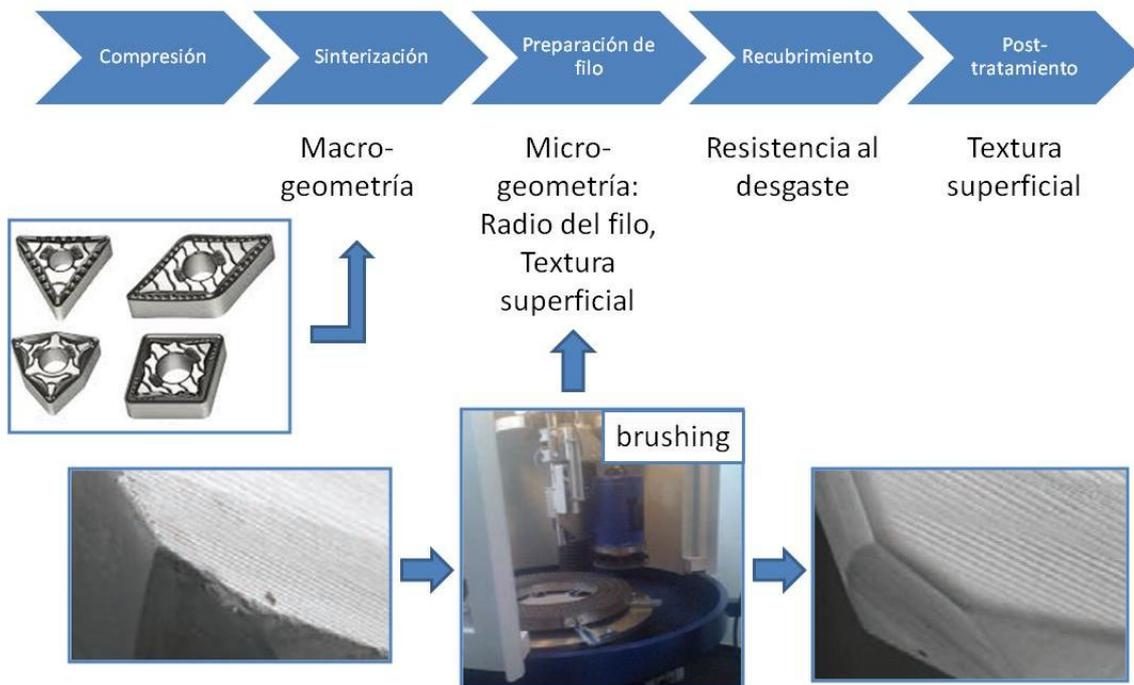
Se van a ver algunas formas típicas de producción de herramientas de corte, así como la micro-geometría de los filos de corte, y los problemas típicos, considerando sus aplicaciones.

### 2.3.1.1. Procedimiento de fabricación de plaquitas de metal duro

Uno de los procedimientos habituales para producir plaquitas de metal duro se ilustra en la Figura 2.33. Después de los ya conocidos procesos de compresión y sinterizado, la geometría macroscópica de la herramienta de corte es completada. Esta geometría macroscópica incluye el rompevirutas, cercano al filo de la plaquita, especialmente en aplicaciones de corte continuo, como es el torneado. Después de este paso, la micro-

geometría del filo de corte puede ser calibrada por diferentes procesos, dependiendo de los resultados esperados [103]:

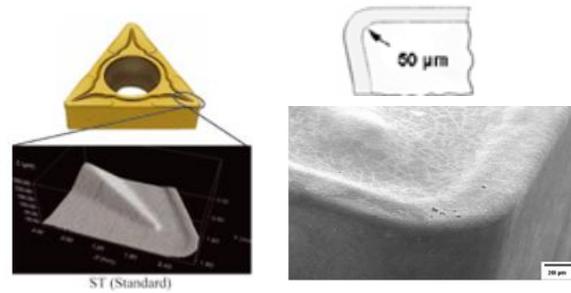
- Rectificar en la cara de desprendimiento, para conseguir filos afilados (radio de filo de corte  $< 5 \mu\text{m}$ ).
- Micro-chorreado de arena en la cara de desprendimiento y de flanco para conseguir filos intermedios (radio aproximado entre  $5\text{-}20 \mu\text{m}$ ).
- Cepillado de los filos para conseguir filos gruesos (radio hasta las  $50 \mu\text{m}$ ).



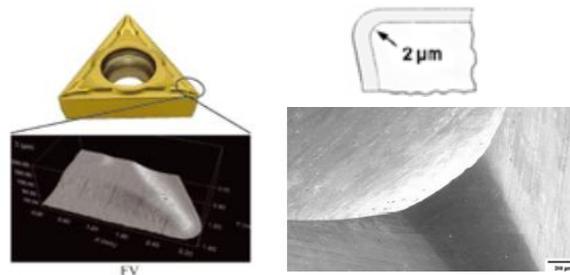
**Figura 2.33.** Ejemplo de procedimiento de fabricación de plaquitas de Metal Duro [17], [103] y [104]

La Figura 2.34 muestra algunas geometrías estándar de rompevirutas y radios de filo de corte (preparación de filo), fabricado por un lado, para plaquitas de metal duro de torneado para desbaste de acero, y por otro lado, para acabado de aleaciones de aluminio. La diferencia de geometría es fácilmente comprensible, debido a la gran diferencia de dureza para cada material, y debido a la gran diferencia del área de contacto herramienta-viruta (gran espesor de viruta en desbaste, frente a, pequeño espesor de viruta en acabado) [103].

### Torneado para desbaste de acero



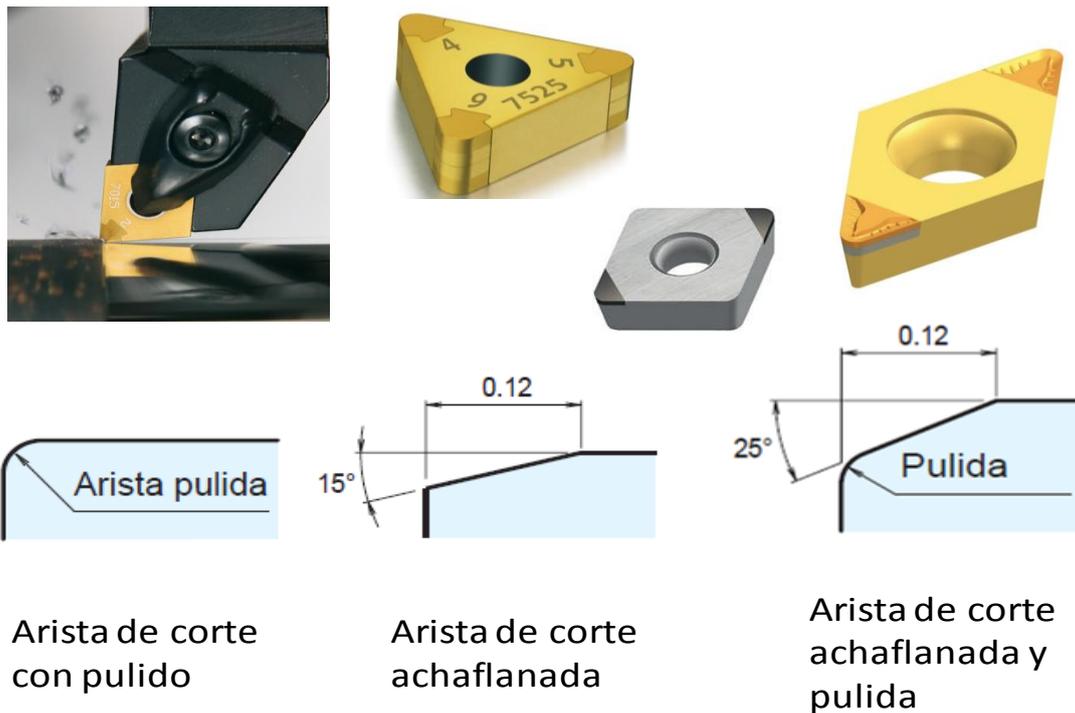
### Torneado para acabado de aluminio



**Figura 2.34.** Comparación de la preparación de filo y del rompevirutas en dos plaquitas de metal duro [103], [105] y [106]

#### 2.3.1.2. Procedimiento de fabricación de plaquitas de c-BN

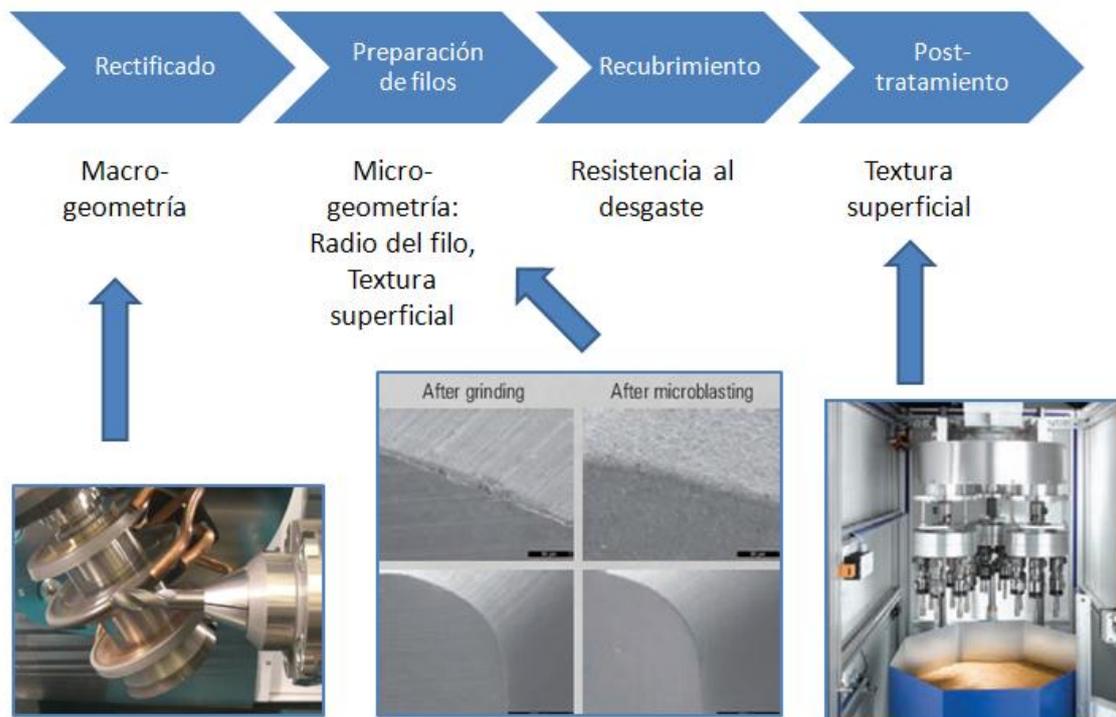
El diseño de la micro-geometría de plaquitas de c-BN para operaciones de mecanizado duras, es algo diferente del caso anterior. Lo primero de todo, el proceso de torneado duro es solo referido para acabado con muy pequeños ratios de avance (pequeño espesor de viruta). Consecuentemente las tensiones mecánicas cercanas al filo son mucho mayores. Además, la resistencia a tensión de las plaquitas de c-BN es algo inferior que las de sustratos de metal duro (570 MPa frente a 1600 MPa). Bajo estas condiciones, la micro-geometría de los filos de corte debe inducir tensiones compresivas en el sustrato, y estas tensiones deberían ser orientadas en el material suelto. La Figura 2.35 muestra algunas soluciones típicas aplicadas por los fabricantes de herramientas de c-BN. La gran preparación del filo de corte, asociado con un gran radio o chaflán, es una forma usual para fortalecer así como fragilizar las herramientas de corte sometidas a altas cargas [103].



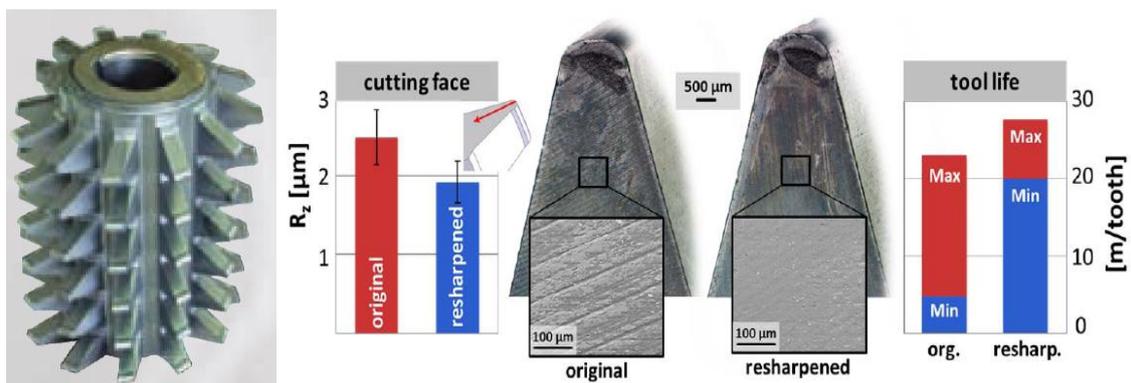
**Figura 2.35.** Algunas preparaciones de filo típicas de plaquitas de c-BN [107] y [108]

### 2.3.1.3. Procedimiento de fabricación de herramientas integrales-sólidas

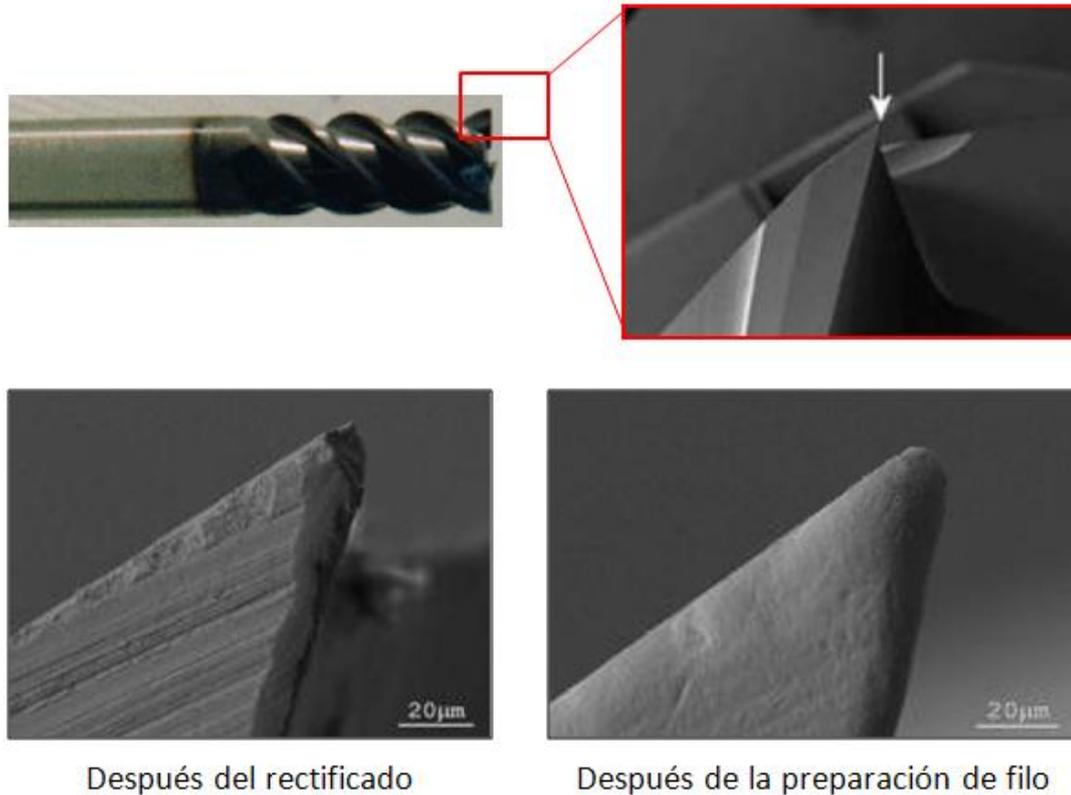
El procedimiento de fabricación de herramientas integrales-sólidas es mejor conocido por los usuarios finales, ya que en un gran número de ellos, tiene importancia el reafilado de sus caras herramientas de corte (fresas madre, brochas, hojas de sierra, etc.) Normalmente, las herramientas integrales pequeñas son realizadas directamente a partir de las barras de metal duro o pretemplado de HSS. La preparación del filo de corte, se realiza generalmente por micro-chorreado de arena (ver Figura 2.36) o por cepillado. Los radios de filo de corte son normalmente más pequeños para herramientas de HSS que para las de Metal Duro, debido a la mayor tensión de flexión (4800 MPa frente a 1600 MPa) [103].



**Figura 2.36.** Ejemplo de procedimiento de fabricación de una herramienta integral-sólida [17], [103] y [109]



**Figura 2.37.** Ejemplo de micro-geometría del filo de corte de una fresa madre de HSS, y su influencia en acabado superficial y en la vida de la herramienta [103] y [110]



**Figura 2.38.** Ejemplo de micro-geometría del filo de corte de una fresa de acabado de metal duro [17] y [103]

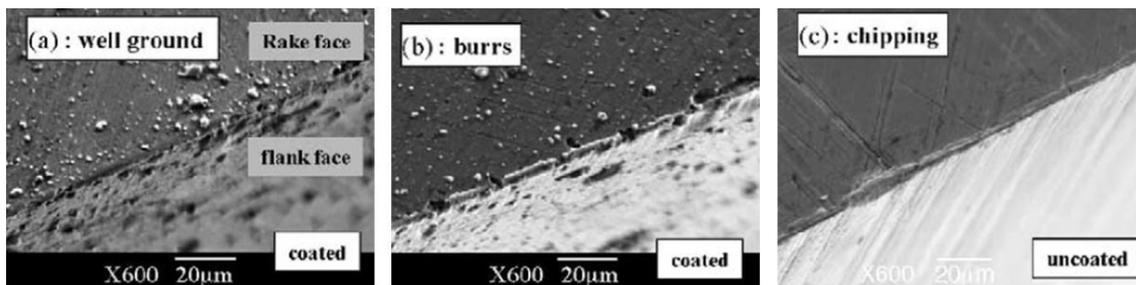
### 2.3.2. Preparación del filo de corte

Cuando se inspecciona la micro-geometría de las herramientas de corte, y especialmente de las herramientas integrales-sólidas, se puede observar una gran variedad de defectos como: micro roturas, rebabas, quemados, faltas de recubrimiento, rugosidad superficial pobre, etc. Estas observaciones pueden ser, independientemente del sustrato (HSS o metal duro), e independientemente del fabricante de la herramienta [103].

- Las micro-roturas son debidas principalmente al proceso de rectificado y a la manipulación entre cada paso del proceso de fabricación (ver Figura 2.39). Se debe destacar que las micro-roturas pueden ocurrir tanto antes como después de la fase de recubrimiento.
- Las rebabas se deben solamente a los procesos de rectificado (ver Figura 2.39). Es muy importante hacer notar que la presencia de rebabas en los filos de corte es muy problemática para la preparación de filos, ya que perturba la fiabilidad de su resultado. Pocas publicaciones científicas tratan de la influencia

de las condiciones de rectificado de herramientas de corte en la formación de rebabas.

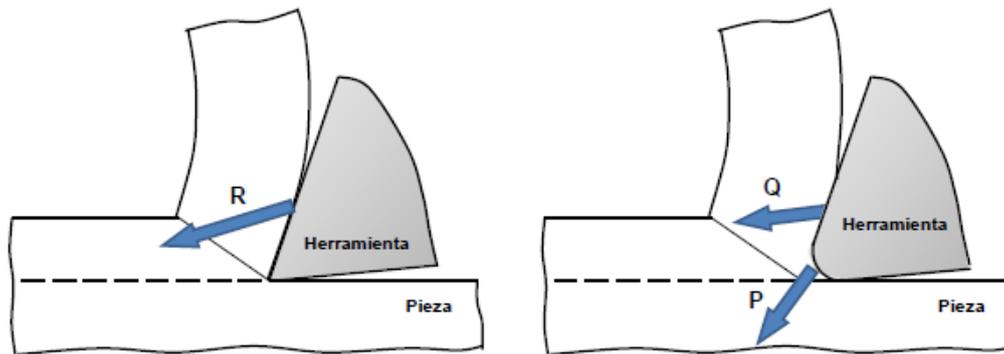
- La rugosidad superficial pobre observada en algunas caras son debidas a las malas condiciones de rectificado. Cuando la textura superficial es muy mala, especialmente cuando se observan grandes ondulaciones, el proceso de preparación del filo de corte no puede mejorar la micro-geometría suficientemente y el resultado no será satisfactorio.



**Figura 2.39.** Defectos típicos observados en el filo de corte [111]

El efecto de la geometría del filo de corte ha sido durante mucho tiempo un problema para entender el corte de metal. En la modelización analítica del proceso de corte ortogonal, E.M. Merchant (1945), indicó claramente la suposición de la agudeza de la herramienta [112], sin embargo, el filo real de una herramienta siempre tiene una agudeza finita, aunque pequeña. Se entiende, que la fuerza de mecanizado será diferente para una herramienta afilada comparada con una herramienta con el filo romo, considerando todo lo demás constante [102], [113] y [114].

Los trabajos de investigación apuntan a introducir estos datos de vuelta a 1950-1960s [115], [116] y [117]. El ratio entre el radio de filo y el espesor de viruta sin cortar ha sido usado por algunos investigadores como una medida de cómo o no la herramienta debería ser tratada como afilada o desafilada. El término “efecto de tamaño” ha sido introducido (ver Figura 2.40). Un fenómeno estrechamente relacionado con el efecto del redondeamiento del filo es el aumento aparente de la energía específica (el ratio de la fuerza de corte, a la sección transversal al área de corte, en  $N/mm^2$ ), requerida para formar una viruta, así como la disminución del espesor de viruta sin cortar [118].



**Figura 2.40.** Efecto de tamaño (descomposición de la fuerza resultante R en la fuerza de penetración P y la fuerza sobre la cara de desprendimiento Q) [117]

En los últimos años, el efecto de la redondez del filo de la herramienta, ha traído una atención creciente en la comunidad internacional de investigadores del mecanizado, debido a la cada vez más acelerada demanda de aplicaciones de precisión, tecnologías micro- y nano-mecanizado en una amplia variedad de industrias modernas: torneado de acabado de materiales duros en la industria de automoción y aeronáutica [119]; fabricación de obleas [120]; torneado de acabado de aleaciones de aluminio [121], etc.

El diseño de la preparación de filos de corte ha sido estudiado principalmente por los fabricantes de herramientas, con numerosos ensayos de mecanizado. Como consecuencia, las explicaciones científicas del control de los parámetros clave de este problema continúan siendo inciertas.

Entre los que han investigado recientemente los efectos de la preparación del filo de corte en el rendimiento de las herramientas de corte, los procesos de micro-chorreado de arena, ha sido el proceso más popular por ser un proceso básico y barato [122], [123], [124], [125] y [126], mostrando que el micro-chorreado de arena puede mejorar la vida de la herramienta en torneado, fresado, serrado y taladrado de aceros al carbono. El proceso de chorreado de arena retrasa la aparición del fallo del recubrimiento y produce un desgaste más homogéneo. Este tratamiento mecánico parece ser mucho más eficiente que otros procesos, como el del pulido.

Aunque se explicará más en detalle en el siguiente punto, el punto 2.3.3, “Pre-tratamientos”, el proceso de micro-chorreado de arena, en metal duro, puede ser usado también para reducir los picos altos de rugosidad, para obtener un menor espacio entre los picos del perfil de rugosidad así como quitar el cobalto, y mejorar así la adhesión del recubrimiento [123] y [127].

Sobre las consecuencias de la preparación del filo de corte en la formación de viruta, con el fin de traer informaciones para la comprensión del rendimiento de corte de un tratamiento específico [102], [113], [114], [123] y [128], revelan que afecta más a la fuerza de avance que a la fuerza de corte, influyendo mucho en el área de contacto herramienta-viruta, dirigiendo pequeñas variaciones en los campos térmicos, pero no importantes variaciones en las tensiones mecánicas alrededor del filo, especialmente en la capa de recubrimiento. La minimización de la tensión de Von Mises dentro del recubrimiento, parece ser un parámetro clave para maximizar la duración de la vida de la herramienta. El valor óptimo depende de un número de parámetros como se resumen en la Figura 2.41. Depende de las propiedades mecánicas del material de trabajo, de las propiedades mecánicas del sustrato y del recubrimiento, pero también de las condiciones de corte [103].

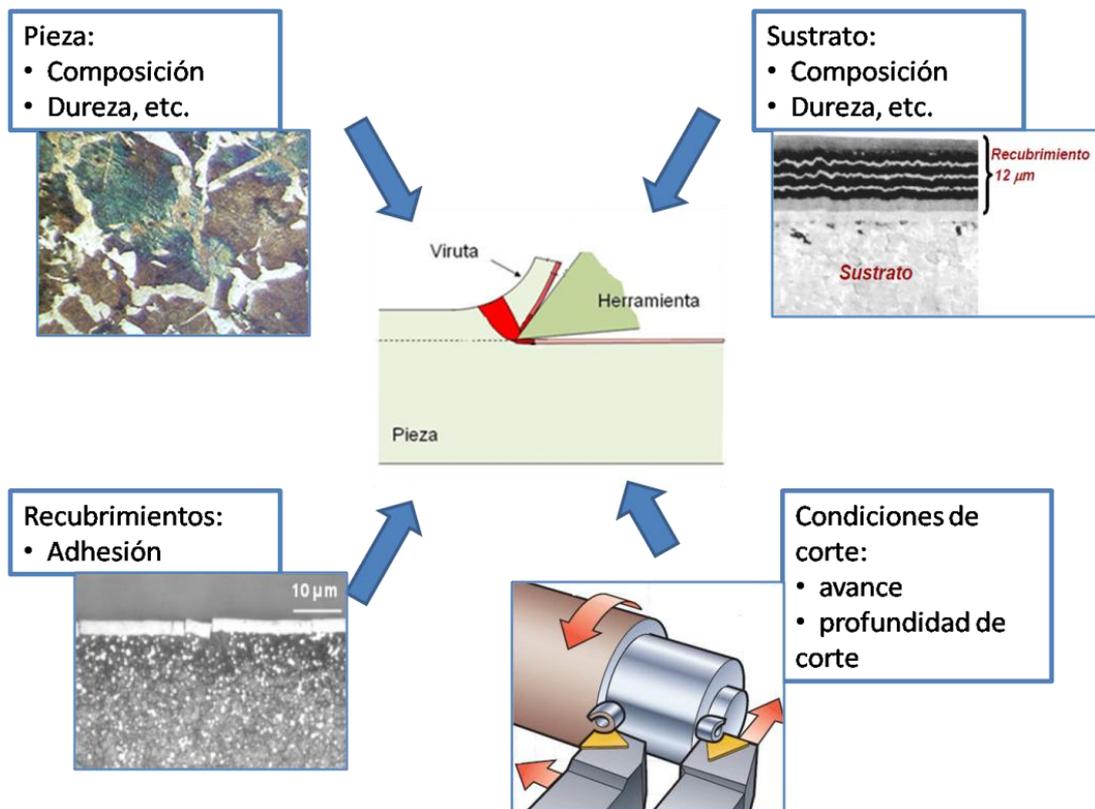
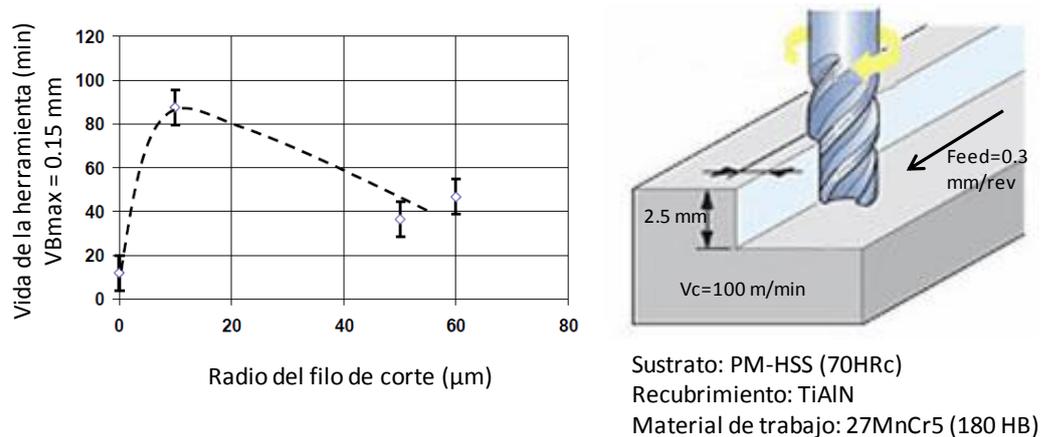


Figura 2.41. Esquema de los parámetros de los que depende la vida de una herramienta [103]

### 2.3.2.1. Ejemplo de aplicación industrial de la preparación de filo de corte en fresado de acabado

Un conjunto de fresas con varios radios de filo, fabricadas con el sustrato ASP2052 (66 HRC) y recubrimiento TiAlN. El radio ha sido obtenido por micro-chorreado de arena o esmerilado, y las pruebas fueron realizadas usando un centro de mecanizado de 3 ejes de control numérico. El material de trabajo es un acero 27MnCr5 (180 HB). La profundidad radial de corte  $a_e$  y la profundidad axial de corte  $a_p$  se ha mantenido constante, 10 y 2.5 mm respectivamente. Se han aplicado las siguientes condiciones de corte:  $V_c=100$  m/min,  $f_z=0.3$  mm/rev, máx. espesor de viruta=0.24 mm. Todos los ensayos se han realizado en condiciones de corte en seco y duplicados. El criterio de vida para estos ensayos de desgaste fue desgaste de flanco máximo VB máx. de 0.15mm, debido al mayor aumento del ratio de desgaste a partir de este valor, el cual puede dar resultados irreales. La Figura 2.42 presenta los resultados obtenidos, siendo el radio del filo de corte efectivo (R) el radio del filo del sustrato sin recubrimiento.

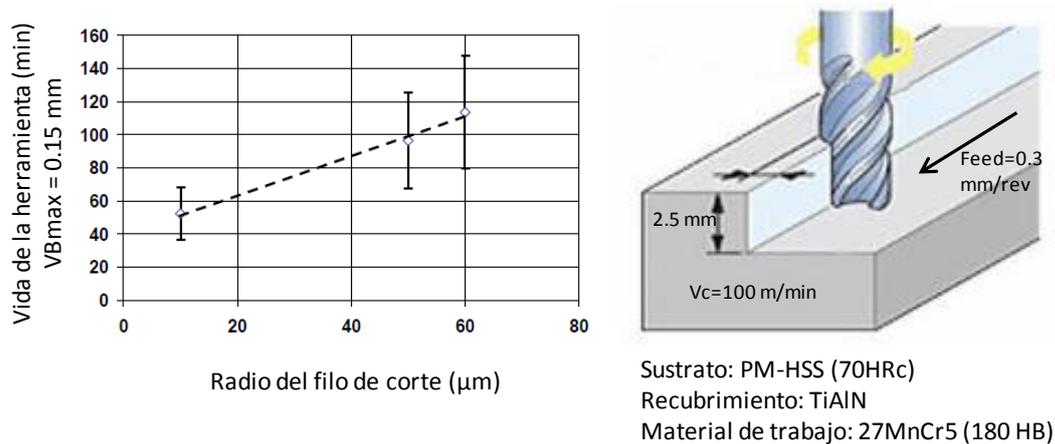


**Figura 2.42.** Influencia del radio del filo de corte en fresado con fresa de acabado PM-HSS (66 HRC) [103]

Se puede ver que la fresa con radio de filo de corte de 10 μm presenta una mejor resistencia al desgaste en comparación con las más afiladas (radios inferiores a 10 μm) o redondeados (radios superiores a 10 μm). La existencia de un radio de filo óptimo puede ser explicada por la minimización de la tensión de Von Mises dentro del recubrimiento [103].

Cuando se compara una fresa de acabado estándar de las disponibles en el mercado de PM-HSS, con una herramienta “mecánicamente tratada” con un radio de 10 μm, se puede observar una mejora entre 400 y 500% en la vida de la herramienta [103].

Si se realiza el mismo ensayo en condiciones similares, pero con un sustrato diferente PM-HSS de mayor dureza (70 HRC), se observa un comportamiento muy diferente (ver Figura 2.43). El radio mayor muestra mejores resultados que un radio pequeño, debido a que las propiedades mecánicas son completamente diferentes en un HSS más duro. El decrecimiento de la resistencia a flexión con la dureza necesita un cambio del radio óptimo del filo de corte. Se puede asumir que un radio por encima de las 60  $\mu\text{m}$ , puede hacer decrecer la resistencia al desgaste de las herramientas [103].



**Figura 2.43.** Influencia del radio del filo de corte en fresado con fresa de acabado PM-HSS (70 HRC) [103]

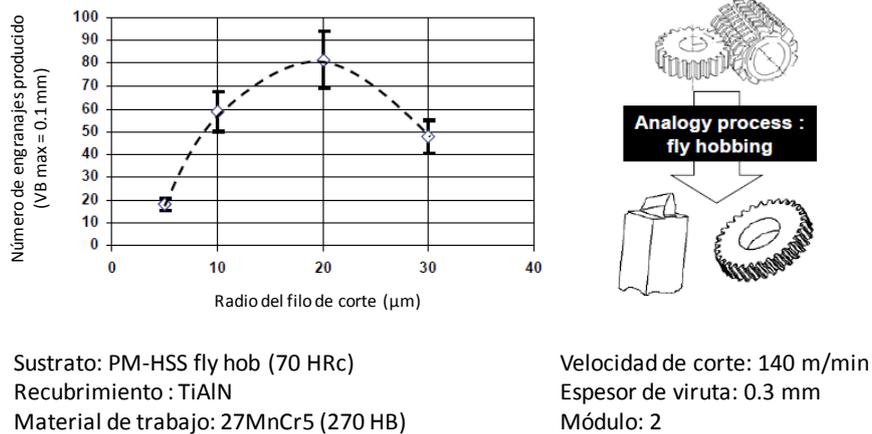
### 2.3.2.2. Ejemplo de aplicación industrial de la preparación de filo de corte en tallado de engranajes a alta velocidad en seco

En el tallado de engranajes, la investigación de la influencia de la preparación del filo de corte es difícil, debido a la muy larga duración de los ensayos de desgaste. Sin embargo, la aplicación de un proceso análogo llamado “fly hobbing”, ha mostrado su eficiencia para clasificar varias soluciones con una tendencia similar a como es el proceso de tallado real, pero de una manera más rápida y barata.

En este ensayo, se ha usado un grupo de dos módulos de “fly cutters” con varios radios de filo, fabricados con el sustrato ASP2052 (66HRC) y recubrimiento TiAlN. El radio ha sido obtenido por micro-chorreado de arena o esmerilado. El material de trabajo es un acero 27MnCr5 (270 HB). Se han aplicado las siguientes condiciones de corte:  $V_c=140$  m/min, máx. espesor de viruta=0.3 mm. Todos los ensayos se han realizado en condiciones de corte en seco y duplicados. El criterio de vida para estos ensayos fue de un desgaste de flanco máximo  $VB_{\text{max}}$  de 0.1 mm, debido al mayor aumento del ratio de desgaste a partir de este valor, el cual pueda dar resultados

irreales. La Figura 2.44 presenta los resultados obtenidos, siendo el radio del filo de corte efectivo ( $R$ ) el radio de filo del sustrato sin recubrir.

Se puede ver que el “fly cutters” con radio de filo de corte de 20  $\mu\text{m}$  presenta una mejor resistencia al desgaste en comparación con los más afilados o redondeados. Como anteriormente, la existencia de un radio de filo óptimo puede ser explicado por la minimización de la tensión de Von Mises dentro del recubrimiento [103].

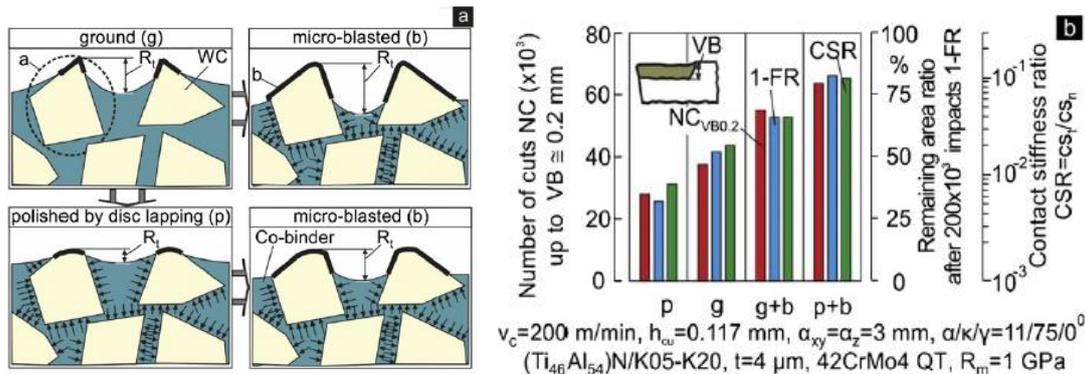


**Figura 2.44.** Influencia del radio del filo de corte en tallado de engranajes [103]

### 2.3.3. Pre-tratamientos del sustrato

La adhesión del recubrimiento al sustrato, y consecuentemente el rendimiento de las herramientas de corte, dependen significativamente del pre-tratamiento mecánico aplicado. Los micro-chorreados en sustratos rectificados o pulidos son un método eficiente para mejorar la adhesión de la película. Esto se puede explicar considerando el efecto que produce el micro-chorreado sobre la morfología de la superficie (ver Figura 2.45 a). Las tensiones residuales superficiales son inducidas principalmente por la deformación del Co-aglutinante, y además se produce un aumento de la micro-rugosidad. En la superficie de Metal Duro, los carburos individuales se revelan por el arranque del Co-aglutinante. De esta forma se puede asumir que durante la deposición de la película, el ratio de nucleación de uniones transitorias potencialmente formadas como el TiAlCN sobre las superficies de carburo-WC libre de cobalto se incrementa. Por tanto, hay una mejora de la adhesión entre el sustrato y la película de PVD, y adicionalmente decrecen las regiones de cobalto menos adhesivas en la superficie del sustrato [129]. Después de un pulido con un disco de lapeado, los carburos son redondeados, restringiendo la superficie-WC libre de Co y aumentando las regiones-Co, deteriorando así la adhesión de la película. Por micro-chorreado de las superficies

pulidas, se pueden reobtener las ventajas descritas del micro-chorreado, y adicionalmente los carburos WC están mejor incrustados ahora en el aglutinante-Co, debido a la menor micro-rugosidad  $R_t$  en comparación con el sustrato rectificado.

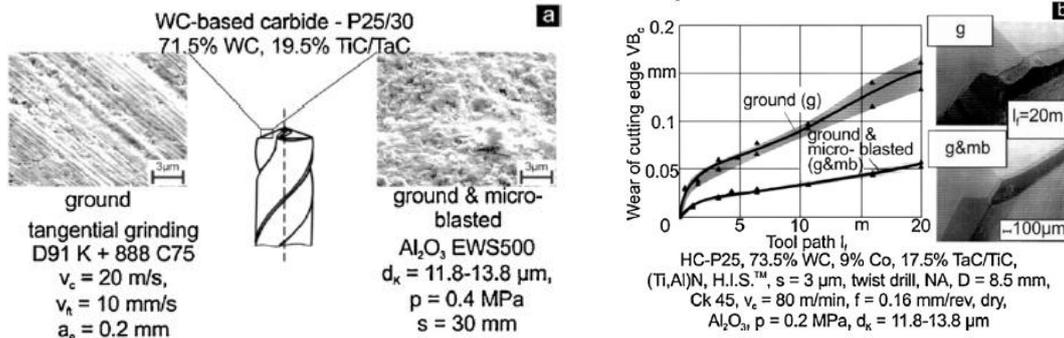


**Figura 2.45.** Efectos del micro-chorreado y lapeado (a) sobre la estructura superficial del metal duro y (b) sobre la adhesión de película y vida de la herramienta recubierta [13]

Los resultados presentados (ver Figura 2.45 b) se obtuvieron por ensayos de fresado. Las plaquitas recubiertas con sustratos rectificados y micro-chorreados alcanzan una vida de aproximadamente 55000 cortes, con un desgaste de flanco de 0.2 mm. Por otra parte, los resultados muestran un mayor aumento de la resistencia al desgaste si el ensayo se realiza con un pulido y micro-chorreado del sustrato. Las plaquitas con un sustrato pulido o molido son capaces de cortar sólo 28000 y 35000 respectivamente, hasta el mismo desgaste de flanco. Por lo tanto, el micro-chorreado de sustratos rectificados o lapeados contribuye a una mejora de la adhesión del recubrimiento y a un aumento del rendimiento de corte.

Las imágenes SEM de herramientas rectificadas y micro-chorreadas (ver Figura 2.46 a) se caracterizan, en el caso de la superficie rectificada, con una topografía con los típicos surcos del rectificado causados por altas deformaciones plásticas, en contraste con la superficie micro-chorreada donde los surcos del rectificado se pueden observar solo en áreas pequeñas.

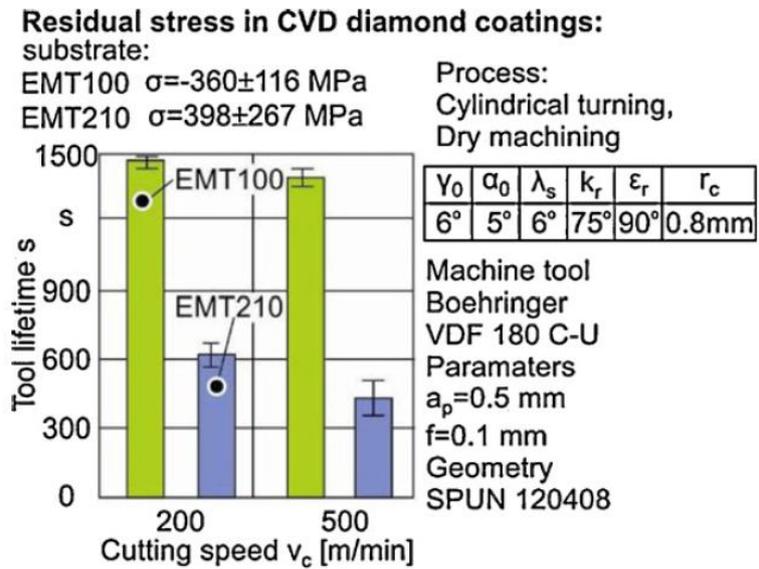
Los ensayos de corte con herramientas micro-chorreadas en un taladrado en seco (ver Figura 2.46 b), muestra que, hasta una trayectoria de la herramienta  $l_f$  de 1-3 m, las herramientas recubiertas no chorreadas muestran un crecimiento rápido del desgaste de flanco VB. Las altas fuerzas de corte durante el taladrado en seco causan chippings (astillamientos) en el recubrimiento (ver Figura 2.46 b), encima de la imagen SEM). Comparando estos resultados, las herramientas micro-chorreadas muestra un mejor comportamiento al desgaste [130] y [131].



**Figura 2.46.** (a) Influencia de los pre-tratamientos mecánicos del sustrato sobre la topografía del metal duro. (b) Comportamiento mejorado al desgaste debido a un pre-tratamiento adicional al sustrato [13], [130] y [131]

Los efectos positivos, de las tensiones residuales de compresión en el material recubierto sobre la resistencia de la película, y de la reducción del cobalto en el sustrato superficial sobre la adhesión del recubrimiento, y de esta forma, en el rendimiento de corte, han sido corroborados en herramientas recubiertas con diamante CVD [132] y [133].

Las tensiones compresivas impiden la propagación de grietas, sin embargo, también lleva a la fragilidad del recubrimiento. La vida de una herramienta de dos materiales después de mecanizar G- $AlSi_9Cu_4Mg$  (ver Figura 2.47) muestra que la herramienta con el sustrato EMT100, el rendimiento fue significativamente mejor que el de la herramienta con el sustrato EMT 210. Esto es debido al alto contenido en cobalto del sustrato EMT 210 el cual causa una reducción de la fuerza de adhesión del recubrimiento y además, debido a las tensiones de compresión, se produce un aumento de la fuerza de recubrimiento y se inhibe el crecimiento de la grieta. Con el análisis de las tensiones residuales mostrado (ver Figura 2.47), las herramientas de EMT100 tuvieron mayores tensiones de compresión que las herramientas de EMT210, las cuales en la mayoría de los casos muestran tensiones tensiles [133]. Por lo tanto, se puede concluir que una reducción de cobalto superficial en el sustrato y el crecimiento de tensiones residuales de compresión en herramientas recubiertas con diamante CVD, mejoran la fuerza de la película y permiten una mejor adhesión, así como una mayor vida de la herramienta.



**Figura 2.47.** Vida útil de la herramienta en el mecanizado de G-AlSi9Cu4Mg [13] y [133]

Los principales métodos para realizar el pre-tratamiento son los que se ilustran en la Tabla 2.4., siendo entre ellos el Cepillado y el “Drag Grinding” los métodos más usados en la industria. Al realizar la preparación de los filos de corte se consigue, generalmente, una mejora de la superficie del elemento que se está tratando (ver punto anterior, el punto 2.3.2). Aunque si se busca específicamente una preparación de superficie, se necesitarán aplicar otros métodos destinados para ello. Por otra parte, estos métodos pueden servir como post-tratamiento, ya que gracias a sus características, se produce una eliminación de los “droplets” generados durante el proceso de recubrimiento.

Principales métodos de pre-tratamientos							
Criterios/ Características	Afilado a mano con lima de diamante	Cepillado	Drag Grinding (Pulido)	Micro- chorreado o seco	Micro- chorreado húmedo	Chorro de agua	Acabado magnético
<b>Calidad</b>	La mejor	Medio	Buena	Medio	Bueno	Bueno	Bueno
<b>Constancia</b>	Depende de la persona	Bueno	Buena	Medio	Bueno	Bueno	Bueno
<b>Flexibilidad</b>	Muy alta	Alta	Media	Alto	Bueno	Medio	Bueno
<b>Productividad</b>	Baja	Medio	Media	Medio	Alto	Muy alto	Bueno
<b>Precio</b>	Sólo sueldo	Alto	Medio	Bajo	Medio	Muy alto	Alto
<b>Disponibilidad de máquinas estándar</b>		Si	Si	Si	Si		Si
<b>Posibilidad de pulir canales</b>		Limitación en profundidad	Si	Si	Si		Limitación en profundidad
<b>Posibilidad de eliminar droplets</b>		Si	Si	Si	Si		Si
<b>Característica especial</b>	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

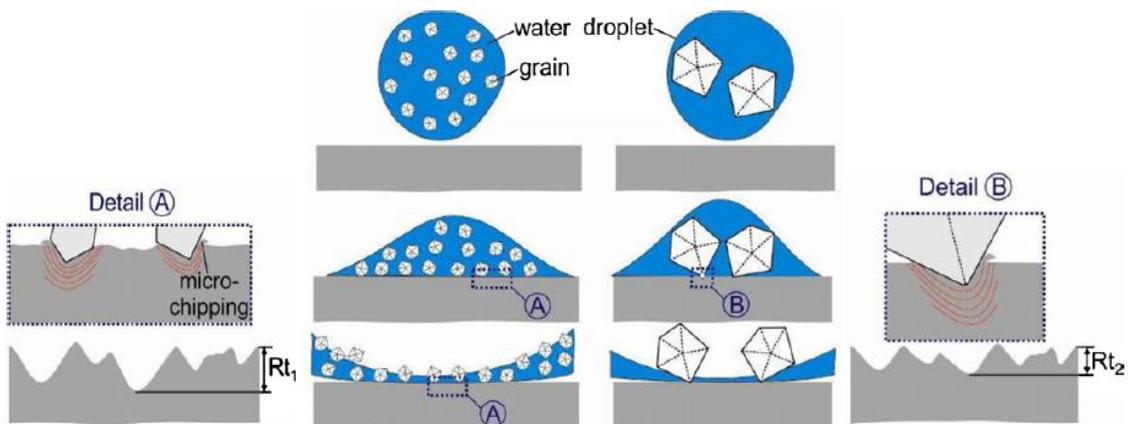


**Tabla 2.4.** Características de los principales métodos de realización de pre-tratamientos [5] y [17]

### 2.3.4. Post-tratamientos del recubrimiento

Por el micro-chorreado de las superficies de herramientas recubiertas, se introducen tensiones residuales compresivas en la estructura de la película, de este modo se mejoran las propiedades de dureza y resistencia de los recubrimientos. Los parámetros de micro-chorreado como la presión, el tiempo, así como el tamaño y forma de los granos del chorreado, tienen un efecto fundamental en las propiedades de resistencia de la película y de esta forma en el rendimiento de corte de las herramientas recubiertas [134] y [135].

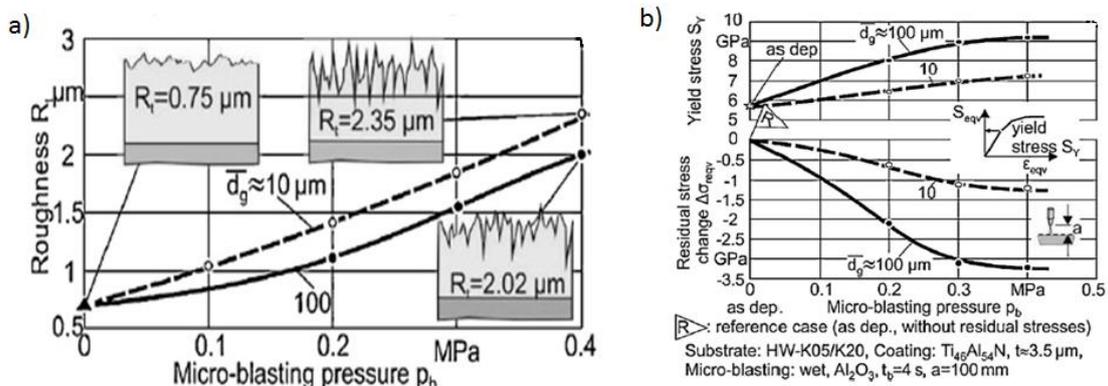
La Figura 2.48 explica esquemáticamente el efecto del chorreado húmedo por granos finos de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  de un diámetro medio de aproximadamente  $10\ \mu\text{m}$ , así como granos de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  de un diámetro diez veces más grandes, en la integridad superficial de la herramienta recubierta [134]. Numerosos granos abrasivos finos son guiados por las gotas de agua de alta densidad sobre áreas pequeñas de las superficies de las herramientas recubiertas. Esto puede causar un arranque más intenso del material del recubrimiento por micro-chipping, por la misma duración de tratamiento, comparado con un micro-chorreado por granos gruesos y de un menor número por gota de agua. Por un lado, esto sucede, porque numerosos granos pequeños son arrastrados fácilmente fluyendo en el agua a lo largo de la superficie de la película, deteriorando intensivamente de este modo su rugosidad. Por otro lado, los granos gruesos están menos afectados por la fluidez del agua y principalmente deforman el material del recubrimiento. De esta forma, gran porción de la energía cinética inicial de los granos gruesos es consumida por la deformación plástica del recubrimiento, comparada con la de los granos pequeños. Así, los recubrimientos sometidos a micro-chorreado húmedo por granos finos de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , se espera que tengan una mayor rugosidad y una menor nanodureza, comparados con el correspondiente, el micro-chorreado por granos gruesos bajo las mismas condiciones [134].



**Figura 2.48.** Efecto del tamaño de grano abrasivo sobre la rugosidad de la superficie con un micro-chorreado húmedo [13]

En la Figura 2.49 a, se muestra el efecto del chorreado húmedo por granos finos de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  de un diámetro medio aproximado de  $10\ \mu\text{m}$  y por granos de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  de un diámetro diez veces más grande, sobre las propiedades de los recubrimientos tratados. La más intensa abrasión durante el micro-chorreado húmedo, cuando se aplican granos finos de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  en vez de granos gruesos, incrementa la rugosidad en la superficie de la herramienta, así como cerca del filo de corte. Esto es claramente

visible en las topografías de la superficie mostradas antes y después del micro-chorreado con varios tamaños de grano a 0.4 MPa. De esta manera, se puede concluir que aunque el espesor medio del recubrimiento permanece prácticamente invariable por los procedimientos de chorreado a bajas presiones y duración del proceso, el espesor de la película actual en micro-regiones individuales sobre el desprendimiento y flanco dependen fuertemente de la integridad desarrollada después del micro-chorreado. Por ello, el aumento de la presión y duración del micro-chorreado puede dar como resultado una significativa reducción del espesor del recubrimiento local, el cuál puede afectar al rendimiento de corte de las herramientas recubiertas micro-chorreadas [134].

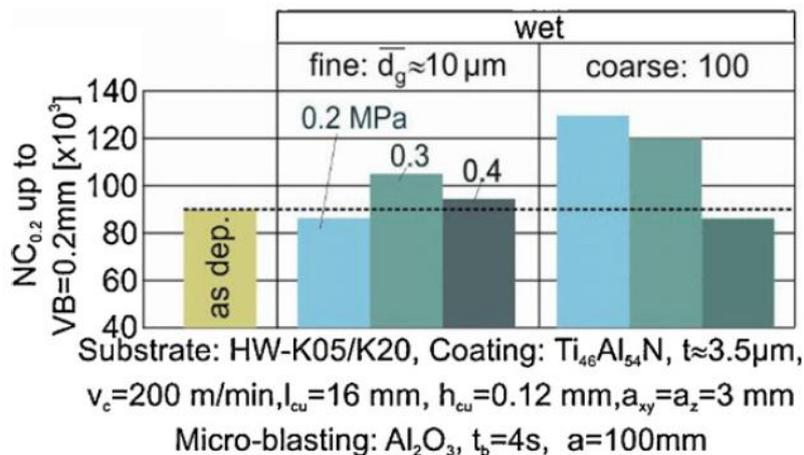


**Figura 2.49.** (a) Medidas de rugosidad en recubrimientos con post-tratamiento por micro-chorreado húmedo con  $\text{Al}_2\text{O}_3$  con granos de diferentes tamaños, a varias presiones. (b) Cambios de límites de elasticidad y tensión residual en recubrimientos con post-tratamientos [13]

Las nanoindentaciones a una carga máxima de 15mN se llevaron a cabo en plaquitas recubiertas, micro-chorreadas en húmedo por granos de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  finos ( $d_g \approx 10 \mu\text{m}$ ) y granos gruesos ( $d_g \approx 100 \mu\text{m}$ ) a varias presiones. Los resultados de la nanoindentación en el caso de la película depositada y en el micro-chorreado fueron evaluados y se determinó los límites de elasticidad del recubrimiento (ver Figura 2.49 b) [134], donde se produce una gradación del límite de elasticidad frente al espesor de la película después del micro-chorreado. Debido a la nanoestructura del recubrimiento empleado, existe una distribución del límite elástico única frente al espesor del recubrimiento, hasta una profundidad de  $1.5 \mu\text{m}$  desde la superficie de la película [136]. Según los resultados obtenidos, la deformación del material del recubrimiento inducida por los granos gruesos de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y el correspondiente aumento del límite de elasticidad frente a la presión son mayores comparados con los granos finos de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  bajo las mismas condiciones.

El límite de elasticidad determinado para ambos tamaños de los granos examinados permanece prácticamente inafectado a una presión de 0.4 MPa. Además, la tensión residual equivalente inducida, cambia en el recubrimiento después del micro-chorreado a varias presiones (ver Figura 2.49 b), y el aumento de la tensión residual equivalente es igual a diferentes límites elásticos [137]. El micro-chorreado por grano grueso de  $Al_2O_3$  contribuye a un significativo aumento de las tensiones residuales hasta una presión de 0.3 MPa, y a mayores presiones las tensiones residuales equivalentes permanecen prácticamente invariables y se extienden más profundamente desde la superficie del recubrimiento. Similar comportamiento, pero con mecanismos menos intensos, tienen lugar con el micro-chorreado húmedo por granos finos de  $Al_2O_3$  ( $d_g \approx 10 \mu m$ ). El aumento de las tensiones de compresión descritas en la estructura de la película, deterioran la ductibilidad de la película, y por tanto, aumenta la fragilidad del recubrimiento.

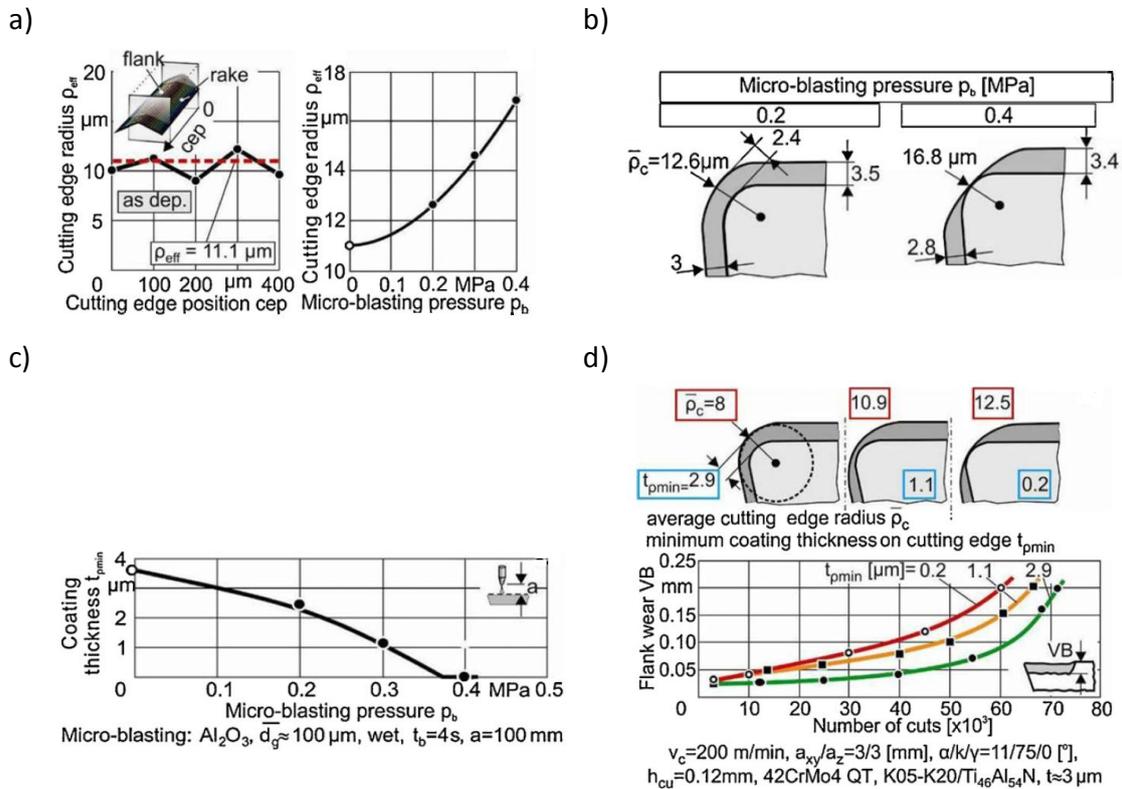
La Figura 2.50 muestra el número conseguido de cortes hasta un desgaste de flanco de 0.2 mm de herramientas recubiertas sometidas a un micro-chorreado húmedo por un grano fino o grueso de  $Al_2O_3$ . El mejor rendimiento de la herramienta de corte es para el caso de granos gruesos de  $Al_2O_3$  micro-chorreados a una presión de 0.2 MPa, alcanzando una vida aproximadamente de 130000 cortes, hasta un desgaste de flanco de 0.2 mm.



**Figura 2.50.** Comparación del desarrollo del desgaste de flanco de herramientas recubiertas sujetas a un micro-chorreado húmedo con grano fino o grueso a distintas presiones [13]

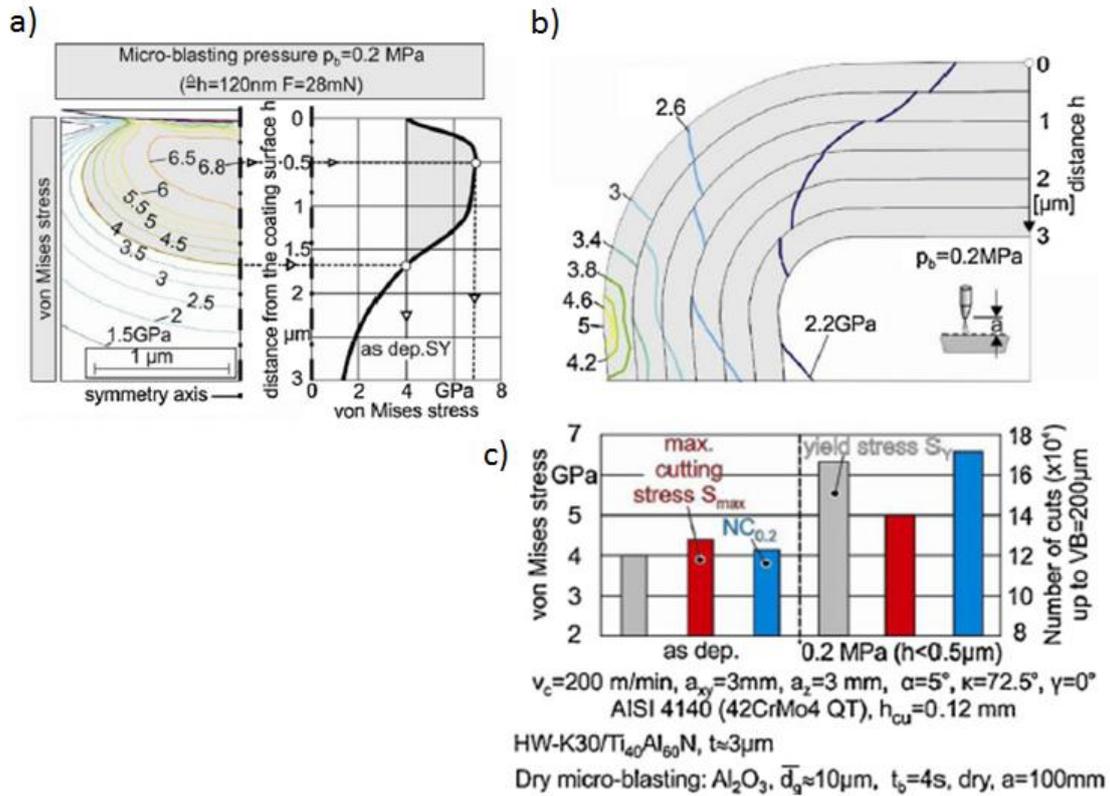
Las herramientas tratadas a 0.4 MPa tienen particularmente el mismo rendimiento de corte que como las herramientas sin tratar. Esto se debe al arranque local del recubrimiento, que aumenta la fragilidad de la película y se revela el sustrato después del micro-chorreado húmedo a esta presión, dañando localmente la barrera térmica del

redondeamiento del filo (ver Figura 2.51) [134]. Una disminución del espesor del recubrimiento  $t_{p \text{ min}}$  supone un crecimiento de las cargas mecánicas y térmicas en el sustrato, y por ello, el rendimiento de la herramienta de corte recubierta se deteriora.



**Figura 2.51.** (a) Radio del filo de corte  $\rho_{\text{eff}}$ . (b) geometrías del filo de corte. (c) Espesor de recubrimiento mínimo  $t_{p \text{ min}}$  de plaquitas recubiertas con micro-chorreado húmedo a varias condiciones. (d) Desarrollo del desgaste de flanco frente al número de cortes en fresado con varios bordes de filos de corte [13]

Por último, la tensión de Von Mises, desarrollada después del micro-chorreado a lo largo del eje de simetría del grano, depende de la distancia desde la superficie del recubrimiento (ver Figura 2.52), donde las áreas sombreadas indican la deformación plástica del material de la película. La tensión máxima es mayor que el límite elástico de la película en el caso de la película sin tratar (ver Figura 2.52 c), frente a una película micro-chorreada a 0.2 MPa donde sucede lo contrario, aportando suficiente resistencia a la película para soportar las cargas de corte. De esta forma, la realización de un micro-chorreado a 0.2 MPa contribuye a un significativo incremento del número de cortes, con la misma anchura de desgaste de flanco, comparándolo con la herramienta recubierta sin tratar [136].



**Figura 2.52.** (a) Cálculos de la distribución de las tensiones plásticas de Von Mises en un recubrimiento TiAlN después de un micro-chorreado. (b) Distribución de tensiones en la región de un filo de corte recubierto después de un micro-chorreado a una presión de 0.2 MPa. (c) Número logrado de cortes hasta un desgaste de flanco de ca. 0.2 mm en el caso de solo recubierto, y recubierto y después de micro-chorreado a 0.2 MPa [13]

## 2.4. Técnicas de caracterización

### 2.4.1. Caracterización de los recubrimientos

En este apartado se describen algunas de las técnicas experimentales empleadas para la caracterización de los recubrimientos. Las películas delgadas de PVD son de materiales muy duros y frágiles, donde propiedades como la fatiga, tenacidad, tensiones residuales, adhesión, propiedades tribológicas y espesor, son fundamentales en el rendimiento de las herramientas de corte recubiertas. Existen una serie de ensayos experimentales-analíticos, para cuantificar estos parámetros, que proporcionan información referente al material y propiedades funcionales de la película y su sustrato. En la Figura 2.53, se muestra algunos de los métodos para determinar datos dimensionales y funcionales de las herramientas recubiertas, y del material [13].

PROPIEDADES		MÉTODOS DE REALIZACIÓN DE ENSAYOS																
		BC	WLS	IIT	S	NS	RC	TRM	DiF	OX	EDX	SEM	XRD	TEM	NI	NIT	IT	ITMFS
DIMENSION	Espesor	✓																
	Distribución de espesor en el filo de corte		✓															
FUNCIONAL	Adhesión			✓	✓	✓	✓											
	Fricción							✓										
	Difusión								✓									
	Estabilidad química									✓								
MATERIAL	Estructura										✓	✓	✓	✓				
	Tensiones residuales												✓					
	Propiedades mecánicas														✓			
	Dureza														✓			
	Fragilidad															✓		
	Fatiga																✓	
	Fatiga a alta deformación																	✓
<b>BC:</b> Calotest (Ensayo de cráter de bola-Ball Cratering Test) <b>WLS:</b> Mediciones 3D escaneando luz blanca <b>IIT:</b> Ensayo de impacto inclinado <b>S:</b> Scratch Test (Ensayo de Resistencia al rayado) <b>NS:</b> Nano-Scratch Test <b>RC:</b> Rockwell C <b>TRM:</b> Tribómetro (TRiboMeter) <b>DiF:</b> Ensayo de Difusión (DIFfusion Test) <b>OX:</b> Ensayo de oxidación <b>EDX:</b> Espectroscopio de Energía-dispersa de Rayos X <b>SEM:</b> Microscopio electrónico de barrido <b>XRD:</b> Difracción de Rayos X <b>TEM:</b> Microscopio electrónico de transmisión <b>NI:</b> Nano-indentación <b>IT:</b> Ensayo de Impacto <b>ITMS:</b> Ensayo de Impacto con señal de fuerza modulada																		

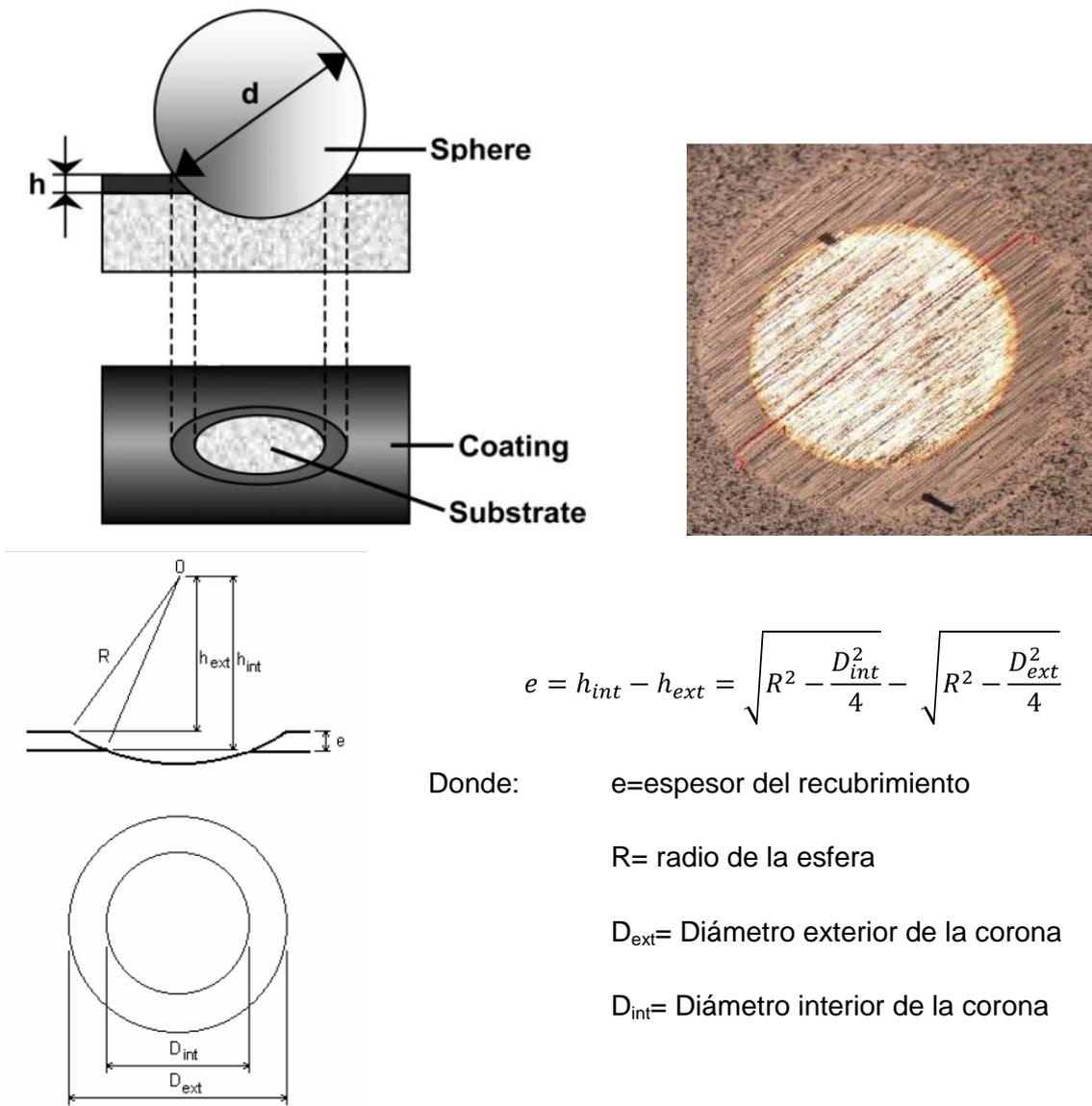
Figura 2.53. Métodos principales para determinar las propiedades dimensionales y funcionales de las herramientas recubiertas y del material [13]

#### **2.4.1.1. Ensayo Calotest**

El método empleado para medir el espesor del recubrimiento es el de “Calotest” también conocido como ensayo de cráter de bola (Ball Cratering Test). Este ensayo consiste en desgastar el recubrimiento hasta hacer visible el sustrato, haciendo rodar sobre él una esfera en la que se deposita pasta de diamante como elemento abrasivo.

La zona desgastada es una corona como se indica en la Figura 2.54, que se observa al microscopio para determinar los diámetros exterior e interior de la corona. El espesor se puede calcular a partir de estos dos diámetros por las relaciones geométricas que se extraen (ver Figura 2.54).

Para que la herramienta recubierta trabaje de manera óptima con las características que aporta el recubrimiento, es necesario que el espesor del recubrimiento esté entre un rango de valores. Si el espesor es menor, no adquirirá las propiedades, si en cambio, es mayor, se puede producir descascarillamientos y fracturas indeseables. En herramientas micro, el daño es mayor, ya que un mayor espesor del que debiera, supone un cambio en la geometría y por lo tanto, en las propiedades de la herramienta. El valor del espesor del recubrimiento en herramientas, suele estar comprendido entre 1  $\mu\text{m}$  y 8  $\mu\text{m}$ .



**Figura 2.54.** Esquema del ensayo de Calotest, y ecuación para obtener el espesor del recubrimiento

#### 2.4.1.2. Ensayo Rockwell C

El ensayo Rockwell C determina la adhesión de manera cualitativa. Por lo general, el valor de la adhesión no es tan relevante a nivel cuantitativo, sino de manera cualitativa, es decir, lo importante es si esta o no bien adherido, no siendo tan importante cuan adherido se halla el recubrimiento.

Este ensayo Rockwell C, sigue el estándar VDI 3198/1911 [138], cuyo principio se muestra en la Figura 2.55 [139], y consiste en un indentador cónico de diamante que penetra en la superficie del recubrimiento, produciendo una fractura del mismo y una deformación plástica del sustrato. El tipo y volumen de la zona fracturada determinan

en primer lugar la adhesión del recubrimiento y luego su fragilidad. La evaluación de la huella se realiza en un microscopio óptico tomando como guía la Figura 2.55.

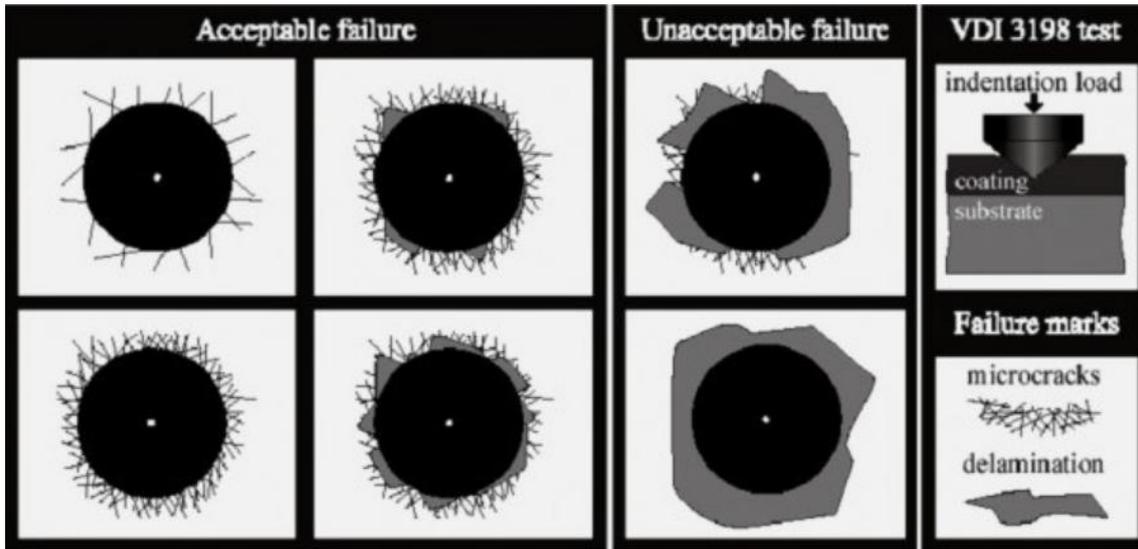
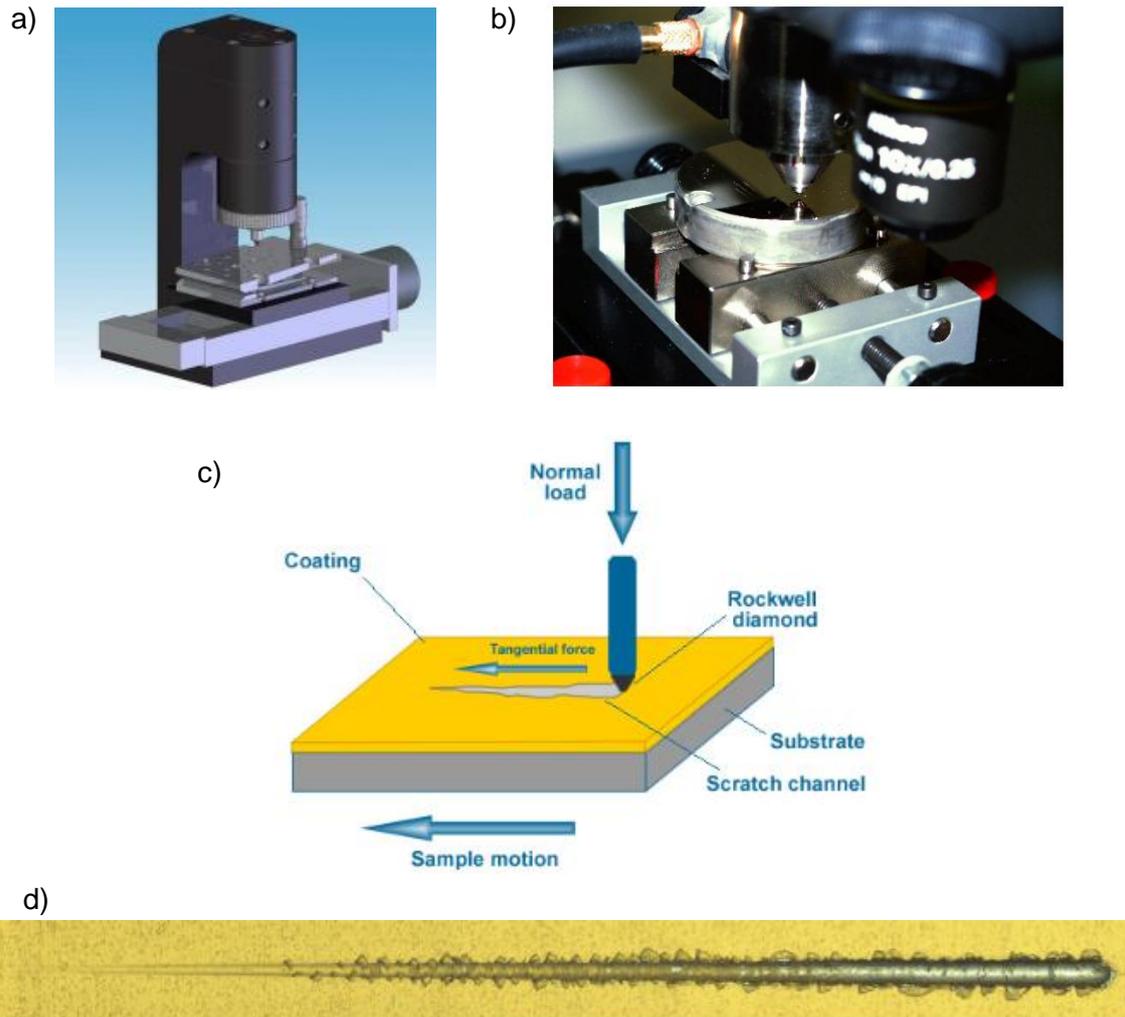


Figura 2.55. Esquema del ensayo de adhesión VDI 3198 [139]

#### 2.4.1.3. Scratch Test

El Scratch Test, o ensayo de resistencia al rayado, suministra resultados cuantitativos de adhesión [140], y consiste básicamente en realizar una indentación con un indentador de geometría Rockwell (indentador cónico de con un ángulo de 120° y radio 200  $\mu\text{m}$ ) mientras la muestra o el indentador se desplaza en una dirección (dirección de rayado), manteniendo en todo momento la punta del indentador en contacto con la muestra. Este rayado puede realizarse a carga constante durante toda la huella y aumentando la carga en huellas sucesivas, o se puede hacer aumentando la carga progresivamente en un única huella. La velocidad de carga es constante y la carga normal es controlada a lo largo del ensayo. Al aumentar la carga normal aplicada, la punta produce de modo progresivo un daño mecánico en el recubrimiento y el sustrato a través de la combinación de tensiones de indentación elasto-plásticas, fuerzas de fricción, y tensiones residuales en el recubrimiento (ver Figura 2.56).



**Figura 2.56.** a) equipo de Scratch Test; b) detalle del equipo de Scratch Test; c) esquema ilustrativo de la realización del Scratch Test; d) canal producido durante el ensayo

Las fuerzas normales que producen un tipo de fallo específico, definido y reproducible se define como carga crítica ( $L_c$ ). Se pueden definir uno o más tipos de carga crítica ( $L_{cN}$ ) para los distintos niveles de daños en los recubrimientos en un mismo sistema de sustrato-recubrimiento. El fallo del recubrimiento se analiza por microscopía óptica tras el ensayo. Además se pueden registrar las fuerzas tangenciales o de emisión acústica para determinar los distintos niveles de fallo en el recubrimiento. Este método se puede aplicar a recubrimientos duros (con durezas mayores o iguales a  $HV = 5\text{GPa}$ ) y finos ( $\leq 30\ \mu\text{m}$ ), en sustratos metálicos o cerámicos.

Este ensayo pretende determinar la integridad mecánica, los modos de fallo, y la fuerza de adhesión práctica de un recubrimiento duro específico en un sustrato metálico o cerámico determinado. Este método no mide la fuerza de adhesión “fundamental” del enlace entre el sustrato y el recubrimiento, sino que da una medida

cuantitativa de la fuerza de adhesión “práctica” de la resistencia al rayado del sistema sustrato-recubrimiento en función de la carga aplicada. La fuerza de adhesión y los modos de fallo dependen de una compleja interacción de las propiedades sustrato-recubrimiento (dureza, resistencia a la fractura, módulo de elasticidad, mecanismos de fallo, microestructura, rugosidad superficial, defectos, etc.) y de los parámetros de ensayo (propiedades y geometría de la punta, velocidad de carga y desplazamiento, etc.).

En la determinación de la adherencia por el método de Scratch, quizás el reto experimental más difícil es definir y clasificar los niveles y características de los fallos progresivos. Como los recubrimientos de distintas familias tienen distintos modos de fallo (que a su vez pueden depender de la dureza, enlace en la interfase, método y parámetros de ensayo), no hay un modo universal de clasificar el modo de fallo de un recubrimiento. Existen diversos autores que han realizado clasificaciones generales de categorías y descripciones de modos de fallo [141], [142] y [143]. La huella de rayado se puede comparar con los atlas de referencia, para establecer los diferentes modos de fallo o fractura (ver Figura 2.57) [144].

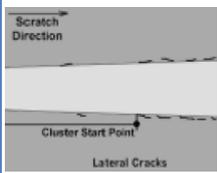
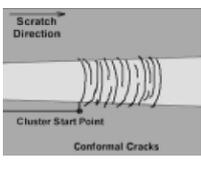
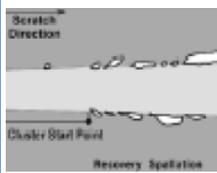
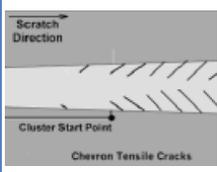
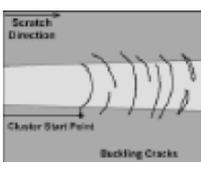
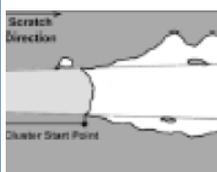
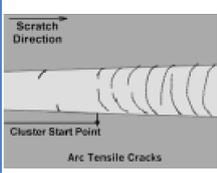
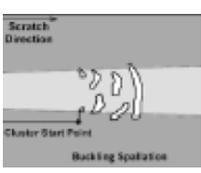
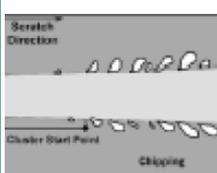
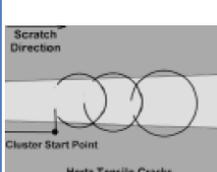
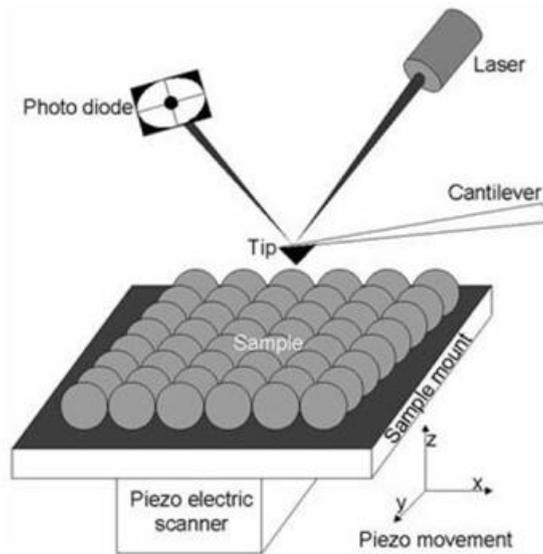
Term	Drawing	Term	Drawing	Term	Drawing
Lateral Cracks		Conformal Craks		Recovery Spallation	
Forward Chevron Tensile Craks		Buckling Cracks		Gross Spallation	
Arc Tensile Craks		Buckling Spallation		Chipping	
Hertz Tensile Craks		Wedging Spallation			

Figura 2.57. Atlas de huellas de Scratch [144]

#### 2.4.1.4. Microscopio de Fuerza Atómica (AFM)

La microscopía de fuerza atómica tiene una gran resolución espacial cuando realiza medidas topográficas de la superficie de los materiales, por lo que es utilizado para medir la rugosidad superficial y topográfica de los recubrimientos. En la Figura 2.58 se muestra el principio usado en AFM.

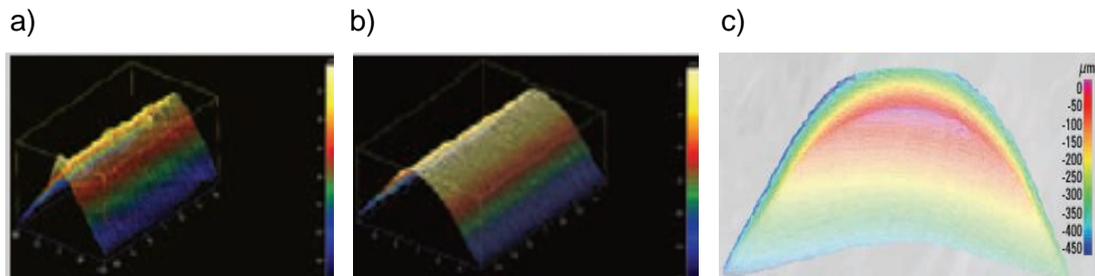


**Figura 2.58.** Esquema del principio de operación del AFM

Una punta fabricada de fósforo dopado con silicio, y montada al final de un brazo de silicio, es la que explora la superficie de la muestra. Debido a las fuerzas interatómicas entre la punta y la muestra, el brazo es deflexado, siendo la deflexión medida por el monitoreo del cambio de posición del rayo del láser reflejado desde el respaldo del brazo. La imagen topográfica es obtenida por el monitoreo de la interacción entre la punta y la superficie de la muestra cuando la punta y el brazo hacen la exploración a lo largo de la superficie.

El AFM recoge dos tipos de datos: los datos de altura, los cuales corresponden al cambio de altura del cristal piezo eléctrico para mantener la amplitud de vibración del brazo constante, y datos de amplitud, los cuales describen el cambio de amplitud. Aunque solamente los datos de altura proveen información topográfica, las imágenes construidas con datos de amplitud, proveen mayores contrastes en los bordes y pueden ser usadas para identificar características de la superficie, por ejemplo límites columnares. Los datos de altura pueden ser usados por un software del microscopio para calcular la rugosidad de la superficie.

Una alternativa al uso del AFM, para obtener la misma información, es la utilización de un rugosímetro, para la rugosidad, y un perfilómetro óptico, que además de permitir medir de forma fácil y rápida las rugosidades, se pueden obtener perfiles y topografías de la superficie, ofreciendo la información de una manera tridimensional (ver Figura 2.59).



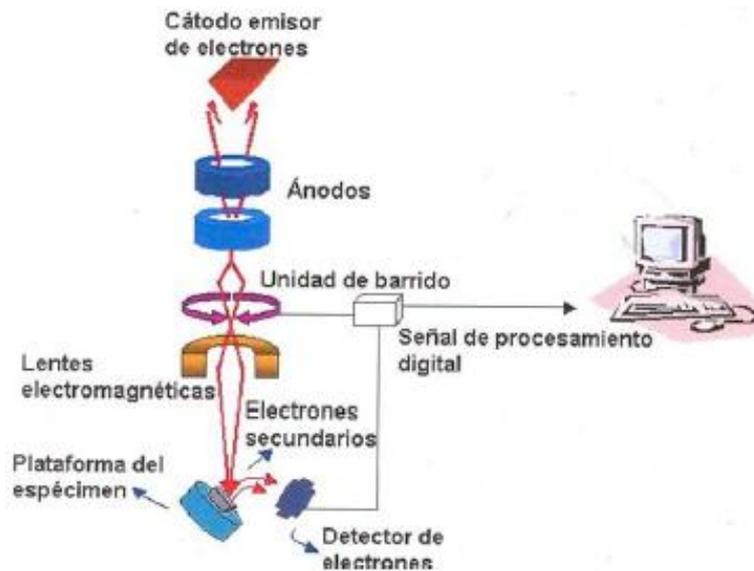
**Figura 2.59.** Imágenes de un perfilómetro óptico: a) filo de corte después del rectificado; b) redondeamiento del filo después del post-tratamiento; c) vista 3D del filo de corte de una plaquita [17]

#### 2.4.1.5. Microscopía electrónica de barrido SEM y FEG-SEM

Los microscopios electrónicos son utilizados para ver la estructura de los materiales, y entre sus características principales está la energía máxima del haz electrónico que es de 30 keV, producido en un filamento de wolframio. Estos electrones se enfocan mediante bobinas electromagnéticas que actúan como lentes en un microscopio óptico de tal forma que se obtiene un haz de electrones muy fino. Estos microscopios pueden formar imágenes con electrones retrodispersados (contraste atómico) y/o secundarios (contraste topográfico). Además, pueden disponer de un sistema analizador de dispersión de energías de rayos X (EDAX). El SEM permite la observación y análisis de la rugosidad superficial, y los análisis EDAX permiten conocer las concentraciones de los elementos que componen la superficie de la muestra.

Existen dos modelos de microscopios: el SEM convencional, en el que los electrones se generan al calentar un filamento de wolframio por medio de una corriente eléctrica a una temperatura cercana a los 2800°C; y el FEG-SEM, en el que una punta muy fina de wolframio funciona como cátodo (diámetro de la punta  $\approx 1-10 \mu\text{m}$ ), logrando la emisión de electrones bajo vacío con una diferencia de potencial entre cátodo y ánodo del orden de 5-30kV. Posteriormente, el haz de electrones se enfoca con lentes electromagnéticas, y como resultado de este bombardeo, el espécimen emite diferentes tipos de electrones. Gracias a un detector que percibe los electrones secundarios, se construye la imagen de la superficie de la muestra, al comparar la

intensidad de estos electrones secundarios con el barrido del haz de electrones primarios, originándose la imagen en el monitor (ver Figura 2.60).



**Figura 2.60.** Diagrama de un microscopio FEG-SEM

Mediante este tipo de microscopio, FEG-SEM, se pueden lograr imágenes con mejor brillo y contraste, menos distorsión electrostática y alcanzar una resolución entre 3 y 6 veces mayor que con el SEM.



**Figura 2.61.** Microscopio FEG-SEM JEOL JSM-7100F [145]

#### 2.4.1.6. Microscopía electrónica de transmisión TEM

La microscopía de transmisión de electrones (Transmission Electron Microscope, TEM) es una técnica de microscopía donde un haz de electrones acelerados se hacen pasar a través de una muestra delgada (5-500 nm) y forman una imagen o difracción a partir de los electrones transmitidos o difractados. El TEM se usa para determinar la microestructura de los recubrimientos, así como para determinar su tamaño de grano.

El sistema óptico-electrónico del microscopio electrónico de transmisión está constituido por un cañón de electrones (típicamente de 100 a 400 kW) y un sistema de lentes dispuestos en una columna vertical en alto vacío ( $1.3 \times 10^{-3}$  Pa). El sistema óptico es similar al de un SEM, pero con más sistemas de magnificación. Las lentes condensadoras coliman el haz de electrones que pasan a través de la muestra, y se utiliza una lente objetivo para formar la primera imagen en el plano objeto de la primera lente proyectora. Esta imagen es ampliada 40 veces. Una pequeña zona de esta imagen se proyecta en una pantalla fluorescente o pantalla topográfica por otra lente proyectora. La imagen se forma a partir de la distribución de intensidad de los electrones saliendo de la parte posterior de la superficie de la muestra. Se puede llegar a alcanzar una ampliación de 10.000 a 1.000.000. Además, se puede utilizar el TEM para formar espectros de difracción electrónica. Esta difracción se formaría en el plano focal posterior de la lente objetivo, y puede lograrse ajustando la excitación de la lente proyectora.



**Figura 2.62.** Microscopio TEM JOEL JEM-2010 [145]

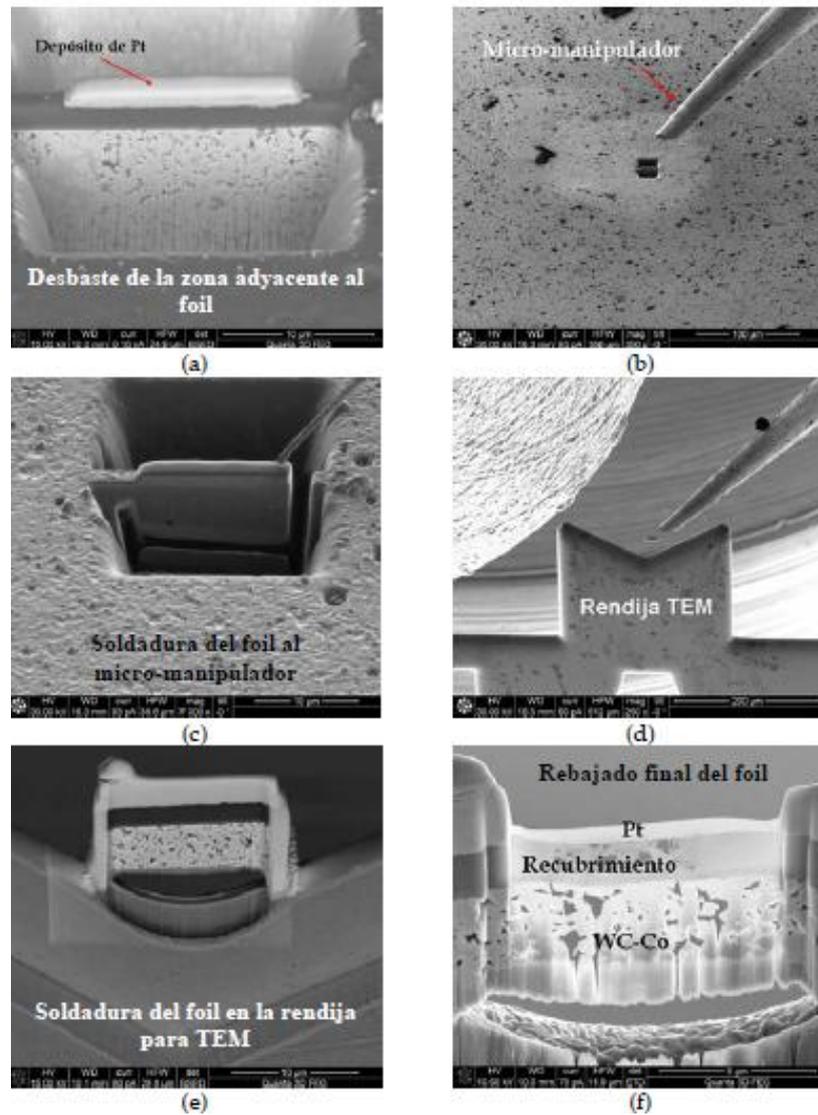
Para estudiar los recubrimientos mediante TEM, es necesaria la preparación de foils de la sección transversal a partir de un equipo de FIB (Focus Ion Beam), como el que se ilustra en la Figura 2.63.



**Figura 2.63.** Equipo FIB Quanta 3D FEG [146]

El sistema del FIB deposita una capa de Pt sobre la superficie del recubrimiento por la adición de un gas dentro de la cámara. Esta capa de Pt tiene como función proteger la superficie del recubrimiento durante el bombardeo de iones. Una vez que se deposita esta capa, se procede a bombardear con iones las zonas aledañas, formando agujeros en cada uno de los lados de la capa protectora hasta dejar el foil con un espesor aproximado de 2  $\mu\text{m}$ .

Una vez adelgazado el foil, éste se pega a un micro-manipulador, se retira y se vuelve a pegar en una rendija de TEM. El corte del foil se realiza por medio de bombardeo iónico y se pega con material de Pt. Finalmente, el foil se adelgaza por bombardeo de iones hasta el espesor requerido para el análisis de TEM, aproximadamente 50 nm, siendo el área final aproximado del foil de 10  $\mu\text{m}$  x 5  $\mu\text{m}$  x 0.05  $\mu\text{m}$ . La metodología usada para la obtención de estos foils se representa esquemáticamente en la Figura 2.64.



**Figura 2.64.** Metodología usada para la obtención de foils para TEM por medio de FIB

#### 2.4.1.7. Difracción de Rayos X

La técnica de difracción de rayos X se emplea para obtener difractogramas de los recubrimientos, que permiten determinar las fases presentes así como los parámetros de red de los mismos, y también se emplea para medir las tensiones residuales de los recubrimientos.

Esta técnica consiste en hacer incidir un haz de rayos X monocromático sobre una muestra, y registrar la intensidad de los rayos X difractados en función del ángulo de difracción (difractograma). La aparición de picos de difracción es señal de la presencia de estructuras cristalinas ordenadas en el sistema (planos cristalinos). La intensidad

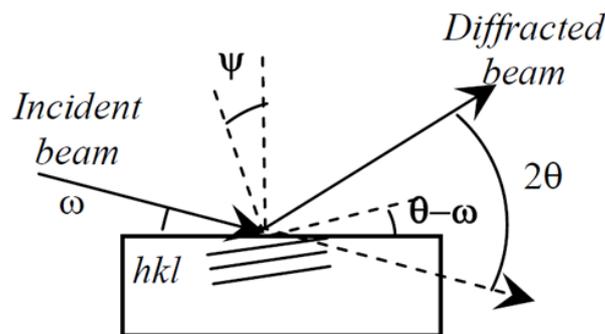
difractada depende básicamente del tipo y densidad de átomos que componen el plano, mientras que el ángulo es función de la distancia interplanar.

Para determinar las fases presentes en una muestra, en este caso en cada uno de los recubrimientos, así como el parámetro de red, se deben obtener difractogramas de cada una de las muestras o recubrimientos, que serán los patrones de difracción  $2\theta$ - $\theta$ .

De acuerdo con la ley de Bragg,  $n \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin \theta$ , la posición angular,  $2\theta$ , de un determinado pico de difracción, es menor cuanto menor es la longitud de onda,  $\lambda$ , con la que se mide, y por tanto, si se realiza un barrido en un rango concreto de valores  $2\theta$ , cuanto menor sea la longitud de onda de la radiación utilizada, mayor número de reflexiones aparecerán en el espectro de difracción.

El método del ángulo rasante (ver Figura 2.65), permite identificar las fases presentes en el recubrimiento y los respectivos valores de  $2\theta$ , eliminando el efecto del sustrato. Con estos valores de  $2\theta$ , se puede estimar el parámetro de red del recubrimiento, las fases, al igual que las tensiones residuales presentes.

En los patrones de difracción a partir del ángulo rasante, los planos de red que contribuyen a la formación de los picos están inclinados diferentes ángulos con respecto a la superficie normal. El ángulo incidente es siempre el mismo,  $\omega = \text{cte}$  y únicamente se mueve el detector de intensidad.

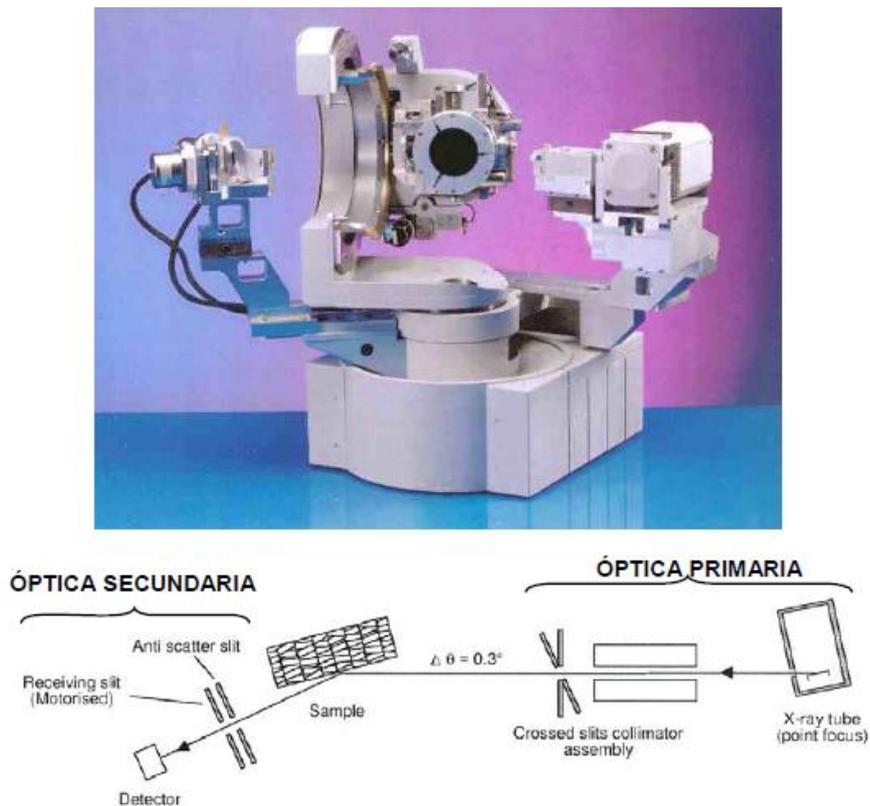


**Figura 2.65.** Técnica de ángulo rasante

De la Figura 2.65, se determina que el ángulo de un grupo de planos hkl que contribuye a la intensidad de difracción es  $\psi = \theta - \omega$ . En consecuencia, el parámetro de red determinado para cada reflexión hkl no será afectado únicamente por errores experimentales, sino también por las tensiones residuales presentes en el recubrimiento.

El método para medir las tensiones residuales mediante difracción de rayos X [147], [148] y [149] (ver Figura 2.66), se basa en que cuando un material cristalino está sometido a tensiones (externas o residuales), las deformaciones elásticas resultantes provocan cambios en el espaciado de los planos atómicos del cristal. Con difracción de rayos X se puede medir este cambio en el espaciado interplanar, y de esta forma obtener las tensiones del material.

Las medidas de tensiones residuales, se pueden calcular por dos métodos, el método del  $\text{sen}^2 \psi$  y el método del ángulo rasante.



**Figura 2.66.** Ilustración del difractómetro Philips X'Pert MRD y esquema de la configuración típicamente empleada en la medida de tensiones residuales [150]

El método del  $\text{sen}^2 \psi$ , es un método sencillo, pero sólo se puede aplicar si el material es homogéneo, sin textura importante, de grano fino, y con un estado de tensiones no triaxial [147], [148], [151] y [152]. Se basa en ajustes lineales de un número suficiente de curvas del espacio interplanar  $d_{\phi\psi}$  frente a  $\text{sen}^2 \psi$ . El problema de usar este método es que en muchos recubrimientos, los picos del sustrato se solapan con los del recubrimiento, por lo cual las medidas obtenidas para determinar las tensiones residuales pueden ser poco fiables.

El método del ángulo rasante puede calcular valores de tensiones residuales y parámetros de red, cuando el método de  $\sin^2 \psi$  no se puede aplicar por problemas de solapamiento.

#### 2.4.1.8. Método de deflexión: Ensayo de Stoney

El valor de las tensiones residuales de un recubrimiento, está ligado al espesor máximo del recubrimiento que se puede aplicar, por lo que cuanto mayores sean las tensiones, menor tendrá que ser el espesor máximo. En un recubrimiento se busca que las tensiones residuales sean pequeñas, lo que permitirá trabajar con mayor espesor sin que el sustrato se descascarille. Las tensiones residuales son diferentes para cada recubrimiento y dependen, entre otros factores, de la diferencia entre coeficientes de dilatación entre sustrato y film, y de las fuerzas intermoleculares entre las moléculas de cada uno de los materiales.

El método de deflexión es la técnica más empleada para determinar la tensión residual en un recubrimiento. Básicamente consiste en la medida de la curvatura de una tirita debido a la deposición de un recubrimiento. La ecuación para calcular la tensión residual fue presentada por primera vez por Stoney en 1909 [153].

Si se tiene un recubrimiento depositado en una cara de una tirita, y se asume que tanto el sustrato como el recubrimiento son homogéneos, existe una fuerza de desacoplamiento en la interfase recubrimiento-sustrato, por la tensión residual del recubrimiento, que curva la tirita hacia arriba (cóncavo) o hacia abajo (convexo), dependiendo de si la tensión es a tracción o a compresión.

Para medir la curvatura es necesaria la utilización de un perfilómetro óptico, o de un microscopio 3D, pero en el presente trabajo, se ha procedido a diseñar un nuevo sistema basado en éste, pero que se pueda medir con un microscopio tradicional, que es más accesible.

El objetivo de este nuevo diseño, es poder obtener los valores de las tensiones con un error de aproximadamente el 10%, y se optó por un diseño que contaba con cuatro partes unidas por tornillos de M4, como se puede observar en la Figura 2.67.

- **Placa base.** Sirve para evitar la entrada de recubrimiento en la parte inferior de las pletinas de medida.
- **Placa de apoyo.** Sirve para medir el desplazamiento de las pletinas de medida sin que choquen con la placa base y para dotarlas de un punto fijo.

- **Pletinas de medida.** Estas son equivalentes a las libres de Stoney. Se recubrirán por una de sus caras, por lo que serán desplazadas hacia abajo por las tensiones internas de compresión. Este desplazamiento junto con el espesor del recubrimiento, será el que proporcione el valor de las tensiones.
- **Máscara.** Sirve para evitar que las pletinas alternativas se recubran. Las pletinas sin recubrir sirven como referencia, suponiendo que no varían en posición durante el recubrimiento.

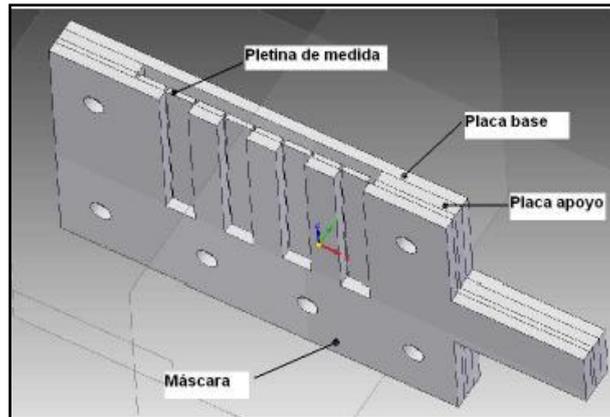


Figura 2.67. Esquema del montaje de las pletinas

Estas probetas son introducidas en el mismo ciclo de recubrimiento que la herramienta. La deformación de las pletinas hacia la placa base, es medido con el microscopio, que junto con el espesor se introducen en la ecuación de Stoney adaptada para este caso:

$$\sigma = \frac{E}{3 \cdot a^2 \cdot t} \cdot t_s^2 \cdot (b_o - b_f)$$

Siendo:

- E= módulo de elasticidad del material
- a= longitud de la pletina
- t= espesor del recubrimiento
- t<sub>s</sub> = espesor del sustrato
- v= coeficiente de Poisson
- b= desplazamientos

A continuación se muestra una comparación entre los resultados obtenidos con este método y con el ensayo de Stoney, que se realizó con chapas libres, y se estudió en las instalaciones de la Escuela de Ingenieros de Bilbao (ver Tabla 2.5 y Tabla 2.6).

PROBETA	h medida (μm)	h teórica (μm)	σ medida (GPa)	σ teórica (GPa)	hf (μm)	Error (%)
1 AlTiN	201.57	585.14	2.41	2.7	2.15	10.74
2 AlTiN	55.92	146.30	2.67	2.7	2.15	1.11
3 TiN	336.60	481.11	3.15	4.5	2.75	30.04
4 AlTiN	176.45	544.32	2.27	2.7	2.00	15.93
5 AlCrSiN	329.50	653.20	4.24	8.0	2.10	47.00
6 TiCN	353.40	349.90	4.54	4.5	2.00	-0.89
7 CrN	197.60	342.14	3.76	4.5	1.35	16.44

Tabla 2.5. Tensiones medidas con el primer diseño

PROBETA	TENSIÓN TEÓRICA	TENSIÓN MEDIA	ERROR (%)
1 TiN; 21341	4.5	4.46	0.90
2 TiN; 21373	4.5	4.36	3.11
3 AlTiN; 21366	2.7	2.67	1.11
4 AlCrSiN; 16356	8.0	9.00	-12.50
5 AlTiN; 21384	2.7	2.32	14.07
6 CrN; 19762	4.5	4.11	8.60
7 CrN; 19762	4.5	4.04	10.20

Tabla 2.6. Tensiones medidas con las chapas de Stoney

Los resultados obtenidos no son malos, pero hay algún error excesivo. Para conocer el origen del error, se hicieron pruebas de:

- Error en toma de medidas
- Tensiones de referencia inadecuadas
- Acabado superficial de las chapas
- Defectos de recubrimiento
- Entrada de recubrimiento en la parte inferior de las pletinas y en las pletinas de referencia
- Diferencia de espesor entre la zona en la que se mide, y en las propias pletinas
- Deformada inicial de la chapa y presión de los tornillos que deforma la chapa

Todos estos factores contribuyen al error, pero los más importantes son:

- Toma de medidas. Es inevitable y se corrige mediante un factor correctivo.
- Deformación de la chapa. Esta podría estar doblada inicialmente, o es causado por el apriete de los tornillos. Esto se corrige introduciendo arandelas para que exista una holgura entre las diferentes partes y que no se deformen las pletinas al apretar los tornillos.

Con estas correcciones se logró obtener un método en el que los errores estaban dentro del 10% admisible.

#### **2.4.1.9. Nanoindentación**

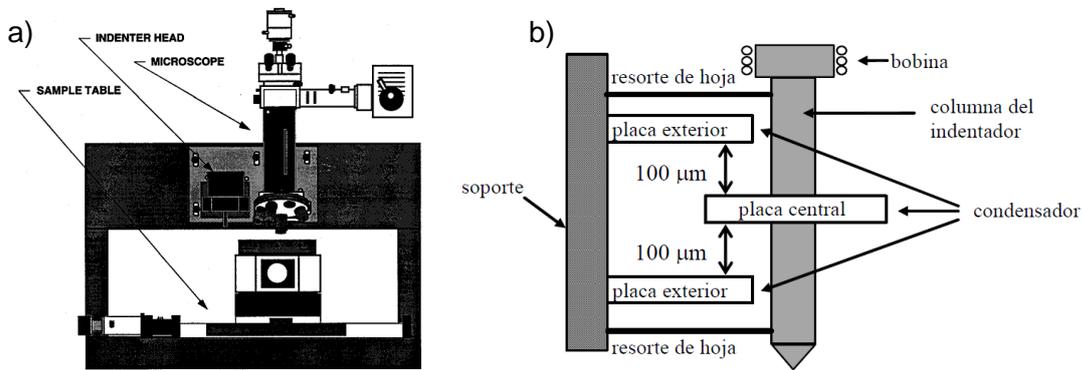
La dureza es definida como la resistencia de un material a la penetración, y no es una propiedad inherente de un material específico, como otras constantes como módulo de Young, coeficiente de Poisson, etc. La dureza del material puede estar afectada por la microestructura (tamaño de grano, límite de grano, inclusiones, etc.), orientación de la carga (efectos de anisotropía de la microestructura), condiciones del ensayo (temperatura, humedad, etc).

La mayor dificultad para medir la dureza en películas delgadas es probar que sea realmente la correspondiente a la película. Si la carga aplicada es muy grande, el sustrato sobre el cual está depositada la película, interactuará de tal forma que los valores de la dureza obtenidos no serán únicamente de la película. Para evitar el efecto del sustrato, se tiene que disminuir la carga aplicada a rangos de  $\mu\text{g}$ , y además, la profundidad de indentación deberá mantenerse dentro del 10% del espesor total de la película [154].

La nanoindentación es una técnica por la cual se pueden obtener los valores de dureza y el módulo elástico del recubrimiento. El equipo de nanoindentación consta de un indentador, que suele ser una punta de diamante, un microscopio óptico con cámara de video y una mesa de precisión que desplaza las muestras entre el microscopio y el indentador (ver Figura 2.68 a).

El indentador está constituido por una pequeña columna metálica que atraviesa el centro de un condensador de tres placas, de forma que la placa central del condensador es solidaria con la columna. En el extremo inferior de la varilla se fija una punta de diamante piramidal de tres caras (tipo Berkovich, aunque pueden utilizarse otras), y en el extremo superior una bobina con un imán para aplicar la carga. La columna se sujeta por medio de unos resortes de hojas que facilitan el correcto

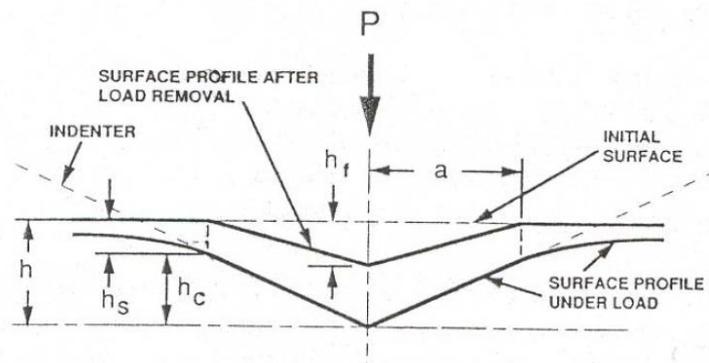
alineamiento del indentador introduciendo una rigidez mínima en dirección axial (ver Figura 2.68 b).



**Figura 2.68.** a) Esquema del nanoindentador: Nano Indenter II, b) Esquema del indentador [155]

Se realizan varias nanoindentaciones en la superficie del recubrimiento, el número de ellas será en función de la rugosidad del recubrimiento, ya que si la rugosidad es alta, con más medidas, se pueden minimizar los errores de medida.

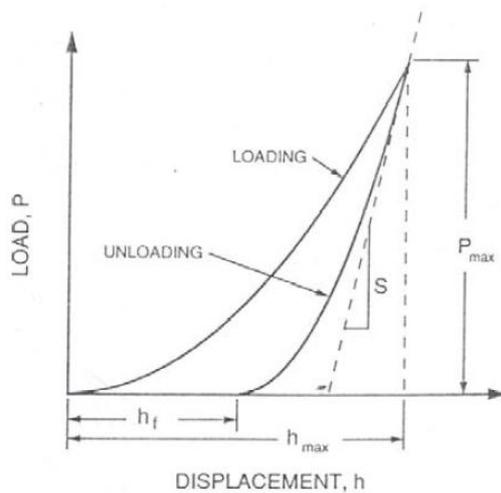
Si se analiza con el método de Oliver y Pharr [156], las curvas carga-desplazamiento obtenidas en estos ensayos, se pueden obtener los valores de dureza y el módulo de Young del recubrimiento. Este método está basado en una solución analítica del problema del contacto elástico entre un indentador y una superficie plana (ver Figura 2.69).



**Figura 2.69.** Representación esquemática de una sección de huella de indentación [156]

Al aplicar la carga, el material adquiere la forma del indentador, siendo el desplazamiento total  $h_{max}$ , la suma de la profundidad de contacto  $h_c$  (distancia vertical a lo largo del cual el contacto es hecho) y el desplazamiento de la superficie en el

perímetro de contacto  $h_s$ , debido a la deformación elástica de la superficie plana:  $h_c = h_{max} - h_s$ . Tras la descarga, el desplazamiento elástico se recupera, y retirado el indentador, la profundidad final de la dureza residual es  $h_f$ . Para determinar  $h_c$  de los datos experimentales, es necesario conocer  $h_s$ , que depende de la geometría del indentador. Oliver y Pharr [156] desarrollaron un método para estimar el desplazamiento  $h_s$  para el caso de un indentador Berkovich, basado en observaciones experimentales sobre diferentes tipos de materiales y soluciones analíticas para el problema del contacto elástico entre el indentador y una superficie plana, obtenida por Sneddon [157], asumiendo que las soluciones de Sneddon se aplican de igual manera en una superficie plana o en una superficie con huella de dureza (ver Figura 2.70).



Donde:

- $h_c$ = profundidad de contacto
- $P$ = carga de indentación
- $S$ = rigidez del contacto
- $\epsilon$ = constante que depende de la geometría del indentador

Indentador cilíndrico:	$\epsilon=1$
Indentador parabólico:	$\epsilon=0.75$
Indentador cónico:	$\epsilon=0.72$
Indentador Berkovich:	$\epsilon=0.75$

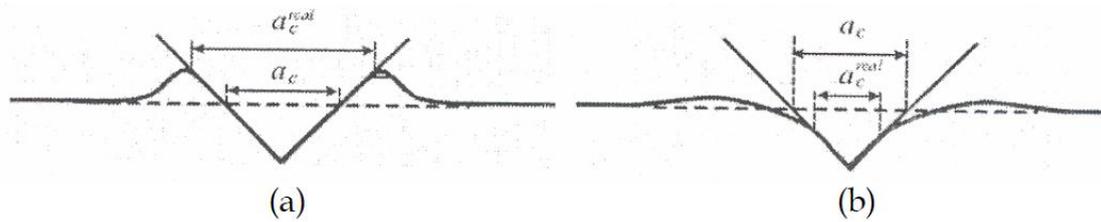
**Figura 2.70.** Esquema de una secuencia de datos de carga versus desplazamiento, y ecuación para obtener la profundidad de contacto [156]

La dureza se puede obtener a partir de la siguiente ecuación:

$$H = \frac{P}{A(h_c)}$$

donde  $P$  es la carga y  $A(h_c)$  es el área de la sección transversal del indentador a una distancia  $h_c$  desde la punta. Esta definición de dureza es distinta de la convencional, donde el área de contacto es la medida del tamaño de la huella. Existen dos motivos para usar esta nueva definición, siendo el primero, el material alrededor de la indentación, que puede tener levantamiento “pile-up” o hundimiento, “sink-in”, haciendo que el área real de contacto sea más pequeño o mayor que la derivada de la nanoindentación [158] y [159] (ver Figura 2.71); el segundo motivo es la recuperación

elástica de la zona indentada, lo que da lugar a que la medida resultante de la indentación deberá ser más pequeña que la calculada.



**Figura 2.71.** Ilustración de cómo el (a) pile-up y (b) sink-in influyen en el área real de contacto  $a_c^{\text{real}}$  comparado con el área de contacto  $a_c$  [160]

El módulo elástico se puede obtener a partir de la siguiente ecuación [156]:

$$S = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot E_r \cdot \sqrt{A(h_c)}$$

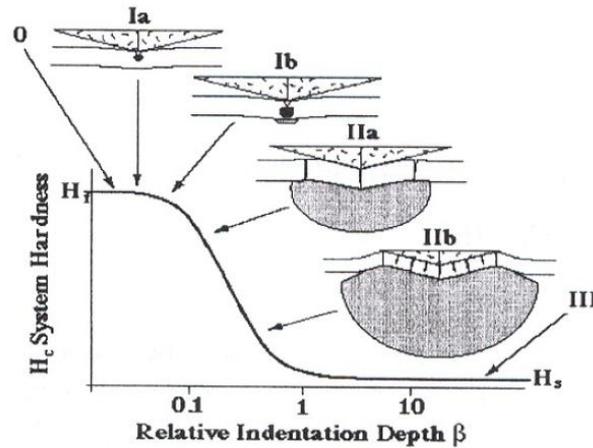
donde S es la rigidez inicial medida de la curva de descarga (ver Figura 2.70), y  $E_r$  es el módulo reducido, dado por la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{E_r} = \frac{1 - \nu^2}{E} + \frac{1 - \nu_i^2}{E_i}$$

donde E es el módulo de Young,  $\nu$  es el coeficiente de Poisson del material, y  $E_i$  y  $\nu_i$  son los mismos parámetros para el indentador, que habitualmente suelen ser  $E_i=1141$  GPa y  $\nu_i=0.07$ , para un indentador de diamante.

Otro método para obtener la dureza a través de un ensayo de nanoindentación, es el modelo de Korsunsky [161], que desarrolla un modelo matemático para el análisis general de la indentación en un sistema con recubrimiento, que permite determinar la dureza de un recubrimiento eliminando el efecto del sustrato en este tipo de medidas, e incluso calculando este efecto.

En la Figura 2.72, se observa que la plasticidad del recubrimiento domina el mecanismo cuando las cargas son bajas (zona I), y cuando aumenta la penetración, se observa que el sistema pasa a ser dominado por el efecto del sustrato (zona II y III).



**Figura 2.72.** Evolución de una indentación en un sistema sustrato-recubrimiento al aumentar la profundidad de penetración [161]

La ecuación que describe el modelo es la siguiente:

$$H_c = H_s + \frac{H_f - H_s}{1 + k\beta^2}$$

donde  $H_c$  es la dureza aparente del compuesto,  $H_f$  es la dureza intrínseca del recubrimiento,  $H_s$  es la dureza del sustrato,  $K$  es el parámetro de ajuste del modelo relacionado con el modo de respuesta del compuesto durante la indentación, y  $\beta$  es la profundidad de indentación relativa (PIR), definida como la relación entre la profundidad máxima de penetración (medida después de eliminar la carga y donde el recubrimiento se recupera elásticamente) y el espesor de la película.

### 2.4.2. Caracterización de los procesos

Uno de los aspectos más importantes es la adaptación de las condiciones de corte a las propiedades del recubrimiento. Los mecanismos de desgaste de las herramientas de corte recubiertas, que se analizarán con profundidad en el punto 3.3, a distintas velocidades de corte, se puede explicar considerando dos aspectos: el desarrollo de las fuerzas de la herramienta, y la resistencia al impacto no lineal del recubrimiento frente a la temperatura [13]. Se puede, simulando el proceso de corte por FEM, determinar las fuerzas desarrolladas en el corte y las temperaturas, y además por ensayos de impacto, investigar la resistencia al impacto de un recubrimiento a distintas temperaturas. La correlación entre la resistencia al impacto y el rendimiento de corte a distintas temperaturas permitirá un ajuste óptimo de los parámetros de corte a las propiedades del recubrimiento [11], [44], [162], [163], [164] y [165].

Puede ocurrir, que con ciertos tipos de recubrimiento, el rendimiento crezca con un aumento de la velocidad, y con otros recubrimientos, dicho aumento de velocidad implique un deterioro significativo del desgaste de la herramienta. En cualquier caso, se pueden establecer relaciones cuantitativas entre la fuerza crítica de impacto y el desgaste de flanco, y explicar el comportamiento de desgaste de la herramienta, facilitando el rendimiento de corte para distintas velocidades de corte [13].

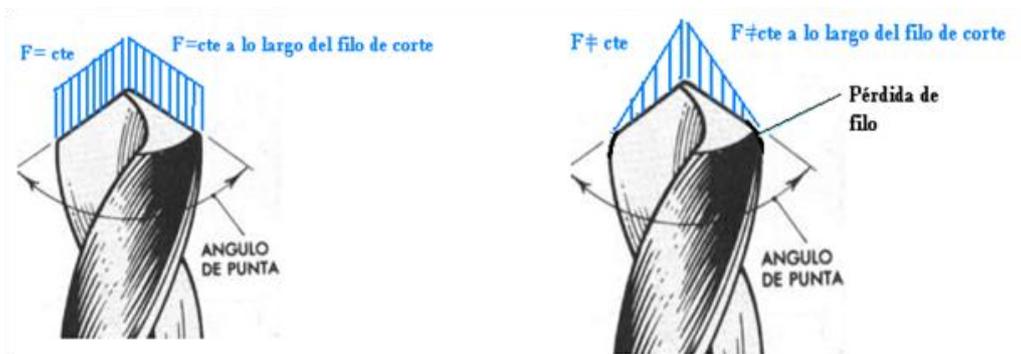
En este apartado, se trata de ver algunas de las características-propiedades de los procesos de corte a controlar.

#### 2.4.2.1. Monitorización de esfuerzos de mecanizado

Para caracterizar el desgaste de una herramienta recubierta durante el mecanizado, se puede monitorizar su comportamiento, midiendo para ello la fuerza axial o de avance, y el par de corte.

El análisis de las señales de fuerza y par, permiten extraer rasgos característicos del desgaste de una herramienta, ya que los desgastes provocan variaciones en los esfuerzos. Estos fenómenos de desgaste, los más representativos son, la adhesión (el material de la pieza se adhiere y despega alternativamente, de forma que, al producirse el despegue, la viruta arranca trozos del filo principal, chipping); y la abrasión progresiva del filo transversal.

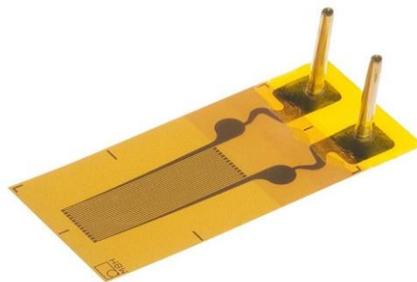
La señal de la fuerza de avance es la que recoge los cambios en el proceso, cuyo valor medio crece de manera progresiva. Con una herramienta nueva, la viruta obtenida tiene una sección constante a lo largo del filo; a medida que se desgasta, los filos se van redondeando, y parte de ellos no soportan la carga, por lo que la viruta comienza a ser no uniforme, aumentando la fuerza de corte, como se puede ver en la Figura 2.73.



**Figura 2.73.** Variación de la sección de la viruta con el desgaste en una broca

El comportamiento del par es más aleatorio, al variar la geometría, el radio de la misma disminuye y el brazo del par creado con respecto al eje de rotación disminuye pero el hecho de que la herramienta esté menos afilada hace que corte menos y el par puede aumentar. Por esta razón, el valor del par generado se puede tener menos en cuenta.

Para medir la fuerza de corte durante el mecanizado, se puede recurrir a **Galgas extensométricas**, que fueron los primeros sensores de fuerza de corte. La mayor desventaja era que para que puedan apreciar una deformación sensible, se deben colocar sobre elementos flexibles sometidos directamente a la fuerza de corte. Actualmente, con las mejoras en los materiales y tamaños, se pueden utilizar sobre elementos rotatorios transmitiendo las deformaciones mediante wireless.



**Figura 2.74.** Galgas extensométricas

Otra forma de medir la fuerza de corte, es el uso de **Sensores piezoeléctricos**, que se basan en cristales piezoeléctricos de cuarzo, convirtiendo la deformación en carga eléctrica, teniendo que estar sometidos a una cierta precarga para que reciban un esfuerzo cortante sin pérdidas. En los centros de mecanizado se suelen usar las **mesas dinamométricas** (ver Figura 2.75), que pueden medir fuerzas y momentos, y según el modelo, sirven para operaciones de torneado, o de fresado/taladrado. Están aislados frente a fluidos externos y virutas, y constan de una gran rigidez. Otro sistema de sensores piezoeléctricos, es el **dinamómetro rotativo** (ver Figura 2.76). Al igual que la mesa dinamométrica, mide fuerzas y par, pero éste se coloca en el husillo principal del centro de mecanizado. Estos sensores se aplican en el ámbito del I+D, ya que el uso a nivel industrial está limitado por el alto precio, falta de protección frente a un exceso de carga, y falta de un software amigable.

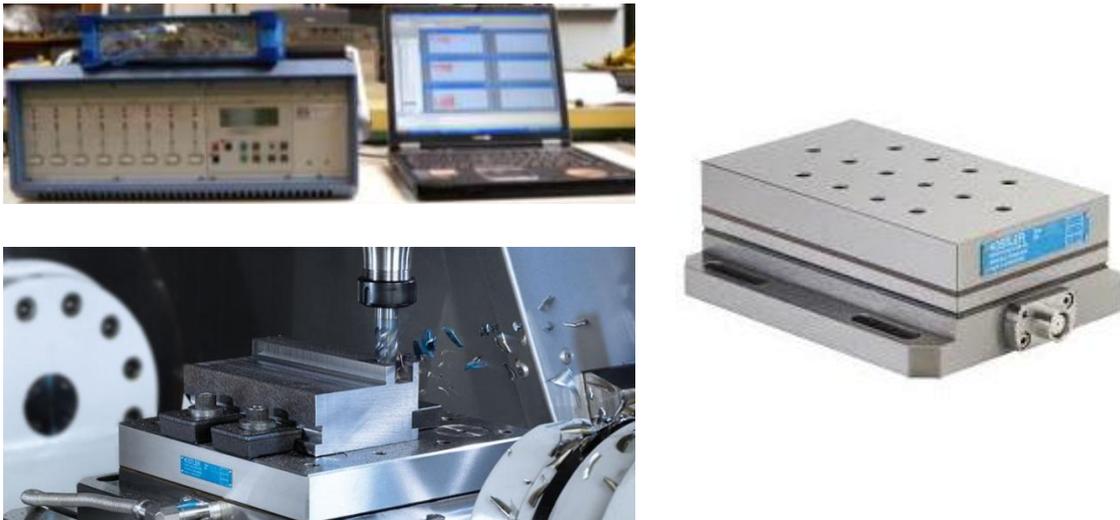


Figura 2.75. Montaje mesa dinamométrica [166]

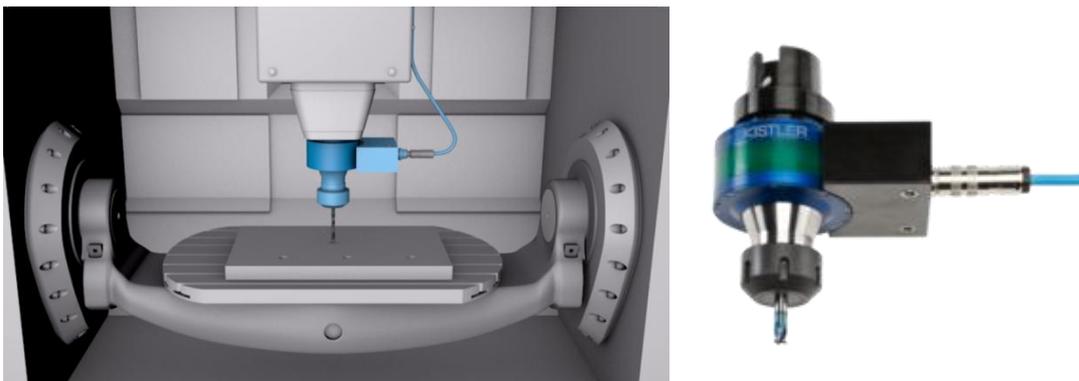


Figura 2.76. Dinamómetro rotativo [166]

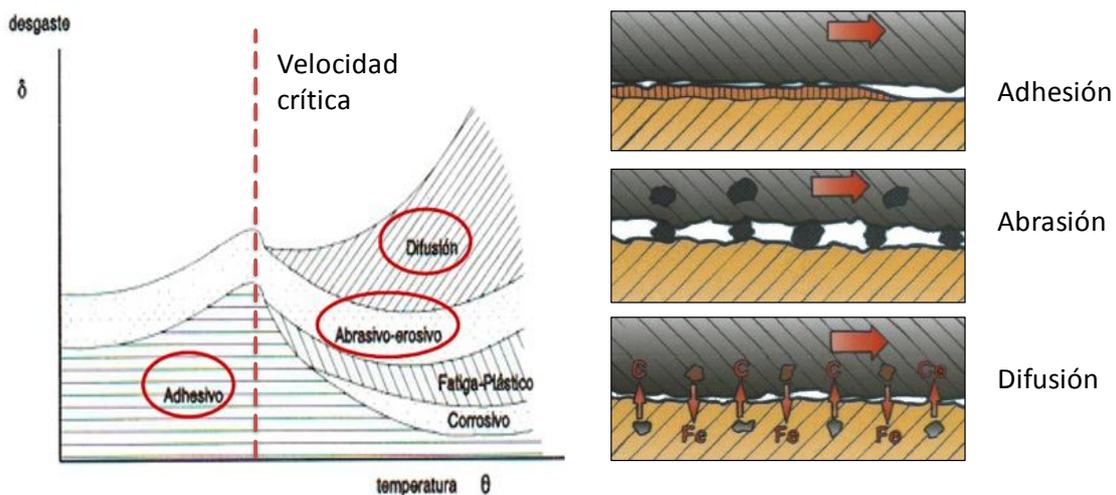
Por ello, en la industria se usan los **sistemas integrados**. Éstos son montados en lugares alejados de la zona de corte (apoyo husillo-estructura, torreta del torno, pistas de rodamientos...) por lo que reciben una pequeña parte de la fuerza de corte, además de que están sometidos a otras perturbaciones ajenas al corte, por lo que es necesario filtrar la señal.

Además, existe la posibilidad de realizar modelos de fuerzas de corte para poder predecir los esfuerzos de corte sobre la herramienta con un mínimo de ensayos experimentales. Estos métodos, se pueden basar en la mecánica del corte, que relacionan la geometría del corte con el comportamiento del material al ser arrancado; métodos numéricos, mediante el uso de elementos finitos se pueden estudiar tensiones y temperaturas en la zona de corte; métodos empíricos, relacionan variables

que intervienen en el proceso con las fuerzas de corte o la energía consumida durante el mismo; métodos semiempíricos o mecanísticos, que plantean un modelo hipotético de fuerzas sobre el filo en función de los parámetros de corte y de los coeficientes de corte; y métodos estáticos y dinámicos, que tienen en cuenta la rigidez estática y los modos de vibración del sistema para obtener las fuerzas de corte.

#### 2.4.2.2. Control de desgaste

A la hora de analizar el rendimiento de una herramienta, se puede decir, que el factor más importante es el análisis del desgaste que sufre dicha herramienta durante la operación de mecanizado. El desgaste de una herramienta se debe al comportamiento tribológico que se produce entre herramienta y material que está mecanizando. La tribología se encarga de estudiar la interacción entre superficies en movimiento relativo, e involucra el estudio de la fricción entre los cuerpos, el desgaste y la lubricación como medio para reducir el desgaste (ver Figura 2.77).



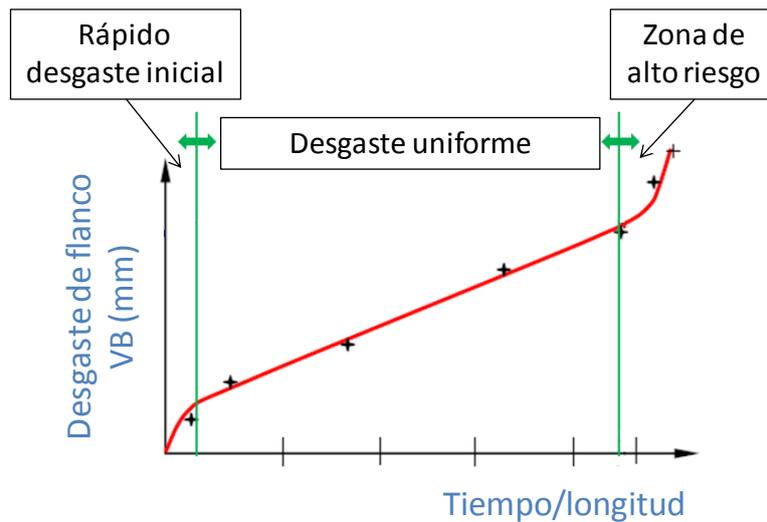
**Figura 2.77.** Esquema de distribución de los mecanismos de desgaste; descripción de desgaste adhesivo, abrasivo y de difusión

Este desgaste puede ser explicado por tres tipos de interacciones entre la herramienta y la pieza, una de tipo mecánico, por abrasión; otra de tipo termodinámico, por la temperatura alcanzada durante el corte, y una última de tipo químico, por difusión. Si en el movimiento relativo entre pieza y herramienta, existen inclusiones de alta dureza se produce un desgaste de abrasión. Cuando entre herramienta y pieza se produce una deformación plástica bajo presión y temperatura, parte del material de la pieza queda soldado a la superficie de la herramienta, formando una capa de material

adherido. Al producirse el movimiento relativo originado por el proceso de corte, la capa adherida es arrastrada por el flujo de material eliminado, la viruta, eliminándose con la capa adherida, parte del material de la herramienta. Cuando en la operación de mecanizado se alcanzan altas temperaturas de corte, se puede producir el fenómeno de difusión en la zona de contacto herramienta-pieza. La velocidad a la que se produce la difusión dependerá de la temperatura alcanzada y de la composición química de los cuerpos. Por ello, cuando se mecanizan materiales que alcanzan altas temperaturas de corte, se suelen mecanizar con bajas velocidades de corte, para controlar la temperatura en la zona, evitando el proceso de difusión (ver Figura 2.77). En herramientas de metal duro, los elementos de Co en el sustrato, se pierden con facilidad por difusión, debilitando las uniones de los carburos. Por último, cuando los esfuerzos de corte son muy grandes en mecanizado, tienden a deformar el filo de la herramienta, favoreciendo la rotura del mismo por microfracturas o astillamiento, especialmente en operaciones de corte interrumpido.

Los mecanismos de desgaste que experimenta una herramienta son simultáneos, aunque normalmente hay alguno dominante sobre los demás, puesto que siempre hay algún aspecto de la herramienta que la hace más sensible a un mecanismo de desgaste que a otro.

Debido a estos mecanismos de desgaste, se producen fundamentalmente dos tipos de desgaste, que hay que controlar en el proceso productivo. En la cara de desprendimiento se produce el **desgaste por cráter (KT)**, normalmente en el punto donde la temperatura alcanza su pico máximo. Un valor excesivo de KT aumenta el riesgo de rotura de la punta de la herramienta. El **desgaste de flanco (VB)** aparece en la superficie de incidencia, originándose por la abrasión entre la superficie de incidencia y la superficie mecanizada, produciéndose un mayor desgaste cuando se aumenta el avance y la velocidad de corte. Para que se considere que una herramienta ha fallado, o que ha terminado su vida útil, el valor del desgaste de flanco oscila entre 0.2 mm y 0.45 mm, según el material y la forma geométrica de la herramienta. Un valor excesivo de VB produce inestabilidades en el contacto mediante vibraciones, además de aumentar las pérdidas por fricción en la cara de incidencia. Estos valores vienen definidos para fresado según la norma ISO 8688: 1989 "Tool life testing in milling; Part 1: Face milling; Part 2: End milling". El valor de VB sigue una evolución lineal con el tiempo, con una pendiente dependiente de la velocidad, como se muestra en la Figura 2.78.



**Figura 2.78.** Evolución del desgaste de flanco en herramientas

Existen diversos métodos, directos e indirectos, que permiten controlar el nivel de desgaste que tiene una herramienta.

Los métodos directos consisten en la aplicación de instrumentos ópticos o de resistencia eléctrica entre pieza y herramienta. Entre los sistemas de **medida ópticos**, destaca el basado en la reflectividad del material, ya que la zona desgastada de la herramienta tiene mayor reflectividad. Por otro lado, los métodos de **resistencia eléctrica**, cuando se observa una disminución de la resistencia, significa un aumento del área de contacto entre herramienta y pieza debido al desgaste. Pese a su gran precisión, estos equipos suelen ser sensibles a las condiciones de producción, teniendo que realizar la medición con inexistencia de viruta y de refrigerantes, es decir, interrumpir el proceso de mecanizado. Por esta razón, actualmente es más habitual realizar controles metrológicos de la longitud y diámetro de la herramienta para detectar roturas y niveles de desgaste inadmisibles para la operación, además de realizar compensaciones automáticas de longitud y diámetro de la herramienta durante el proceso de una forma automática. Estos sistemas pueden ser **sondas de contacto**, o **control por visión o sin contacto**, basados en la medición óptica 3D.



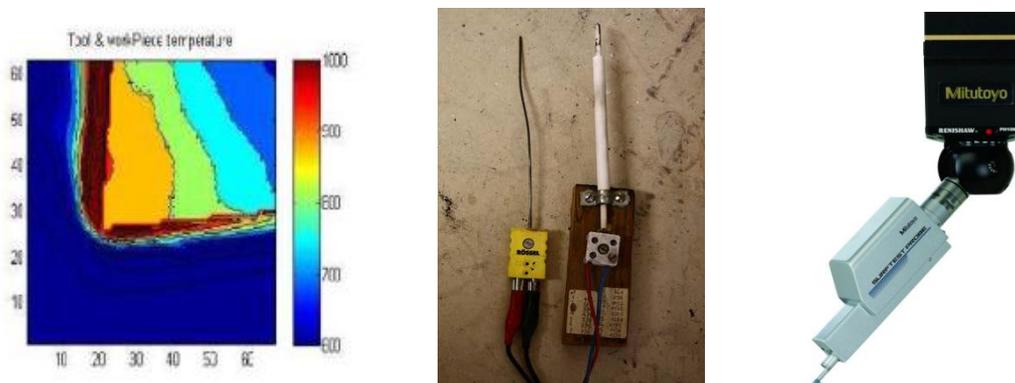
**Figura 2.79.** Sonda de verificación de herramientas por contacto y sin contacto [167]

A día de hoy existen proyectos en los laboratorios dedicados a la investigación del desgaste de herramientas, tratando de realizar **sistemas de monitorización de desgaste de la herramienta (SMDH)**, para controlar el estado de la herramienta en todo momento. A través de la monitorización durante el mecanizado de la intensidad de corriente consumida por el motor de avance y las vibraciones, junto con las condiciones de corte (velocidad de corte, velocidad de avance y profundidad de pasada) y los datos de geometría de la herramienta (radio de la punta y ángulo), se pueden obtener datos del desgaste de flanco, así como de la rugosidad superficial. El objetivo de este tipo de sistemas es conseguir un mecanizado desatendido, aumentando la fiabilidad y productividad del proceso. Las señales son procesadas por nuevas técnicas, como son, análisis de series temporales o wavelets, e incluso inteligencia artificial, a través de las redes neuronales artificiales. Con una monitorización de la herramienta, se puede conocer el estado real en el que se encuentra, produciendo un ahorro de dinero, ya que las piezas realizadas estarían dentro de los parámetros de calidad, y se produciría un aumento de la producción, al reducir tiempos. Sin embargo, debido al alto coste de los instrumentos, y a que hay factores como el ruido (ambiental, o de otras máquinas), o la medida de la temperatura en cada momento, hacen que este sistema de medida esté todavía muy lejos de la implantación industrial [168].

Los métodos indirectos se aplican de forma más habitual en la industria. Entre ellos está la **medición de fuerzas de corte, potencia y vibración**, comentada anteriormente. La **temperatura** alcanzada en el proceso de corte también proporciona información sobre la eficiencia del proceso de corte, indicando la fricción entre herramienta y pieza, siendo posible relacionarlo con el nivel de desgaste del filo de corte. Existen dos métodos para realizar esta medición, aunque con ninguno de ellos

se obtiene el valor exacto debido a la inaccesibilidad de la zona herramienta-viruta-pieza. El primer método es la utilización de la **cámara termográfica por infrarrojos**, en el que existe una distorsión de la medida real debido a la utilización de fluidos de corte que obstruyen la emisividad de la zona de corte. El segundo método, es el más fiable, es la utilización de **termopares** en la zona más próxima a la zona de corte, obteniendo valores no reales por no ser posible acceder a la zona directamente, produciéndose una disipación de energía hasta que alcanza el termopar. Se trata de una técnica “invasiva” debido a la colocación del termopar dentro de la herramienta de corte o de la pieza, alterando al producto final o a la herramienta de corte. En el mecanizado de superaleaciones, la principal causa del desgaste es la temperatura, ya que al tratarse de un material termorresistente, un porcentaje muy pequeño de la energía del proceso es absorbido por la pieza o la viruta en forma de calor, por lo que la mayor parte de esta energía es evacuada a través de la herramienta. Siendo el factor de la temperatura muy importante, actualmente, es un parámetro que se mide en condiciones de laboratorio, debido a la dificultad de implantarlo industrialmente [169].

Otro sistema de control de desgaste de la herramienta, es mediante el **control metroológico** durante el proceso de mecanizado, “in process metrology”. Esta metodología cada vez está adquiriendo mayor relevancia en los sistemas de producción, permitiendo controlar en tiempo real, las condiciones del proceso. La **rugosidad superficial** empeora cuando el nivel de desgaste de la herramienta supera un umbral máximo. Cuando la rugosidad está por encima de este umbral, el corte deja de ser efectivo, incrementando los esfuerzos de corte y la temperatura del proceso pudiendo afectar térmicamente y produciendo una deformación plástica a nivel microestructura, incluso pudiendo generar tensiones residuales en la pieza que se está mecanizando [170] y [171].



**Figura 2.80.** a) Imagen cámara termográfica por infrarrojos en un corte ortogonal en seco; b) termopar; c) Cabezal de medición de rugosidad de una MMC [169][172]

# **CAPÍTULO 3: MÉTODO PARA LA DEFINICIÓN DEL PROCESO DE RECUBRIMIENTO**

### **3. Método para la definición del proceso de recubrimiento**

El método para optimizar los procesos de recubrimiento en herramientas de corte está afectado por una gran cantidad de variables. Los conocimientos de partida para dicha optimización son el sustrato-herramienta, tipo de trabajo, material de trabajo y las condiciones de trabajo (ver Figura 3.1), y partiendo de la especificación de cada uno de estos aspectos, se puede definir el desarrollo del recubrimiento. Es un desarrollo a partir de una evaluación comparativa de pruebas de mecanizado, con un tipo de material concreto, en unas condiciones de trabajo determinadas, etc., buscando la optimización (prueba-error).

#### **3.1. Conocimientos de partida para la optimización en herramientas recubiertas**

Teniendo en cuenta los cuatro aspectos fundamentales, como conocimientos de partida para optimizar herramientas recubiertas, se va a tratar sobre el conocimiento en el “sustrato-herramienta” (ver Figura 3.2), y ver los procesos de fabricación y los aspectos a tener en cuenta para la aplicación de recubrimientos en herramientas de corte.

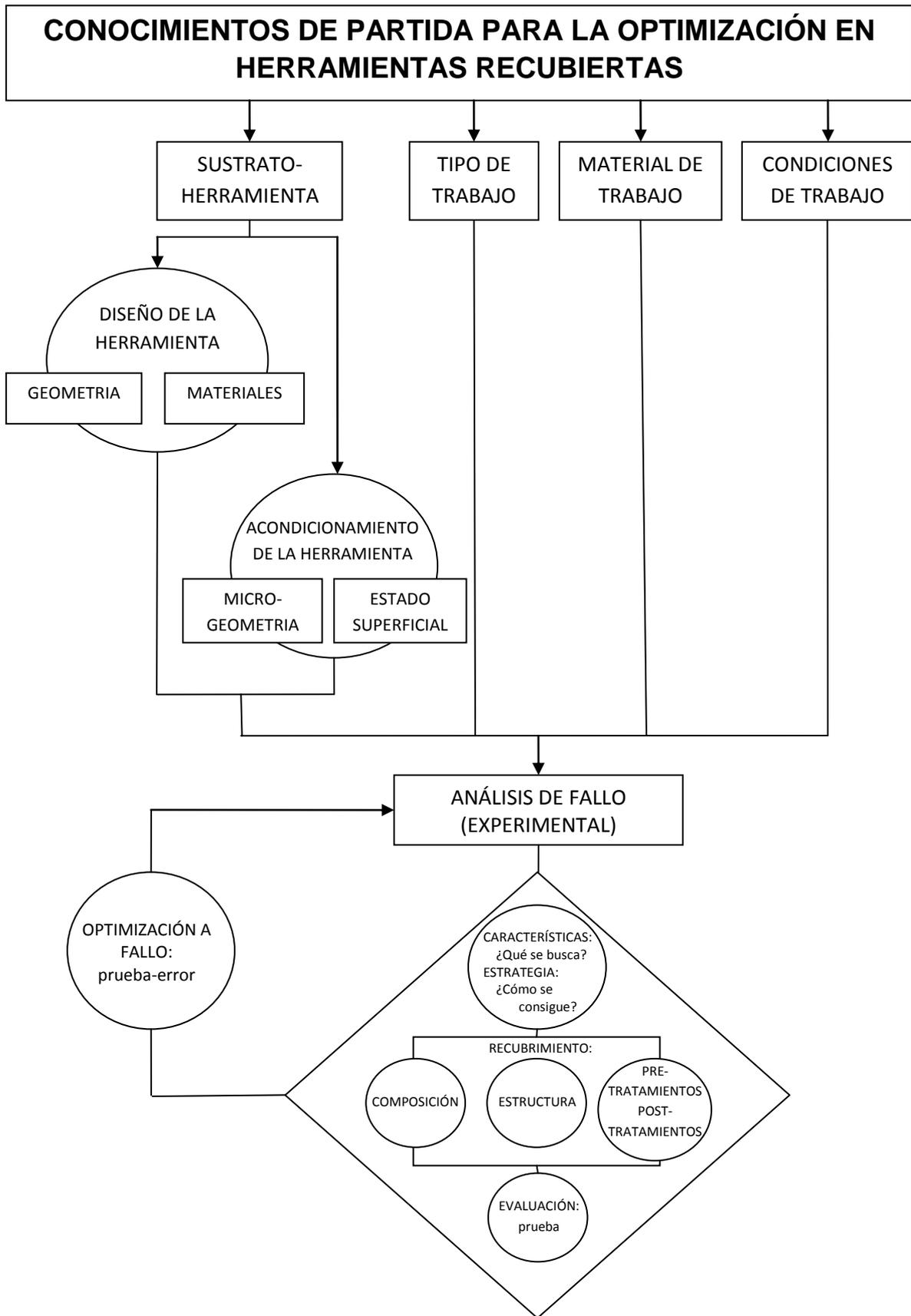
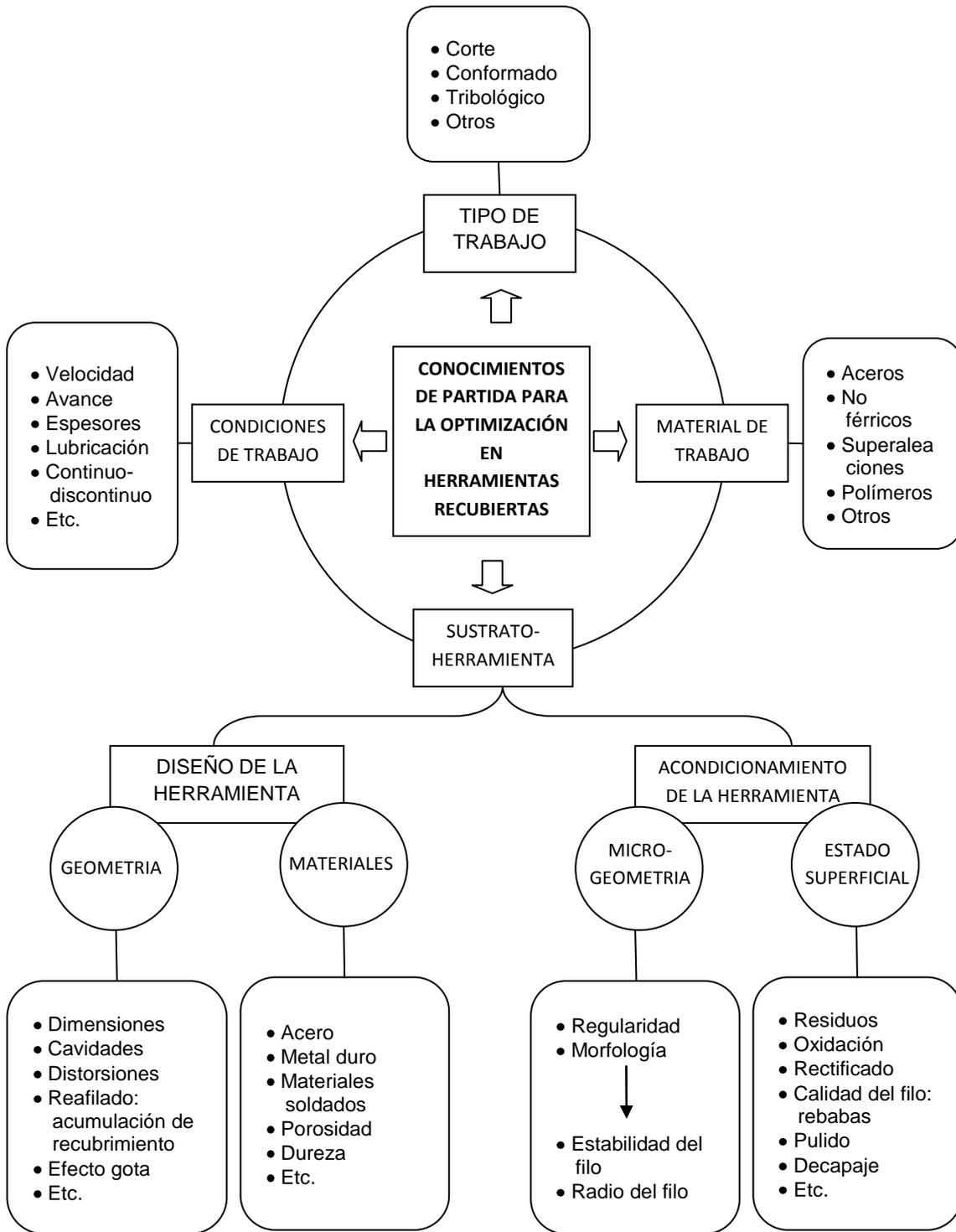


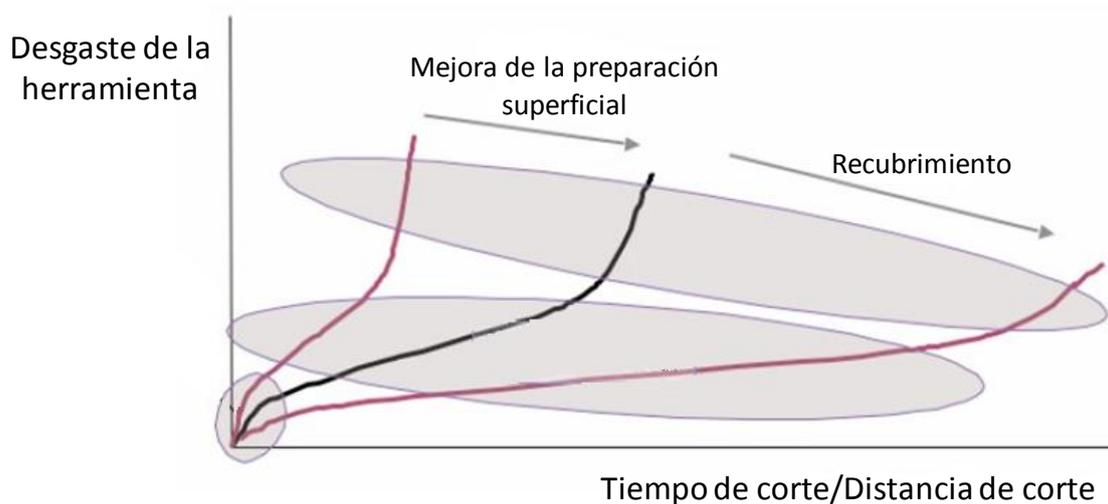
Figura 3.1. Esquema para la optimización de procesos de recubrimiento



**Figura 3.2.** Conocimientos de partida para la optimización en herramientas recubiertas

Para entender la relación entre el sustrato-herramienta con los recubrimientos, es necesario comprender los mecanismos de desgaste en esta relación entre el sustrato y el recubrimiento. Si se observa la gráfica que representa la evolución del desgaste de una herramienta (ver Figura 3.3) se pueden distinguir tres estados en la evolución

del desgaste de una herramienta, el inicial, uno más largo o estado estable, y el desgaste catastrófico de la herramienta. En la Figura 3.3 se ven tres casos o ejemplos representados por las tres curvas que van de izquierda a derecha, siendo la última, la más tumbada, la que presenta los mejores resultados, en cuanto a mayor duración y menor desgaste. Para llegar a este caso, es necesario pasar por la fase intermedia de mejora de la preparación superficial de la herramienta.



**Figura 3.3.** Evolución del desgaste de una herramienta. Los tres óvalos representan el desgaste inicial, el estado estable y el desgaste catastrófico de la herramienta, respectivamente. Se indica la influencia de la preparación superficial y el recubrimiento [173].

Recubrir un sustrato-herramienta sin las mejoras de preparación de la superficie (primera curva, la de la izquierda) no aporta nada. Primeramente se debe mejorar la preparación superficial, llegando un momento (segunda curva, la central) en que necesitamos de los recubrimientos para seguir mejorando. La conclusión es que hay una “clara relación entre las mejoras en el sustrato-herramienta con el recubrimiento”. Más adelante se verá con profundidad los fenómenos de desgaste (Punto 3.2, del presente documento) y se explicará porque no se puede llegar al estado de la curva de la derecha, la más tumbada, sin pasar por los estados intermedios de mejora superficial.

Las consideraciones de partida, desde el punto de vista de los sustrato-herramientas son: geometría, materiales, micro-geometría en los filos y estado superficial, que definirán los distintos procesos/fases en la fabricación de una herramienta recubierta (ver Figura 3.4), necesarios para conseguir su optimización.



Figura 3.4. Proceso general de fabricación de una herramienta recubierta

### 3.1.1. Geometría

Desde un punto de vista de la geometría, existen limitaciones a tener en cuenta en el diseño de una herramienta a recubrir:

- Limitación de **penetración** del recubrimiento en las cavidades, siendo la penetración menor al diámetro de la cavidad.
- **Dimensiones** de las herramientas, limitadas por las dimensiones de las cámaras de recubrimiento.
- Las **herramientas/piezas ensambladas** deben recubrirse por separado las piezas involucradas.
- En **piezas grandes y esbeltas de acero**, deben tenerse en cuenta las posibles distorsiones (temperatura máxima de proceso de PVD es de 450 °C), es decir, deben estar libres las tensiones internas.

Las herramientas de alta precisión, en los procesos de reafilado y recubrimientos múltiples, se posibilita la acumulación de recubrimientos en las áreas no afiladas y que son de importancia durante su trabajo. La solución, en estos casos, es el decapaje previo del recubrimiento para evitar el sobredimensionamiento de la herramienta.

Otra consideración a tener en cuenta, desde el punto de vista de geometría, es el “efecto gota”, inherente al propio proceso de recubrimiento PVD, en el que los filos de las herramientas de corte, el espesor del recubrimiento es un 50% mayor que en las zonas adyacentes (ver Figura 3.5). Esto produce una acumulación con una morfología de “gota” que produce un redondeamiento y protuberancia en el filo.

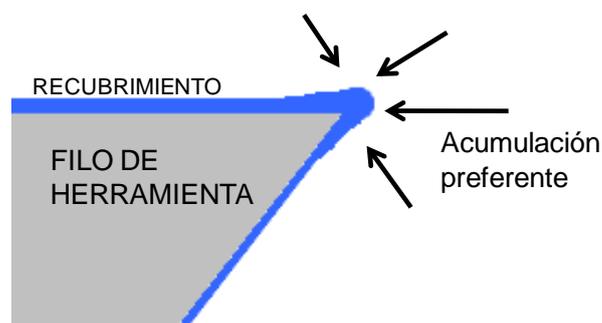


Figura 3.5. Acumulación preferente en los filos de herramientas de corte: “efecto gota”

### 3.1.2. Materiales

Las herramientas se pueden realizar, según su aplicación en una gran variedad de materiales. En el caso de herramientas de acero, y teniendo en cuenta que la temperatura máxima del proceso PVD es de 450 °C, no todos los aceros se pueden recubrir. Dependiendo del tipo de acero y de su tratamiento térmico, se pueden modificar sus características durante el proceso PVD.

Los aceros rápidos y superrápidos, frecuentemente utilizados en herramientas de corte, deben haber sido revenidos a una temperatura mínima de 500°C (preferiblemente a por lo menos 550°C en tres revenidos). Otros aceros, muy utilizados, son los aceros pulvimetalúrgicos, ideales para su uso con recubrimientos PVD.

También, es habitual, las herramientas de metal duro recubiertas (grupos ISO P, M, K), debiendo tener en cuenta la presencia de partículas frágiles en el filo, o la existencia de porosidad en las cercanías de los filos. En ambos casos, existe la posibilidad de fractura de los filos tras el recubrimiento, inducido por las tensiones compresivas de este.

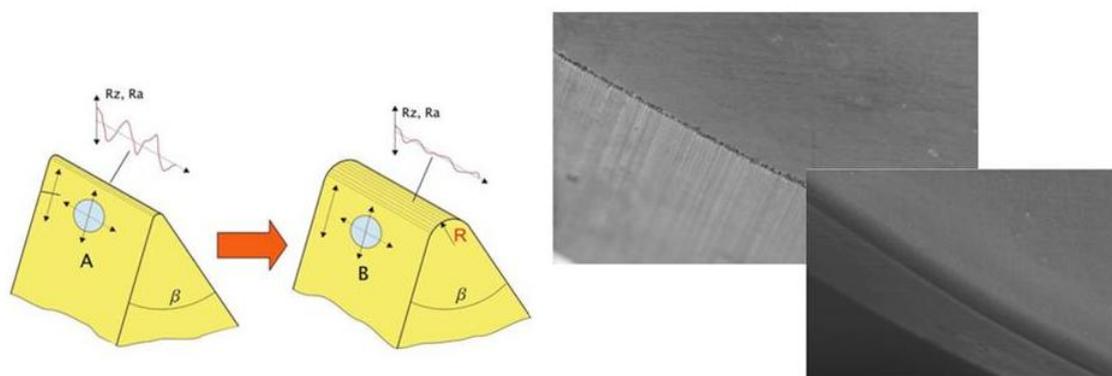
En herramientas de acero con placa soldada de metal duro se debe tener en cuenta:

- La **temperatura de fusión** del material de soldadura debe ser mayor de 600°C.
- El **material de soldadura** debe estar libre de Cd o Zn, ya que pueden contaminar severamente a las zonas de trabajo.
- Las herramientas soldadas deben someterse a un proceso de **relajación de tensiones** previo, antes de recubrir.
- Se deben **evitar las grietas** en las soldaduras, no solo por razones mecánicas, sino porque son zonas de acumulación de contaminación.

En cualquier caso, un aspecto fundamental, para la aplicación de recubrimientos en herramientas de corte o deformación, es que el sustrato debe tener una dureza de al menos 58 Rockwell C; por debajo de esta dureza la adhesión del recubrimiento al sustrato no va a ser buena.

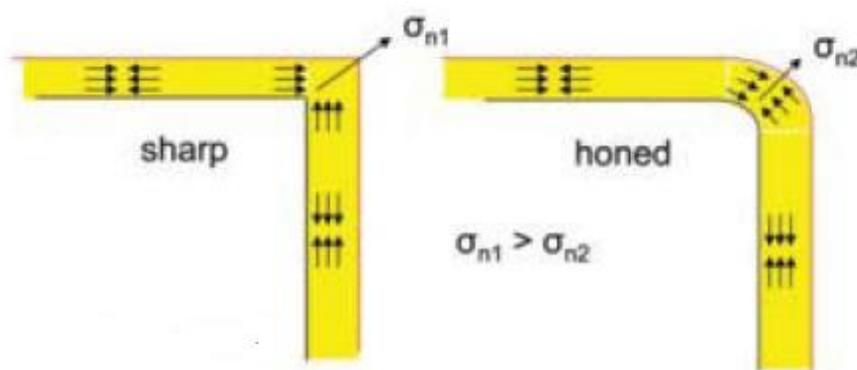
### 3.1.3. Microgeometría en los fillos

La calidad del recubrimiento depende de forma directa de la calidad de los fillos, de su “regularidad” y de su “morfología” a nivel microscópico (ver Figura 3.6.). Una excesiva rugosidad produce un filo inestable, y la eficacia en fillos agudos no es la misma que en fillos romos, existe uno óptimo (ver punto 2.3.2).



**Figura 3.6.** Preparación de fillos en los aspectos de regularidad y morfología [17]

De la misma forma que un filo muy romo disminuye la eficacia del corte, un filo muy agudo acentúa el “efecto gota”, inherente al propio proceso PVD, tal y como se ha indicado anteriormente en el punto 3.1.1. de este documento, pero también existe otro límite de “agudeza de filo”, ya que las tensiones residuales compresivas, si el filo es muy agudo, inducen a la delaminación del recubrimiento (ver Figura 3.7).



**Figura 3.7.** Resultante en un filo agudo  $\sigma_{n1}$  y en un filo romo  $\sigma_{n2}$ , siendo  $\sigma_{n1} > \sigma_{n2}$

En las áreas planas del sustrato, las tensiones compresivas se neutralizan unas con otras. En un filo agudo, la resultante tiende a delaminar el recubrimiento. Cuanto más pequeño sea el redondeamiento, mayor es la tendencia a la delaminación.

### 3.1.4. Estado superficial

Antes de aplicar un recubrimiento sobre una herramienta, ésta debe estar libre de cualquier tratamiento o agente que afecte a la composición de la superficie.

Las superficies a recubrir se deben proteger con una fina capa de aceite si no son resistentes a la oxidación; su estado óptimo es de apariencia metálica (blanca). Los aceites, taladrinas, grasas solubles, restos de tinta, pegamentos o ceras lubricantes, se pueden eliminar sin alterar la calidad superficial.

Sin embargo, existen otros restos que no se pueden eliminar sin alterar la calidad superficial:

- residuos de corrosión o restos de oxidación,
- capas de reacción si han sido mecanizados por electroerosión o nitrurados,
- sales de los tratamientos térmicos, y
- superficies fosfatadas o vaporizadas.

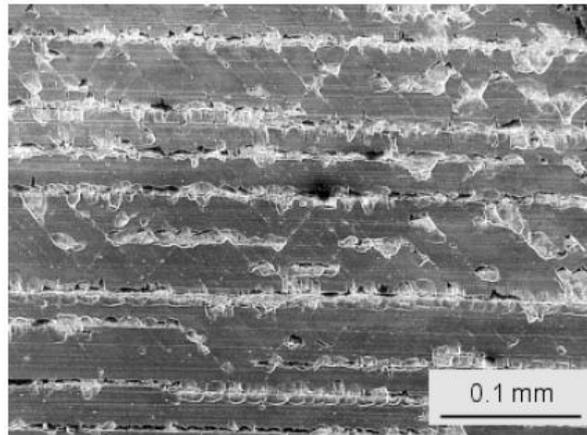
Generalmente, las superficies de las herramientas son rectificadas, y se pueden generar defectos térmicos como el daño por oxidación o por revenido.

El **daño por oxidación** se caracteriza por una fina película de óxido metálico, de un color característico. Es lo suficientemente importante como para crear problemas en la adhesión del recubrimiento. El óxido debe ser eliminado químicamente o/y mecánicamente para garantizar una adhesión apropiada del recubrimiento.

El **daño superficial** por revenido durante el rectificado es mucho más grave, y se caracteriza por el reblandecimiento superficial del acero, produciendo una adhesión muy pobre. En este caso, es imposible la recuperación superficial de la herramienta por métodos químicos o/y mecánicos.

Otro defecto, es la generación de tensiones residuales durante el rectificado, lo que reduce la resistencia a fatiga de los filos rectificados, es decir, se generarán grietas durante el trabajo.

Las condiciones de rectificado son muy importantes. Una rugosidad producida por unas condiciones de rectificado incorrectas provoca un muy probable fallo de adhesión en las crestas de los surcos de rectificado, por una concentración local de tensiones residuales compresivas (ver Figura 3.8.).



**Figura 3.8.** Fallo del recubrimiento inducido por un incorrecto rectificado, que produce el desprendimiento del recubrimiento a lo largo de las crestas del rectificado [173]

El estado de los filos en herramientas de corte, cuando éstas se van a recubrir, es un factor crítico. Las rebabas se crean por la deformación plástica del acero de las herramientas, siendo crucial su eliminación. Un filo con rebabas y recubierto, es igual que un filo con rebabas y sin recubrimiento. En general, la calidad del filo de corte es muy importante; la resistencia a impacto y al desgaste depende en gran medida del surco creado por el rectificado. Con recubrimiento, el estado de los filos es un factor más sensible.

Para algunas aplicaciones, es deseable que la rugosidad de las superficies sea lo más baja posible, y puede ser recomendable un acabado de lapeado o rectificado fino. En el caso del pulido en zonas de trabajo, existen ciertas recomendaciones si después se va a recubrir, como:

- **No pulir con muelas de goma**, ya que se sobrecalienta la superficie, oxidándose fácilmente.
- **Recomendable usar como abrasivo el diamante**. Debe tenerse cuidado en eliminar los residuos cuando se usan ceras de pulido basadas en diamante. No son aptos los abrasivos basados en silicio (óxido de silicio o carburo de silicio), ya que pueden reaccionar con el acero, contaminándolo.
- **Evitar los grados de diamante menores de 3  $\mu\text{m}$** , por la posible incrustación en la superficie, lo que crearía un punto de fallo del recubrimiento.

Por último, otro aspecto a tener en cuenta es el decapaje de los recubrimientos. Como ya se ha mencionado anteriormente (punto 3.1.1.), las herramientas recubiertas usadas, que se tengan que reafilarse o pulir de nuevo, se deberán decapar si existen

problemas desde un punto de vista geométrico (herramientas de alta precisión). Pero existen otros motivos para decapar, más allá de los problemas geométricos, que recomienda que no deben acumularse recubrimientos, siendo lo más importante: el “redondeamiento” de filos de corte y la “adhesión no óptima” de la última capa. El decapaje también facilita el reafilado o pulido de las herramientas, por la gran dureza del recubrimiento, y mejora la rugosidad, ya que la acumulación de capas la incrementa.

### **3.2. Análisis de fallo**

En el comienzo del punto 3 del presente documento, se ha señalado la metodología para optimizar los procesos de recubrimiento en herramientas de corte, a partir de una evaluación comparativa de pruebas de mecanizado: “optimización a fallo”. Analizando las causas del fallo se puede trazar la estrategia para el desarrollo de los procesos implicados en el recubrimiento así como el propio recubrimiento. Recordar, cuando se explicaba la evolución del desgaste (Punto 3.1 y Figura 3.3) que no se podía llegar al estado de la curva inferior (la de la derecha) sin pasar por los estados intermedios de mejora de la preparación superficial.

Las causas de fallo fundamentales son: la abrasión, la adhesión, la fractura y el deterioro térmico (ver Figura 3.9). Su identificación proporcionará una información para mejorar y desarrollar nuevos recubrimientos, es decir, “optimización a fallo”. Para ello, se deben conocer los mecanismos de desgaste en las herramientas de corte.

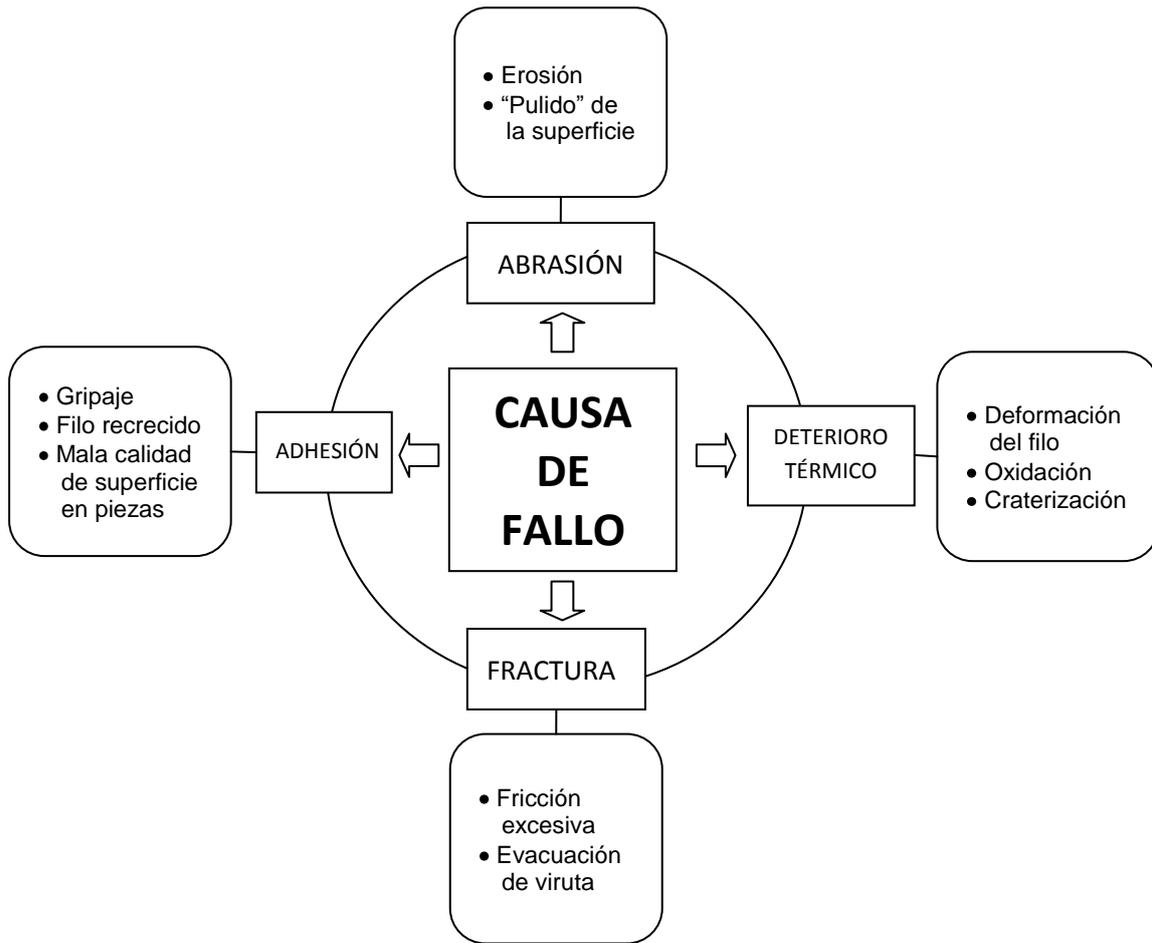
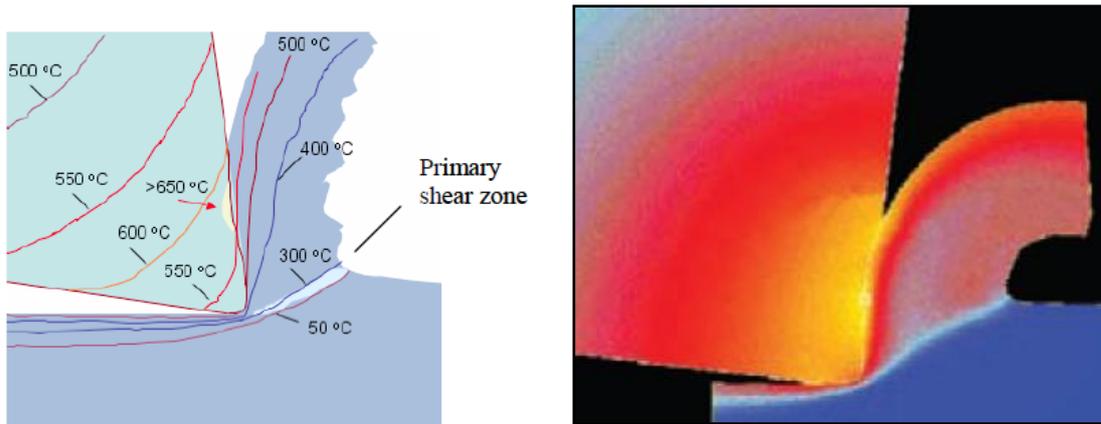


Figura 3.9. Análisis de fallo

### 3.3. Mecanismos de desgaste en herramientas de corte

En este punto, se van a mostrar los mecanismos de desgaste en herramientas de corte, tanto para herramientas sin recubrimiento, como para herramientas recubiertas; donde se verán ilustraciones, detalles de los procesos de corte, de los mecanismos de degradación de la herramienta, y propiedades de los materiales [173], [174], [175], [176], [177], [178], [179], [180], [181], [182] y [183].

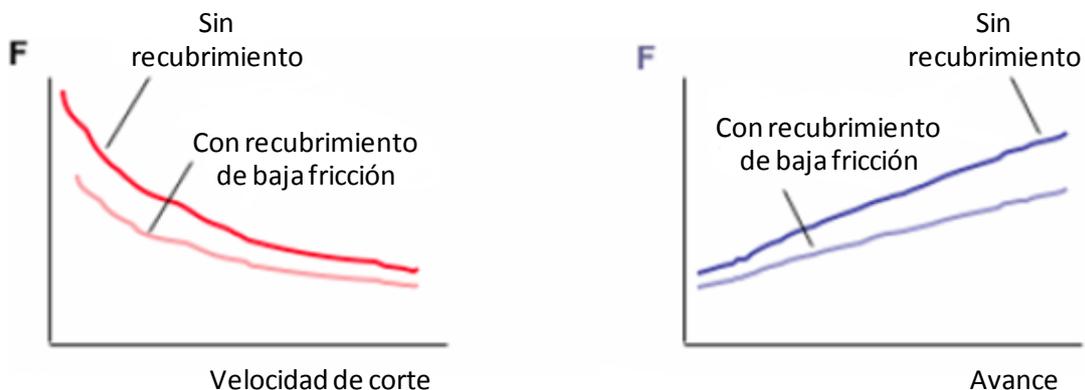
Para entender los mecanismos de desgaste en herramientas de corte, es necesario comprender las severas condiciones de contacto que imperan entre las caras herramienta de corte-material de trabajo (ver Figura 3.10). El modelo común se ilustra por el corte ortogonal, pero aplicable a cualquier operación de corte, incluido el torneado, fresado, taladrado, roscado, brochado, etc.



**Figura 3.10.** Acción principal y distribución de temperaturas del filo de una herramienta de corte [173]

La principal fuente de calor está localizada en la zona de deformación primaria, en la formación de la viruta, y en el contacto de fricción entre la viruta y la herramienta (zona de deformación secundaria), y la temperatura más alta es alcanzada consecuentemente sobre la cara de desprendimiento, a alguna distancia del filo.

Para ilustrar las fuerzas y las tensiones mecánicas que actúan sobre el filo de la herramienta en un dibujo, es menos directo, ya que cambia considerablemente con la operación de corte y con los parámetros de corte. Generalmente, sobre todo la fuerza de corte  $F$ , está relacionada con la velocidad de corte y el avance (ver Figura 3.11). Cabe señalar que un recubrimiento de baja fricción puede disminuir la fuerza de corte y en consecuencia, genera una temperatura de filo más baja, lo cual puede ser usado para incrementar la productividad [173].



**Figura 3.11.** Gráficos de la Fuerza de corte vs. Velocidad de corte y avance [173]

Tomando como modelo el corte ortogonal, para el esquema de la distribución del desgaste de la herramienta (ver Figura 3.12), primeramente depende de la operación de corte, parámetros de corte, material a trabajar y de las características del material de la herramienta, cual será el desgaste, o combinaciones de estos (en la punta, flanco, cráter o filo). Dependiendo de esos mismos parámetros, el desgaste puede producirse gradualmente por desgaste abrasivo o adhesivo, a través de deformación plástica, por pérdidas discretas de material a través de distintos mecanismos de fractura, o por combinación de éstas [173].

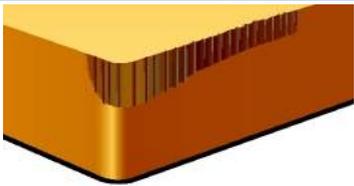
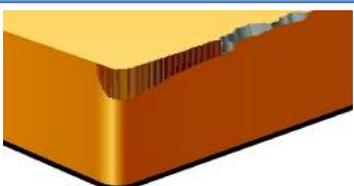
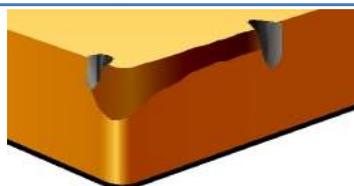
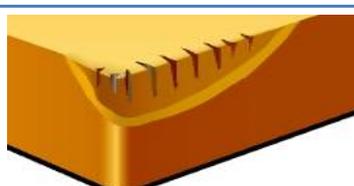
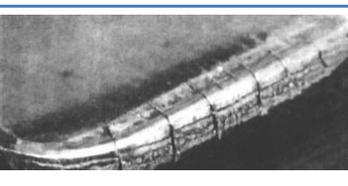
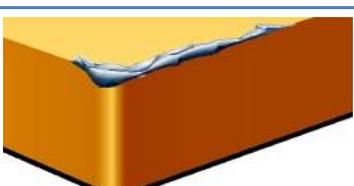
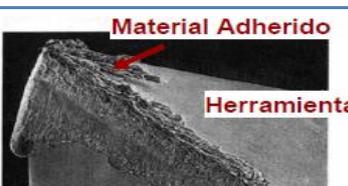
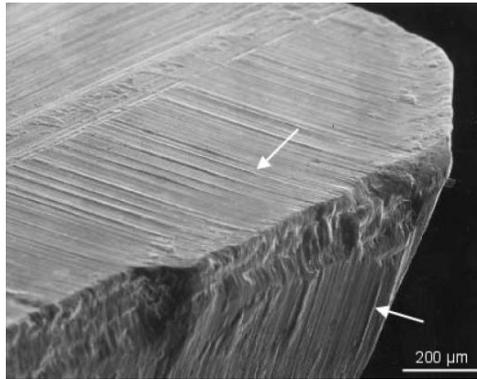
<b>Desgaste de flanco</b>		
<b>Desgaste de cráter</b>		
<b>Astillamiento</b>		
<b>Deformación plástica</b>		
<b>Entalladura</b>		
<b>Fisuras térmicas</b>		
<b>Filo recrecido</b>		

Figura 3.12. Distribución para distintos tipos de desgaste en una herramienta [184]

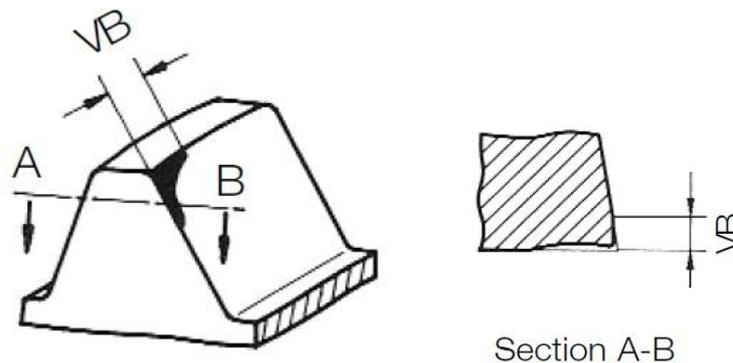
### 3.3.1. Desgaste abrasivo

En el desgaste abrasivo domina el desgaste de flanco y de cráter del filo de la herramienta (ver Figura 3.13). El patrón de acanalado es una combinación de la acción de rascado de partículas duras en el material de trabajo, y de la protección contra el rascado ofrecido por las fases duras en el material de la herramienta [173].



**Figura 3.13.** Típica apariencia de desgaste abrasivo: domina el desgaste de flanco y cráter de una fresa. Las flechas apuntan a las crestas del material de HSS relativamente resistente a la abrasión. Hay también evidencia de fracturas en el filo. Material de trabajo acero al carbono [173]

Se pueden definir el desgaste abrasivo como un simple mecanismo de erosión, arrastre, donde la evidencia más directa es el desgaste de flanco (ver Figura 3.14). Una mayor dureza reduce este tipo de desgaste.

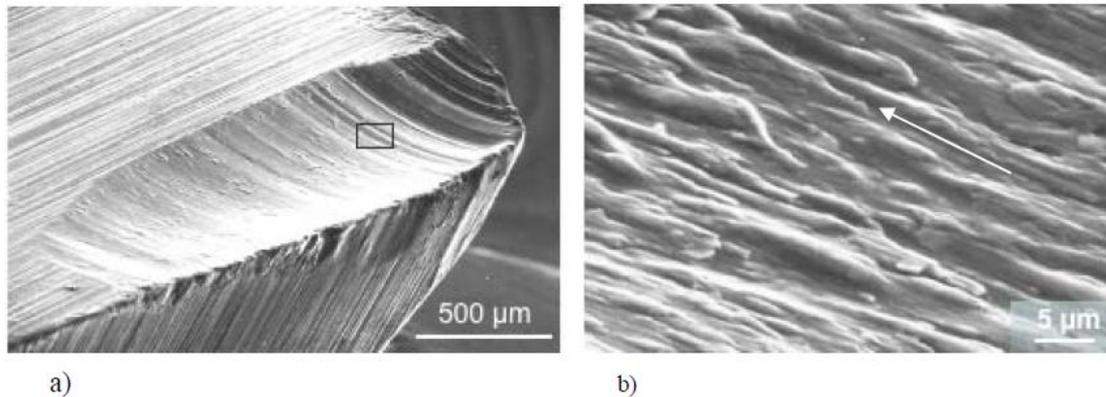


**Figura 3.14.** Desgaste del flanco, producido por un mecanismo de erosión, arrastre: desgaste abrasivo

### 3.3.2. Desgaste adhesivo

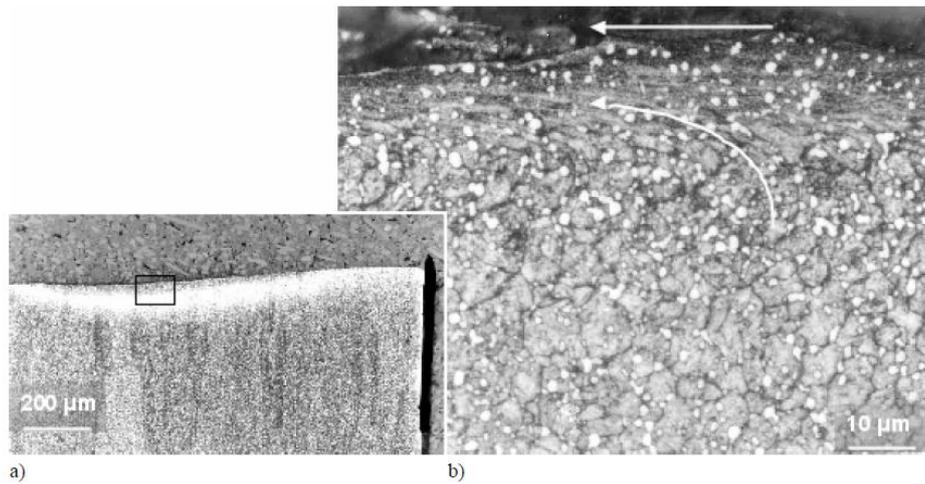
Cuando se ve en bajo aumento que el mecanismo de desgaste dominante del diente de una fresa parece ser abrasivo (ver Figura 3.15 a), es decir, una acción de arrastre

de los constituyentes duros en el material de trabajo. Sin embargo, observándolo en un alto aumento (ver Figura 3.15 b), revela que es más bien una combinación de desgaste abrasivo y adhesivo. Este componente adhesivo, frecuentemente referido como “desgaste adhesivo leve”, es un lagrimeo de la superficie del material por el resultado de fuerzas de alto cizallamiento en un arrastre lento de la superficie de la capa y eliminación de pequeños fragmentos en la dirección del flujo de la viruta [173].



**Figura 3.15.** Cráter en una fresa que ha estado mecanizando acero con bajo carbono. En bajo aumento (a) el mecanismo de desgaste dominante parece ser abrasivo. Sin embargo, una aproximación (b) revela que es dominado por un componente adhesivo leve con fragmentación de cizalladura del material en la dirección del flujo de viruta (flecha) [173]

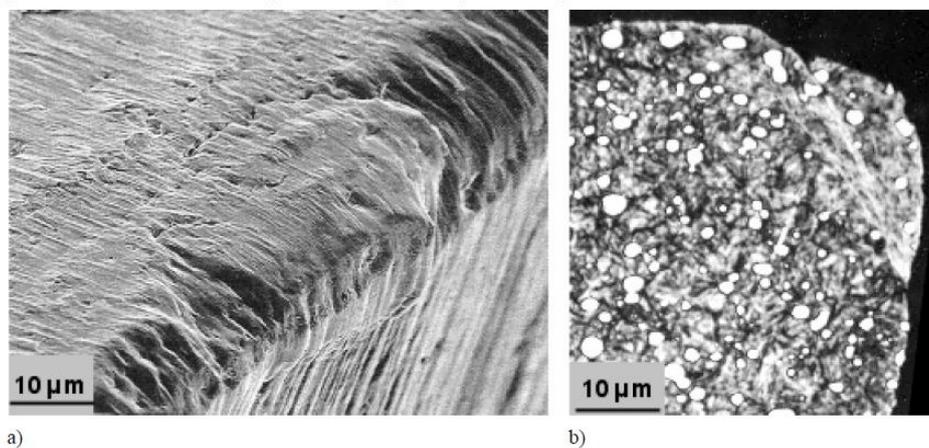
Si la herramienta es usada hasta su límite superior de resistencia térmica, “desgaste adhesivo severo” puede resultar como un flujo plástico a gran escala de la superficie del material en la dirección del flujo de la viruta (ver Figura 3.16). En el desgaste adhesivo domina el desgaste de flanco y cráter, si a los filos llegan altas temperaturas (por ejemplo con alta velocidad de corte), y este desgaste se acentúa más cuando se mecanizan materiales químicamente agresivos. Tanto, el desgaste adhesivo leve y severo, son resistidos principalmente por materiales con alta dureza en caliente [173].



**Figura 3.16.** a) Micrografía óptica de una sección transversal de un diente de una fresa madre después de mecanizar acero inoxidable austenítico. b) Detalle de a) en la zona del cráter. Las flechas indican la dirección del flujo de la viruta y el patrón de flujo de la superficie del material respectivamente. Esto último es indicativo del desgaste adhesivo severo [173]

### 3.3.3. Deformación plástica a gran escala

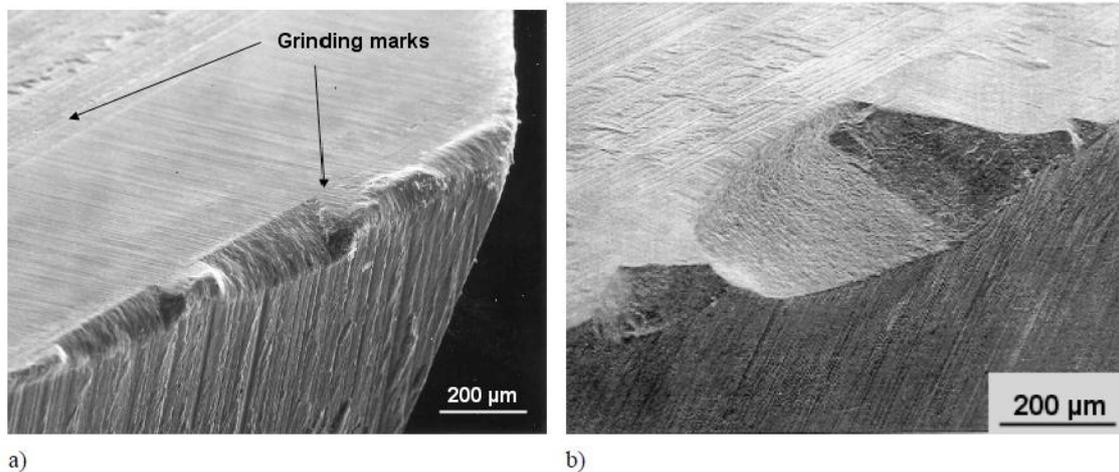
Algunas veces, el filo de la herramienta es cargado más allá de sus resistencia y deforma por deformación plástica a gran escala (ver Figura 3.17), dando como resultado el embotamiento del filo [173].



**Figura 3.17.** Deformación plástica del filo de una herramienta de HSS: a) La línea de filo en la parte del centro de la foto está plásticamente movida hacia abajo y pronto abandonará el filo, como ya sucede en las partes adyacentes del filo. b) Sección transversal del filo deformado plásticamente mostrando signo de cizalla adiabática [173]

### 3.3.4. Fatiga y fractura

La fractura macroscópica de una herramienta en conjunto puede ocurrir, pero es un suceso más bien raro. Más comunes son las roturas localizadas en el filo de la herramienta (ver Figura 3.18). Se observa que las roturas en (a) parecen ser iniciadas por las marcas del rectificado que corren paralelas al filo [173].



**Figura 3.18.** Roturas de filo pequeñas (a) y algo más grandes (b), debido a la sobrecarga local y a la fatiga del diente en una fresa [173]

### 3.3.5. Mecanismos de desgaste de herramientas recubiertas

Desde los años 70 cuando los recubrimientos de TiN fueron introducidos en las herramientas de corte, los recubrimientos PVD han llegado a ser un estándar en la protección del desgaste de la herramienta, y actualmente los centros de recubrimiento ofrecen un considerable número de recubrimientos cerámicos delgados para herramientas [182]. Los recubrimientos protegen ante todo el filo de corte en dos aspectos:

- Actuando como un escudo contra el desgaste abrasivo y adhesivo leve.
- Reduciendo la temperatura de la herramienta por reducción de la fricción entre la herramienta y el material de trabajo, especialmente entre la viruta y la cara de desprendimiento.

Los recubrimientos combinan una dureza superior (resistencia al desgaste abrasivo) con una relativa baja reactividad química con los materiales metálicos (baja solubilidad), la última protección dada contra los mecanismos de soldadura que es el requisito previo para el desgaste adhesivo. Consecuentemente, la mayor parte de los recubrimientos actuales de PVD, más bien fallan por fatiga y

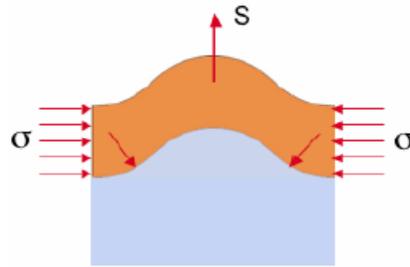
delaminación/desprendimiento discreto, que elimina el recubrimiento por un desgaste gradual lento. Una vez es eliminado el recubrimiento, los mecanismos de desgaste de herramientas recubiertas son similares a las de sin recubrimiento, aunque más severas porque normalmente en herramientas recubiertas los parámetros de corte usados son más severos [173].

### **3.3.5.1. Desprendimientos del recubrimiento debido a una pobre preparación del sustrato**

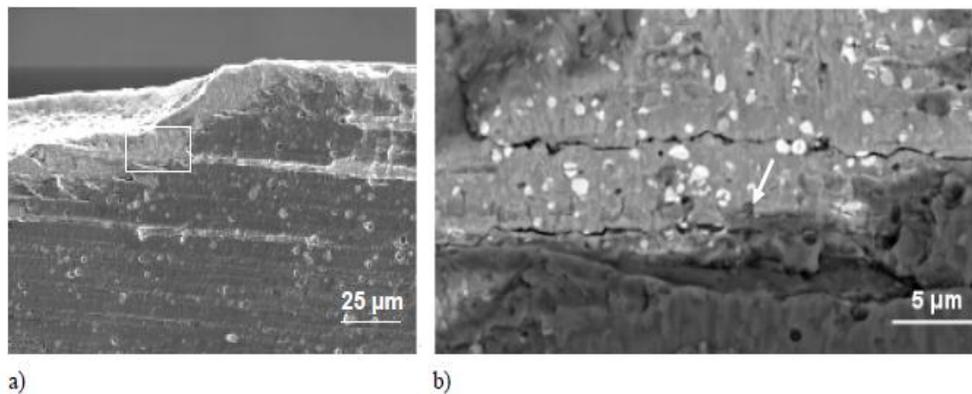
Principalmente hay dos maneras por las cuales puede suceder el fracaso en la preparación del sustrato:

- En la preparación de sustratos de HSS, la temperatura de la superficie durante el rectificado/pulido supera la temperatura de austenización resultando una capa intermedia frágil de martensita sin templar, ya señalado en el punto 3.1.4. del presente documento. Si se utiliza como sustrato para un recubrimiento PVD, la martensita sin templar, se formará una capa intermedia inferior frágil para la adhesión del recubrimiento.
- El resultado de una superficie del sustrato demasiado rugosa o áspera, también comentado en el punto 3.1.4 del presente documento. Los recubrimientos de PVD sobre herramientas poseen tensiones de compresión internas del orden de 1-5 GPa. Típicamente, el TiN depositado sobre un sustrato tiene una tensión residual compresiva lateral de alrededor de 4 GPa. Esta tensión actúa positivamente para la cohesión del recubrimiento, pero negativamente sobre su adhesión en el sustrato. En combinación con un sustrato rugoso/áspero, las tensiones compresivas excesivamente altas podrían causar el desprendimiento sin cargas externas [183] y [185]. La razón es que las tensiones compresivas laterales sobre el recubrimiento combinadas con un sustrato rugoso/áspero generaría una tensión a tracción entre las capas recubrimiento/sustrato como ilustra la Figura 3.19. [185]. Si tal sistema es cargado externamente, el desprendimiento del recubrimiento se facilita a lo largo de las regiones de tensiones de tracción máximas, es decir, a lo largo de las crestas gruesas sobre la herramienta. Estas crestas son el resultado de un proceso de rectificado demasiado rugoso/parámetros de rectificado incorrectos. Otro ejemplo de fallo de recubrimiento inducido topográficamente es el mostrado en la Figura 3.20 donde también se indica que las grietas nucleadas en el recubrimiento podrían extenderse al material subyacente. A través de la

fatiga, más tarde pueden causar roturas en el filo y fracturas del filo a gran escala [173].



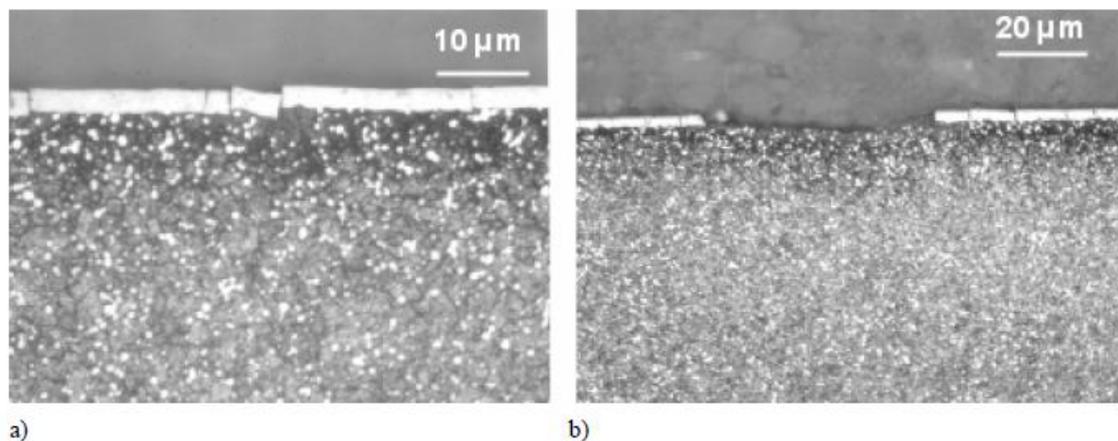
**Figura 3.19.** Las tensiones compresivas laterales  $\sigma$  presentes en la mayoría de los recubrimientos PVD generarían tensiones entre capas S. En la parte superior de las crestas de rectificado, esta tensión es de tracción (“despega”), y puede alcanzar el mismo orden de magnitud que la tensión residual  $\sigma$  [173] y [185]



**Figura 3.20.** Grietas de fatiga microscópicas observadas en la cara de desprendimiento cerca del filo del diente de una fresa madre que ha estado mecanizando acero al carbono. (b) es una ampliación de (a). Observar que la dirección de las grietas coincide con la dirección del acabado de la superficie [173]

### 3.3.5.2. Desprendimiento del recubrimiento debido a un ablandamiento térmico del sustrato (en herramientas de corte de HSS)

En herramientas de corte de HSS, una vez que el material del sustrato de HSS, alcanza un nivel de temperatura de ablandamiento excesivo, falla para resistir la presión de contacto, y se producen fracturas frágiles en el recubrimiento (ver Figura 3.21 a). En esta imagen hay que señalar el contraste de color oscuro debajo del recubrimiento, el cual revela un ablandamiento térmico debido al sobrehevenido. Las fracturas del recubrimiento y fragmentos individuales, se desprenden posteriormente en forma de pequeños fragmentos (ver Figura 3.21 b) [173].

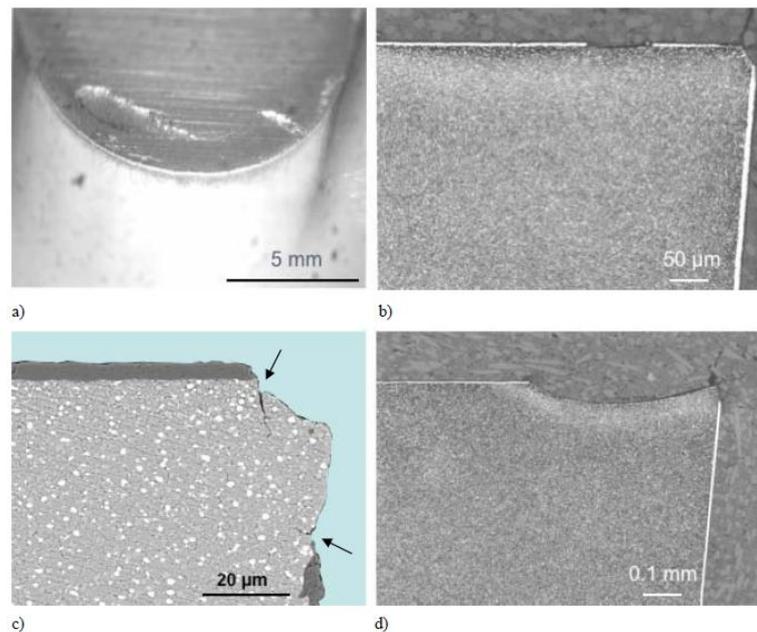


**Figura 3.21.** Desprendimiento del recubrimiento de un diente de fresa madre usada para el tallado de engranajes de acero al carbono: a) fractura del recubrimiento debido al ablandamiento térmico del sustrato; b) desprendimiento de pequeños fragmentos de recubrimiento y desgaste inicial del material de HSS subyacente. El espesor de los fragmentos es el mismo que el espesor original del recubrimiento [173]

### 3.3.6. Distribución y evolución del desgaste del filo

El patrón de desgaste macroscópico del filo de una herramienta de corte fue ilustrado en la Figura 3.12. La Figura 3.22 muestra el desarrollo de un gran cráter en un diente de fresa madre recubierto de TiN. El material de trabajo era acero al carbono y el desgaste que eventualmente controla la vida de la herramienta ocurre en la cara de desprendimiento.

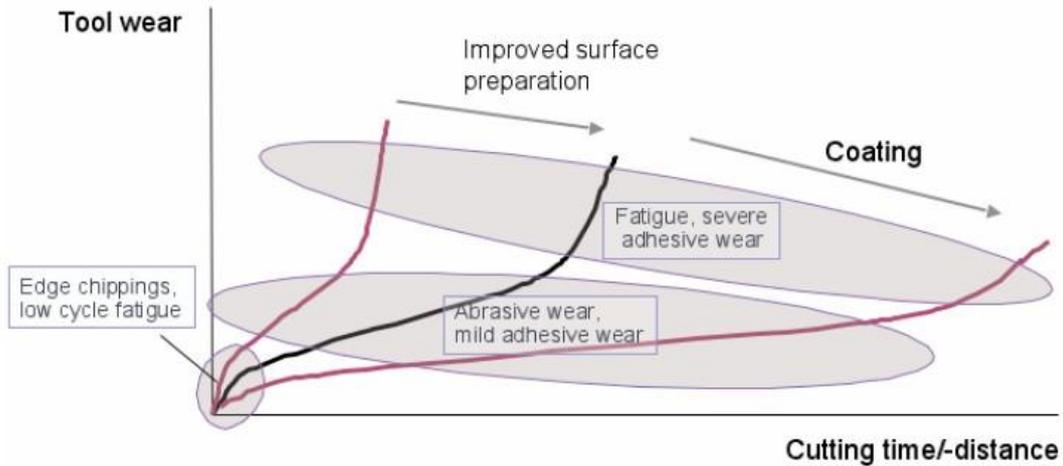
Inicialmente, los dientes de la fresa madre sufren roturas/astillamientos en el borde del filo (ver Figura 3.22 b y c). Al mismo tiempo, el ablandamiento térmico del material de la herramienta en la cara de desprendimiento (sobre el revenido revelado por el contraste oscuro adyacente al recubrimiento) reduce la capacidad de carga del recubrimiento, el cual falla por agrietamiento y fractura frágil (ver Figura 3.22 b), ya ilustrado en la Figura 3.21. Una vez el recubrimiento está desprendido, un gran cráter se desarrolla rápidamente en el sustrato desprotegido debido al desgaste adhesivo severo (ver Figura 3.22 d) [173].



**Figura 3.22.** Desgaste sucesivo de los dientes de una fresa madre recubierta de TiN revelado por SEM e imagen metalográfica de la sección transversal [173]:

- Visión general de un diente de una herramienta usada
- Estudio inicial de rotura/astillamiento de filo y ablandamiento térmico del sustrato recubierto sobre la cara de desprendimiento.
- Cerca de la rotura/astillamiento del filo en la sección transversal. Observando las grietas, éstas se propagan desde ambas caras, desprendimiento y separación/flanco.
- Estado final de desgaste severo de cráter. La imagen en b) y c) revela los efectos térmicos superficiales.

Independientemente de la localización del desgaste crítico, su evolución puede ser ilustrada como en la Figura 3.23 (la misma figura que la Figura 3.3 contenida en el punto 3.1. del presente documento). Un desgaste inicial, implica a menudo un embotamiento/asentamiento de la punta a través de fracturas menores (roturas/astillamientos), y está seguida por una línea, desgaste de estado-estable, régimen dominado por el desgaste abrasivo y adhesivo. Un gradual embotamiento en la punta es una de las razones detrás de un sucesivo incremento de la temperatura del filo, y eventualmente, una situación de desgaste acelerado a través de la fractura del filo o deformación plástica severa.



**Figura 3.23.** Evolución del desgaste de una herramienta. Los tres óvalos representan el desgaste inicial, el estado estable y el desgaste catastrófico de la herramienta, respectivamente [173]

También se indica en la Figura 3.23 que un alisamiento/mejora del estado superficial de la herramienta y preparación del filo prolongará la vida de la herramienta. Esto es aun más acentuado con recubrimiento. Sin embargo, la mejora de la resistencia al desgaste obtenida por el recubrimiento es frecuentemente usada para incrementar la productividad en lugar de obtener una vida de herramienta más larga.

La Tabla 3.1 muestra el resumen de los mecanismos de desgaste de herramientas de corte. Normalmente, la herramienta sufre de una combinación de dos o más de estos mecanismos, y puede ser difícil juzgar cuál es el dominante. También se indica en la tabla cómo los diferentes mecanismos de desgaste resultan de un efecto combinado de propiedades de los materiales de trabajo y herramienta, así como de los parámetros de corte [173].

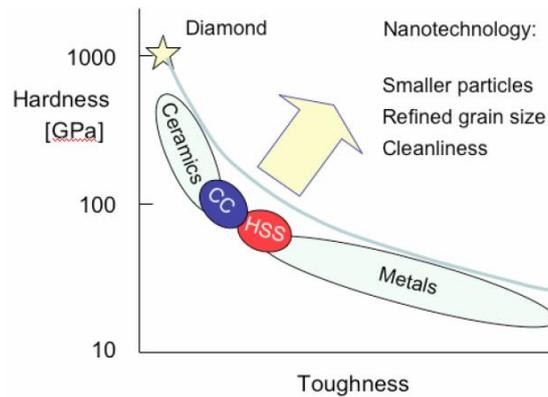
MECANISMO DE DESGASTE	CAUSA DEL DESGASTE	PROPIEDADES DE LA HERRAMIENTA PARA COMBATIRLAS
<b>Desgaste Abrasivo</b>	Partículas duras u otras fases duras en el material de trabajo, desprenden material por una acción de arrastre (erosión).	Alta dureza de la matriz, volumen grande de las fases duras, recubrimiento duro.
<b>Desgaste Adhesivo Leve y Severo</b>	La alta velocidad de corte genera temperaturas altas en la superficie de la herramienta que facilita una fuerte adhesión entre los materiales de trabajo y de la herramienta. La peor situación prevalece para materiales de trabajo resistentes, dúctiles y químicamente reactivos con baja conductividad térmica.	Superficie lisa/suave, filo agudo, alta dureza en caliente, alta conductividad térmica, recubrimiento químicamente inerte (contra la adherencia).
<b>Deformación plástica</b>	Alta velocidad de corte genera excesiva temperatura en el filo en combinación con las altas cargas.	Alta dureza en caliente, alta conductividad térmica.
<b>Fractura y fatiga</b>	Corte interrumpido, especialmente en combinación con alta velocidad de corte y uso de fluidos de corte, en materiales de trabajo resistentes y dúctiles. Uso de filos de herramienta insuficientemente agudos.	Superficie de la herramienta lisa/suave.

**Tabla 3.1.** Mecanismos de desgaste comunes de las herramientas de corte, sus causas y cómo combatirlas [173]

### 3.4. Como mejorar el rendimiento de las herramientas de corte

#### 3.4.1. Mejora del material de la herramienta-sustrato

De los mecanismos de desgaste mostrados en las herramientas de corte, se puede sacar la conclusión de que la dureza, la resistencia en caliente (dureza en caliente), y la tenacidad a la fractura, son los requisitos previos para un alto rendimiento en las herramientas. Los últimos desarrollos, tanto en HSS como en Metal Duro, se han concentrado en la mejora de la homogeneidad y limpieza de los materiales, obteniendo una granulometría más fina y estructuras homogéneas. También se busca la posibilidad de mejorar aun más la relación dureza/tenacidad, al reducir aún más el tamaño de los granos de la matriz y de las partículas de fase dura, hasta un rango nanométrico, aplicando nano-tecnología (ver Figura 3.24) [173].



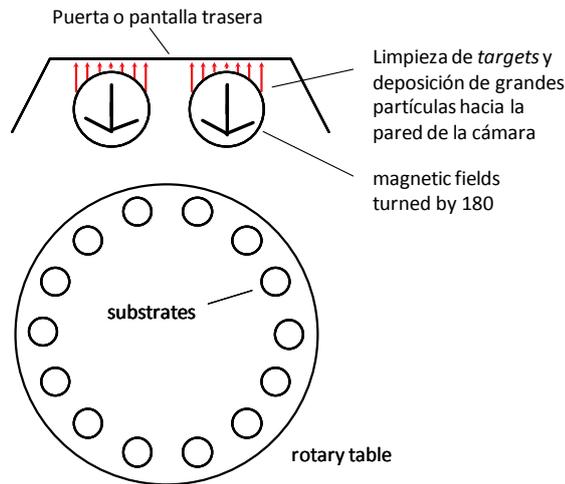
**Figura 3.24.** Reduciendo el tamaño de la microestructura de los constituyentes y mejorando la limpieza, se puede mejorar el ratio dureza/tenacidad [173]

### 3.4.2. Mejora de la integridad de la superficie

Otra forma de mejorar el rendimiento de las herramientas de corte, es mejorar el acabado superficial de las mismas, ya que entre otros aspectos, evita el deterioro superficial del material por la generación de un excesivo calor. La fuerza macroscópica y la resistencia a la rotura/astillamiento del filo de los materiales del sustrato (ver Figura 3.22 c) es muy sensible a los defectos superficiales creados en la preparación superficial-rectificado, y por tanto, la superficie del filo de la herramienta de corte debe estar adecuadamente preparada, a fin de evitar fallos prematuros. Una superficie lisa (con baja rugosidad) de la herramienta, contribuye significativamente a la resistencia contra micro-agrietamientos, y a evitar el desprendimiento prematuro de los recubrimientos, tal y como se explica en el punto 3.3.5.1 (ver Figura 3.19) [173].

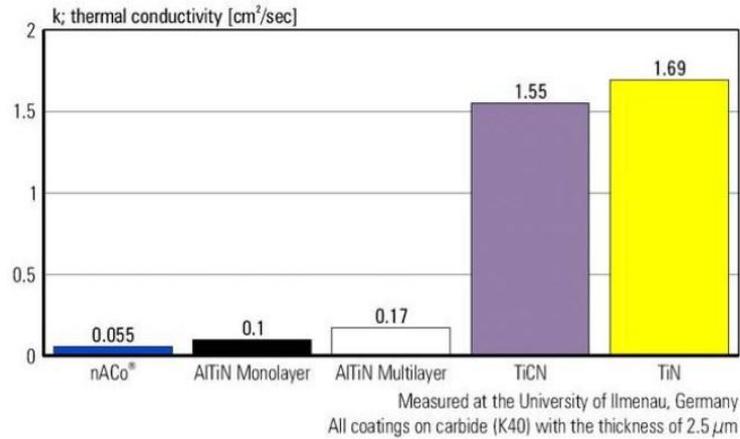
Las características que se buscan con los recubrimientos para reforzar la integridad de la superficie de la herramienta, se enfocan a los siguientes parámetros:

- **Elevada dureza**, para combatir el desgaste abrasivo, por ejemplo, utilizando recubrimientos nanoestructurados (ver punto 2.2.4), que presentan una extremada dureza y elevada resistencia térmica.
- **Elevada adhesión**, para incrementar el rendimiento de la herramienta, depende significativamente de los pre-tratamientos del sustrato (ver punto 2.3.3). También se puede mejorar la adhesión con la tecnología LARC (Lateral Rotating ARC-Cathodes), con la que se puede evitar la contaminación de las superficies a recubrir por las impurezas (gases, vapor de agua, ...) presentes en las superficies de los cátodos-targets (ver Figura 3.25).



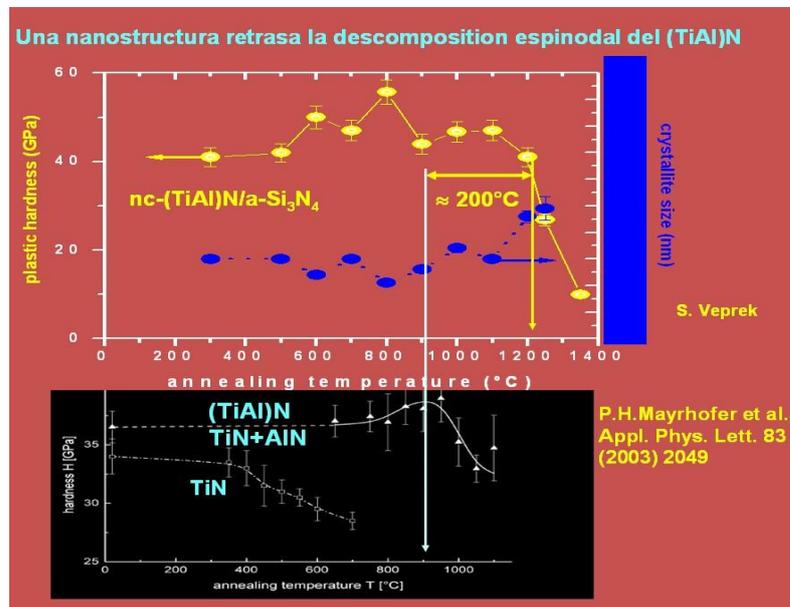
**Figura 3.25.** Esquema de la tecnología LARC, para el “virtual shutter”, que permite situar el arco en la parte trasera, de tal forma que el cátodo está limpio antes de recubrir [17]

- **Baja rugosidad**, tanto del sustrato como del propio recubrimiento, para combatir el desgaste adhesivo, la fractura y la fatiga. La rugosidad del sustrato y el reforzamiento de filos depende de los pre-tratamientos (ver punto 2.3.3) y de la preparación del filo de corte (ver punto 2.3.2). La rugosidad del recubrimiento se puede mejorar con los post-tratamientos (ver punto 2.3.4), como un medio para la eliminación de los “droplets”, generados durante el proceso de recubrimiento, o también mediante la tecnología LARC, que genera menos droplets por una mayor eficiencia de ionización (se aumenta la velocidad del movimiento del arco, lo que permite aumentar el campo magnético homogéneamente por toda la superficie del cátodo).
- **Baja conductividad térmica**, para combatir el desgaste adhesivo y la deformación plástica. El recubrimiento actúa como una capa protectora del sustrato, frente a las altas temperaturas (ver Figura 3.26).



**Figura 3.26.** Comparativa de la conductividad térmica de los distintos recubrimientos [17]

- **Elevada resistencia térmica**, es decir, dureza en caliente y resistencia a la oxidación, para combatir el desgaste adhesivo y la deformación plástica. Como ya se ha mencionado, los recubrimientos nanoestructurados, además de presentar una elevada dureza, tienen una elevada resistencia térmica (ver Figura 3.27).



**Figura 3.27.** Gráficos comparativos de la dureza en caliente de distintos recubrimientos [17]

- **Baja reactividad química**, para evitar el desgaste prematuro de la herramienta por mecanismos de difusión, entre otros, que se produce cuando los materiales tienen alta reactividad entre sí y trabajan a altas temperaturas.



**CAPÍTULO 4:**  
**VALIDACIÓN DEL MÉTODO A TRAVÉS**  
**DE ENSAYOS EXPERIMENTALES:**  
**TALADRADO DE ACEROS DE BAJA**  
**ALEACIÓN EN CONDICIONES DE ALTO**  
**RENDIMIENTO**

## 4. Validación del método a través de ensayos experimentales: Taladrado de aceros de baja aleación en condiciones de alto rendimiento

### 4.1. Introducción

En el presente capítulo se muestran los distintos ensayos con unas brocas de metal duro recubiertas con distintos recubrimientos PVD para el taladrado de alto rendimiento sobre el acero 42CrMo4. Con estos ensayos se busca la optimización de los procesos de recubrimiento, utilizando el método descrito en el Capítulo 3 de este documento: Método para la definición del proceso de recubrimiento.

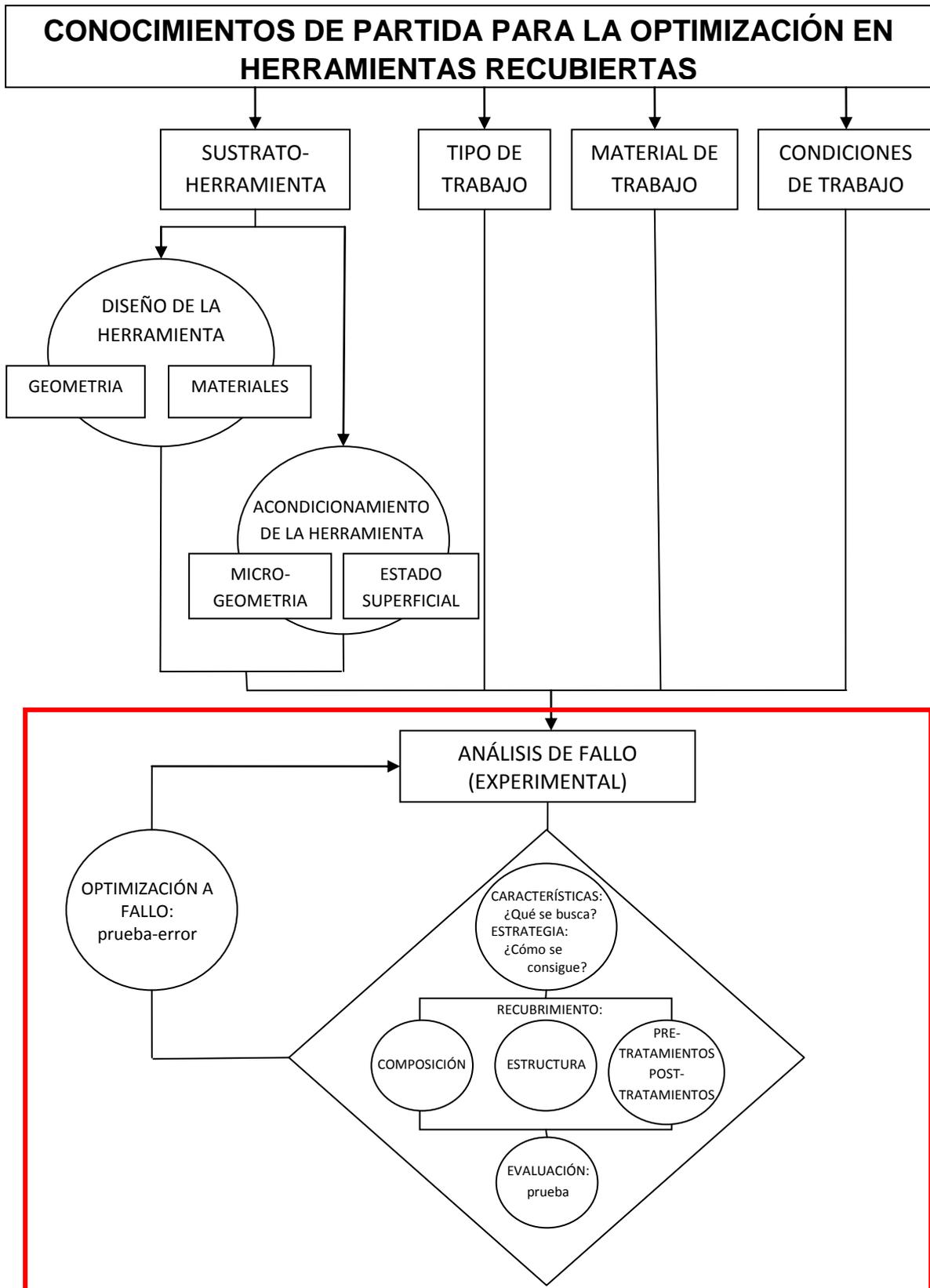
Resumiendo el Capítulo 3, el proceso general para la fabricación de una herramienta de corte recubierta es el mostrado en la Figura 4.1, centrándose este capítulo en las etapas que forman parte del proceso de recubrimiento: Pre-tratamientos, Post-tratamientos y el recubrimiento propiamente dicho. En algunos casos, en los propios centros de recubrimiento se puede mejorar la preparación de filos, pero normalmente es algo que realiza el propio fabricante de la herramienta.



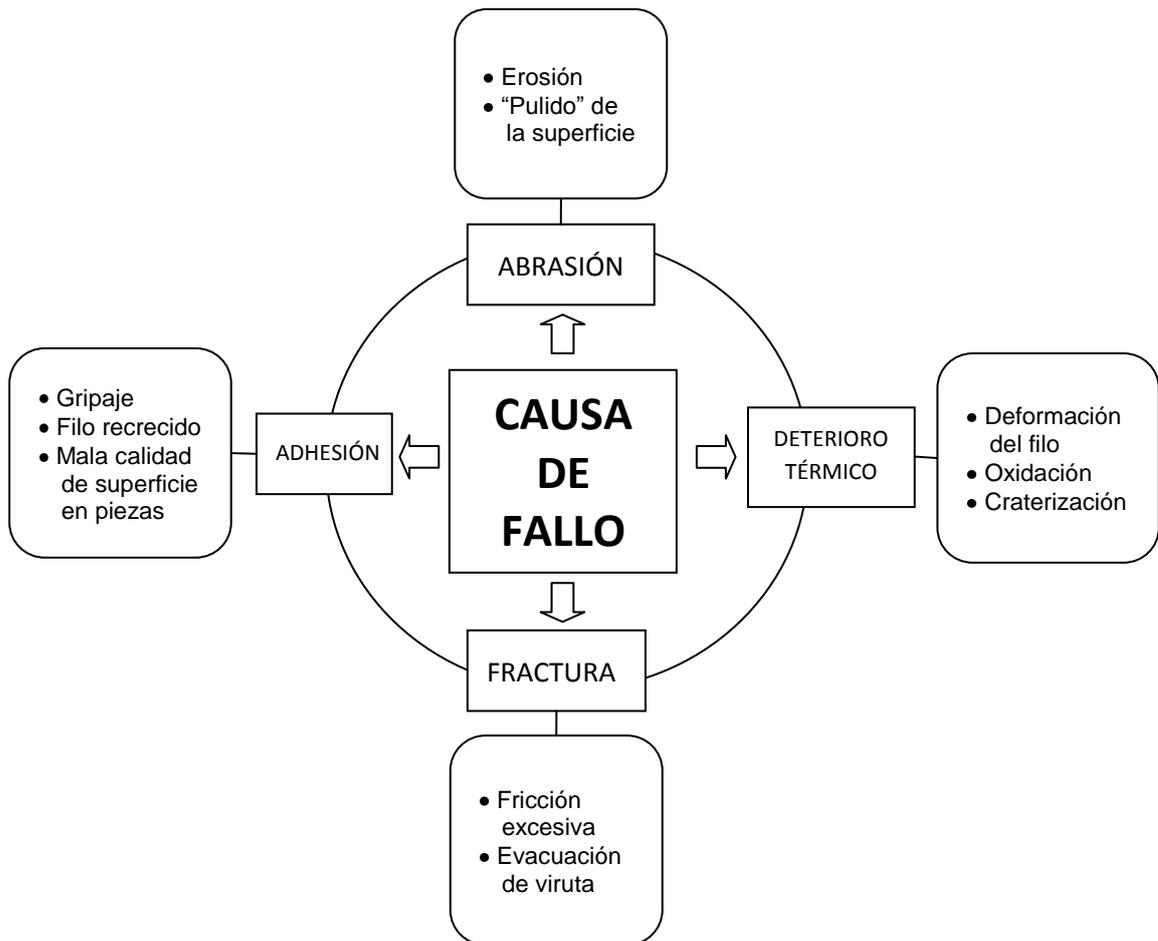
**Figura 4.1.** Proceso general de una herramienta recubierta. Las etapas sombreadas en rojo son las que forman parte del proceso de recubrimiento

La Figura 4.2 muestra el esquema para la optimización de procesos de recubrimiento, donde existen unos conocimientos de partida para poder realizar dicha optimización: Sustrato-herramienta, tipo de trabajo, material de trabajo y las condiciones de trabajo, a partir de las cuales y con una evaluación comparativa de pruebas de mecanizado, se busca la optimización (prueba-error). Esta “optimización a fallo”, se realiza analizando las causas del fallo (ver Figura 4.3), con lo que se puede trazar una estrategia para el

desarrollo de los procesos implicados en el recubrimiento así como en el propio recubrimiento.



**Figura 4.2.** Esquema para la optimización de procesos de recubrimiento. La parte recuadrada es la evaluación comparativa de pruebas de mecanizado para la optimización de los procesos de recubrimiento



**Figura 4.3.** Análisis de fallo

Las causas de fallo fundamentales, tal y como se describen en la Figura 4.3, son: abrasión, adhesión, fractura y deterioro térmico. Su identificación proporcionará una información para mejorar y desarrollar nuevos recubrimientos y sus procesos, es decir, "optimización a fallo".

Por tanto, con estos ensayos de taladrado se determina el comportamiento en cuanto al desgaste, teniendo en cuenta la evolución de los esfuerzos durante el taladrado, el desgaste de flanco, el daño en la zona de desprendimiento y en filos secundarios, el grado de adhesión del material de trabajo, el enmarañamiento de la viruta, la adhesión del recubrimiento al sustrato, etc. Las condiciones bajo las cuales se desarrollan estos ensayos son:

- Operación: Taladrado
- Material de la herramienta: Metal Duro
- Material de trabajo: Acero de herramientas 42CrMo4
- Refrigeración: Interna
- Refrigerante: Taladrina
- Tipo de recubrimiento: PVD por arco catódico

El objetivo, la optimización de los procesos de recubrimiento, en este caso de taladrado de aceros de baja aleación en condiciones de alto rendimiento, es permitir trabajar en condiciones de corte más rápidas, con mayor avance y velocidad de corte.

El taladrado de acero, que es el ensayo escogido para la validación del método de optimización de los procesos de recubrimiento, los parámetros más influyentes son: la dureza, la resistencia térmica y a la oxidación y la adhesión. Se trata de la operación de mecanizado que más propiedades debe controlar y esto es debido al gran desarrollo y amplia gama existente en los recubrimientos en taladrado, que obliga a buscar distintas soluciones y mejoras continuas de las propiedades. No es posible conseguir todas las características óptimas de forma simultánea, por eso se busca la relación más apropiada para cada operación.

## **4.2. Equipos y materiales**

Para realizar el estudio de los ensayos experimentales, con los que se validará el método, es necesario disponer de unos recursos materiales. Se utilizarán las instalaciones del centro de recubrimiento de la empresa Metal Estalki, S.L. (ver Figura 4.4) para la realización de los recubrimientos de las brocas que se van a ensayar. En estas instalaciones, además de la operación de recubrir, se realizará la limpieza de las herramientas, y los post- y pre-tratamientos que sean necesarios. Una vez que estén disponibles, se procederá a realizar las operaciones de taladrado en el taller mecánico de la Escuela de Ingenieros Superiores de la UPV, con el posterior estudio de las brocas en el laboratorio de metrología, ubicado en las mismas instalaciones. Como instrumento adicional, se utiliza el microscopio electrónico de barrido de la Universidad de Leioa.

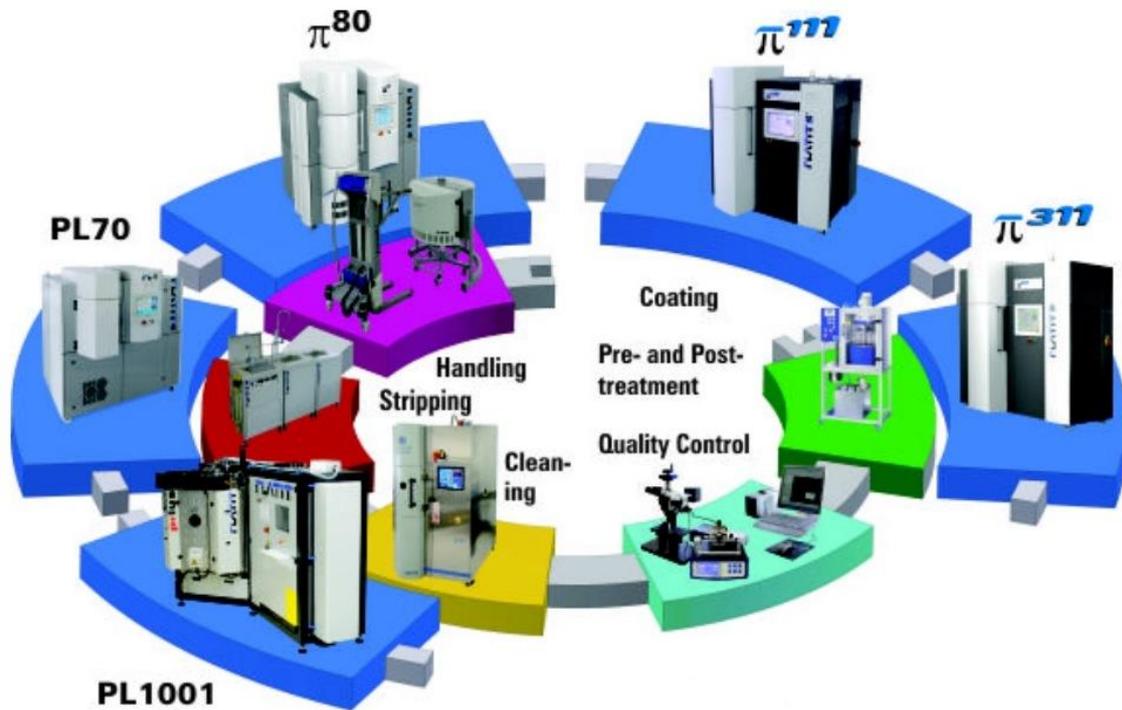


Figura 4.4. Esquema del proceso de recubrimiento [17]

#### 4.2.1. Equipos de recubrimiento

La empresa Metal Estalki, dónde se realizan los diferentes recubrimientos que se van a ensayar, realiza recubrimientos PVD por la deposición mediante arco catódico, utilizando la tecnología desarrollada por PLATIT. Los equipos de los que disponen, dos de ellos utilizan la tecnología cathodic ARC, siendo el nombre comercial PL-1001 y PL-50; y otro equipo que utiliza la tecnología LARC, la  $\pi 80$  (ver Figura 4.5).

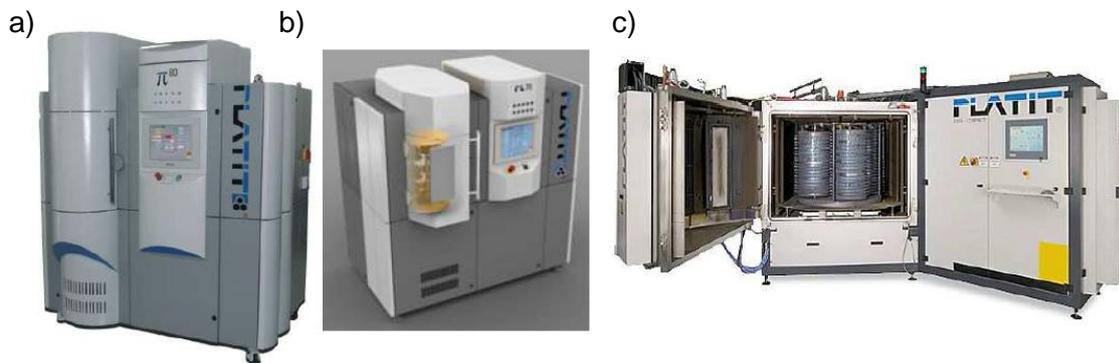


Figura 4.5. a) Equipo  $\pi 80$ ; b) Equipo PL-50; c) Equipo PL-1001 [17]

### 4.2.2. Equipo de limpieza

El equipo de limpieza, para limpiar las herramientas (en este caso brocas), antes de introducir en la cámara de recubrimiento, es un equipo de limpieza por ultrasonidos que utiliza como agente de limpieza detergente biodegradable fuertemente alcalino. El modelo del equipo es EU 2000 fabricado por EUROCOLD. En la Figura 4.6 se observa las distintas fases que realiza el equipo de limpieza.

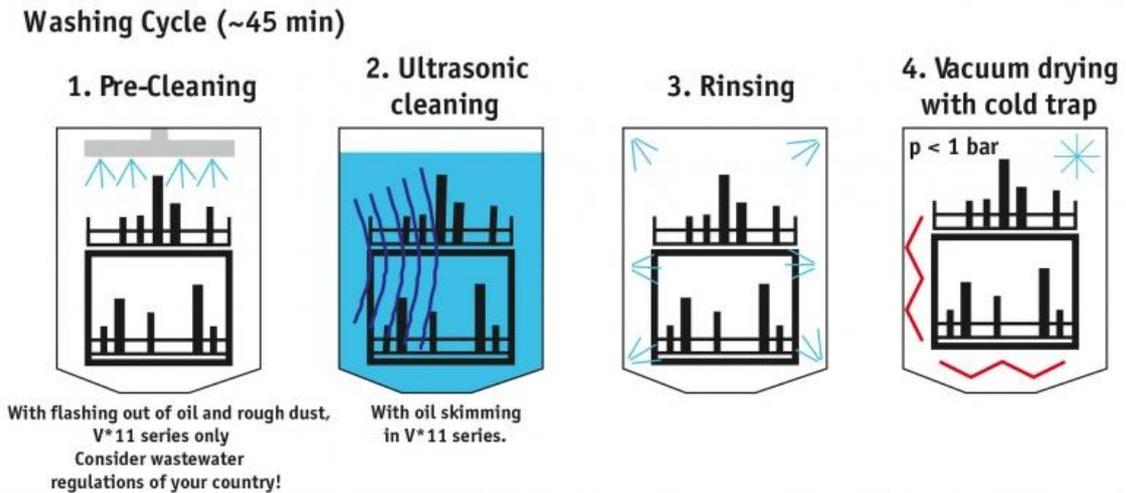


Figura 4.6. Esquema del proceso de limpieza [17]

### 4.2.3. Equipos de decapaje

La decapadora basa su acción en procesos químicos, que variarán dependiendo del tipo de recubrimiento a eliminar y del sustrato de la herramienta.

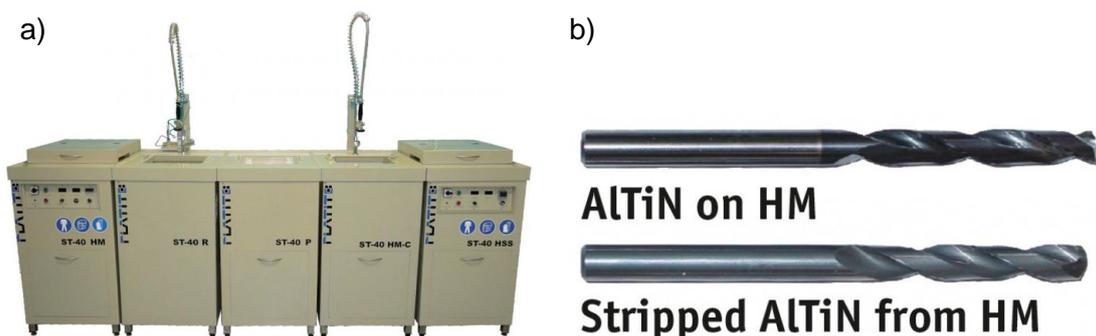


Figura 4.7. a) Módulos de decapaje; b) Herramienta recubierta, antes y después de decapar [17]

#### 4.2.4. Equipos de chorreado

Se disponen de varias chorreadoras secas (Modelo MEGA, de Abrasivos y Maquinaria, S.A.), con distintos tipos de arenas y tamaños de grano, para realizar los pre-tratamientos a las herramientas.



Figura 4.8. Chorreado de arena

#### 4.2.5. Equipo de Drag Grinding (pulido)

Se dispone de un equipo de Drag Grinding, OTEC, que es utilizado para mejorar el acabado superficial y para la eliminación de droplets en las herramientas recubiertas, como un post-tratamiento. Este equipo proporciona un pulido en tres dimensiones y funciona con un motor de 500W y diversos agentes abrasivos en función de la dureza del material a pulir. En la Figura 4.9 se muestra este equipo OTEC donde en la cuba está el abrasivo, y en los carruseles los sustratos-herramientas.



Figura 4.9. Máquina de Drag Grinding OTEC DF-35 [17]

#### 4.2.6. Centro de mecanizado y sistema de monitoreo de esfuerzos

Los ensayos de taladrado se llevaron a cabo en el centro de mecanizado de 3 ejes, Kondia A6 (ver Figura 4.10), con las siguientes características:

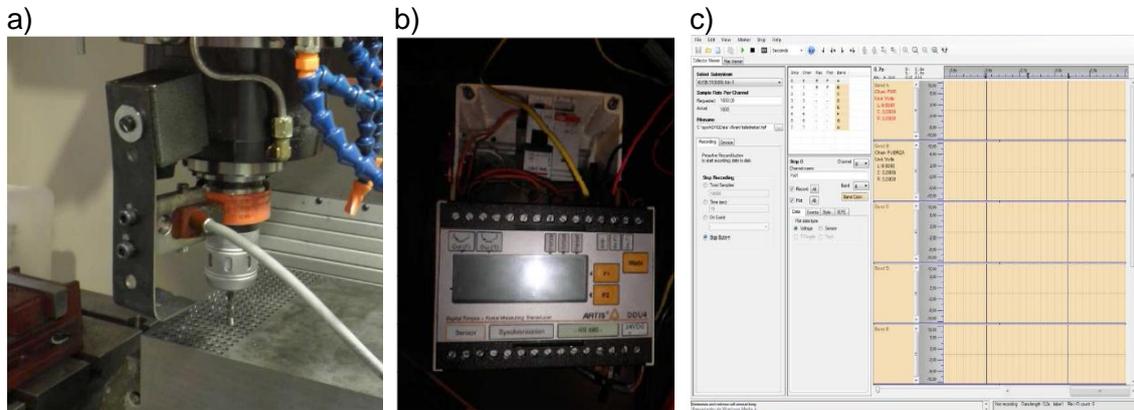
» MESA	Superficie de trabajo	800x400 mm
	Ranuras en T (Nº x ancho x distancia)	3x18x125 mm
	Altura mesa al suelo	885 mm
	Distancia de la mesa al husillo	140/650 mm
	Peso máximo sobre la mesa	450 kg
» RECORRIDOS	X	600 mm
	Y	400 mm
	Z	510 mm
» CABEZAL	Cono	ISO 40/ BT 40 (Doble contacto)
	Gama de velocidades rpm	9.000 / op.12.000 / op.24.000
	Opciones	Consultar
» PRESTACIONES	Posicionamiento	0,008
	Repetibilidad	0,006
	Resolución	0,001
» MOTOR	Cabezal	5,5/7,9 KW op. 11/15 KW op. 17,5 KW
» CAMBIADOR AUTOMÁTICO DE HERRAMIENTAS	Nº herramientas	22 (op. 20 Random)
» PESO	Peso aprox.	4.200 Kg



Figura 4.10. Centro de mecanizado Kondia A6

El Artis DDU4, sirve para monitorizar los esfuerzos que sufre la herramienta a lo largo del mecanizado, ya sea en fresado, roscado o taladrado, como es el caso. Para ello es necesario el uso de un rotor que consiste en unas galgas extensométricas colocadas

en el portaherramientas y de un estator que se coloca frente al rotor mediante un imán, como se muestra en la Figura 4.11. a. Los datos son enviados al transductor (ver Figura 4.11. b) y éstos son tratados en el software Artis Quick data (ver Figura 4.11. c).



**Figura 4.11.** a) Estator y rotor del Artis DDU4; b) Transductor del Artis DDU4; c) Software de adquisición de datos QuickData

#### 4.2.7. Sierra automática MOD 350

La utilización de esta máquina resulta imprescindible debido a los problemas de Chatter generados en el planeado del material para los ensayos (ver punto 4.2.10). Se trata de una sierra automática (ver Figura 4.12) con las siguientes características:

- Potencia: 1.1/1.5 kW
- Apriete hidráulico
- Ángulo máximo 60°



**Figura 4.12.** Sierra automática MOD 350

#### 4.2.8. Material para los ensayos: Prehardenedsteel Tool 42CrMo4

El material que se utiliza en los ensayos de taladrado es el “Prehardenedsteel Tool 42CrMo4”. Se trata de un acero perlítico de herramientas con las siguientes características principales:

- Dureza Brinell de entre 275-325 HB (27-30 HRc), medido a 0.5-2 mm de la superficie original y de acuerdo con la siguiente norma EN 10 025 y EN ISO 6505.
- Templado y revenido a una temperatura mínima de 590°.
- Forjado según especificaciones de DIN 7527, entre las que cabe citar: exención de cascarilla de laminación, ausencia garantizada de soldadura de reparación y de defectos superficiales superiores al espesor nominal.
- Gran tenacidad al impacto y bajas tensiones residuales.

Las propiedades de dureza y estructura fueron medidas en el taller para comprobar la calidad de la información. La microdureza arrojaba medidas repetitivas de entorno a 29 HRc y la estructura metalográfica mostrada en la Figura 4.13. Además, posee también como propiedades relevantes la que aparecen en la Tabla 4.1:



**Figura 4.13.** Estructura metalográfica del 42CrMo4

COMPOSICIÓN QUÍMICA		PROPIEDADES MECÁNICAS		
C	0.22-0.24%		+20 °C	+200 °C
Si	0.6-1.1%	Resistencia a la tracción, $R_m$ [MPa]	980	900
Mn	0.8%	Limite de elasticidad, $R_{p0.2}$ [MPa]	850	800
P	max 0.010%	Elongación, $A_5$ [%]	16	12
S	max 0.003%	Limite de resistencia a la compresion, $R_{cq2}$ [MPa]	800	750
Cr	1.0-1.2%	Resistencia al impacto, [J]	100	170
Mo	0.30%	Dureza, [HBW]	300	
V	0.10-0.11%	Dureza, [HRC]	29	
Ni	max 1%			
CE <sub>IIW</sub>	0.62-0.71			
CET	0.40-0.44			

INCLUSIONES		PROPIEDADES FÍSICAS		
Tamaño (diám. equiv.)	6 $\mu\text{m}$		+20 °C	+200 °C
Fración de área	0.015%	Conductividad térmica [W/m • K]	35	35
Relación de aspecto	1.2	Coefficiente de dilatacion térmica [10-6/K]	13.1	13.1

Tabla 4.1. Propiedades del acero 42CrMo4

Se debe tener cuidado con la zona en la que se trabaja, teniendo presente que la dureza superficial del mismo es superior que en el interior al estar en contacto con la atmósfera, como se indica en la Figura 4.14.

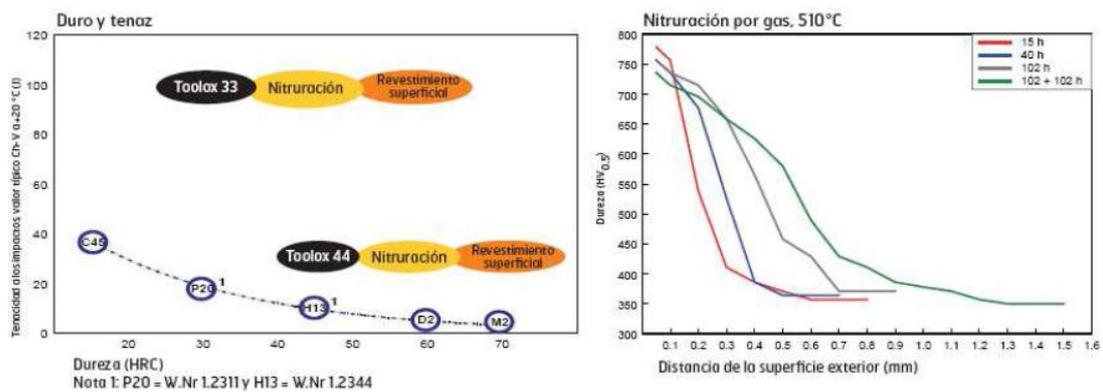


Figura 4.14. Dureza superficial del 42CrMo4

Las recomendaciones en cuanto a mecanizado en general son las que aparecen en la Figura 4.15, pero hay que destacar que aunque se vende como un acero con excelente maquinabilidad, la viruta desprendida tanto en el centro de mecanizado

como en la sierra automática no es en absoluto deseable y provoca numerosos problemas.

**FRESADO:**

**Plaquita de metal duro cementado ISO clase P 20**

El ángulo de corte debe ser siempre positivo  
 Velocidad de corte  $V_c=150-250$  m/min  
 Avance:  $f=0.10-0.20$  mm/diente

Velocidad (vrt/min):  $n = \frac{V_c \cdot 1000}{\pi \cdot D}$

**Desbaste:**  
 Utilice platos con plaquitas circulares

**Acabado:**  
 Utilice fresas con un ángulo de posición de 45°



**TALADRADO:**

**Brocas de carburo**

Velocidad de corte:  $V_c=40-50$  m/min  
 $F=0.1-0.18$  mm/vuelta  
 La penetración (f) y la velocidad dependen del diámetro D de la broca  
 Utilice refrigerante



**Acero rápido HSS-Co**

Velocidad de corte:  $V_c=13-15$  m/min  
 Velocidad (rpm):  $n = \frac{V_c \cdot 1000}{\pi \cdot D}$   
 Utilice refrigerante

D [mm]	PENETRACIÓN f[mm/rev]
5	0.10
10	0.10
15	0.16
20	0.23
25	0.30
30	0.35

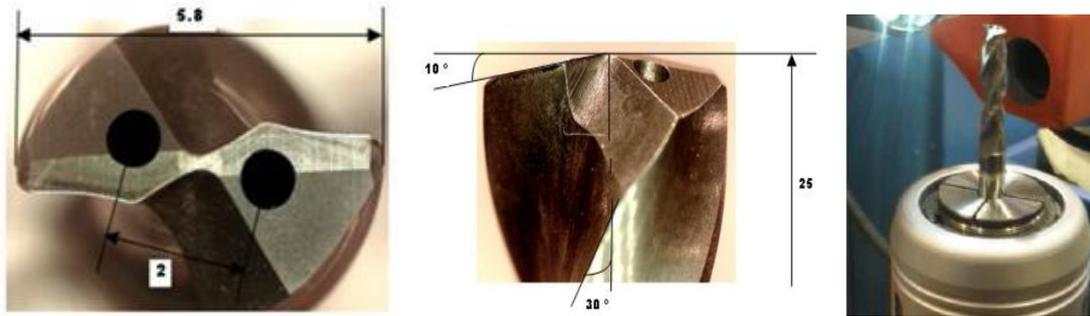
**Figura 4.15.** Parámetros de corte recomendados para el 42CrMo4

Estos son los parámetros de corte recomendados para conseguir un mecanizado óptimo, sin embargo en este ensayo, para la optimización de los procesos de recubrimiento, lo que se trata de caracterizar es el desgaste de una manera prematura, así que los parámetros utilizados son mucho más estrictos.

Se trabaja con bloques de dimensiones 250x250x10 mm, escogidas por las limitaciones de la mesa de la máquina y de la mordaza, así como por el peso, que ronda los 50 kg.

**4.2.9. Herramienta de ensayo: Broca de metal duro Lumi W119**

La broca cuyo desgaste se trata de caracterizar para mejorar su rendimiento, tiene como principales características las que aparecen en la Figura 4.16.



**Figura 4.16.** Características de la herramienta de trabajo

Para esta herramienta, se recomiendan las siguientes condiciones de corte para una duración óptima y mecanizado, sobre el material original de trabajo.

- Velocidad de corte= 76 m/min
- Avance por revolución= 0.15 mm
- N= 4500 r.p.m.

Hay que reconsiderar que estas condiciones de corte son las recomendadas para un material de trabajo que no es el mismo al ensayado y que el objetivo no es el mismo. Por eso las condiciones de corte que se usan en este ensayo son más extremas. En la Tabla 4.2 se muestran las condiciones de corte utilizadas en los ensayos, siendo distintas para medida o ensayos, debido a las limitaciones del Artis DDU4 en cuanto a número de revoluciones.

		Vc (m/min)	f (mm/rev)	N (r.p.m.)	Vf (mm/min)	Tiempo agujero (s)	Estrategia de mecanizado
<b>Condiciones de ensayo</b>	Entrada	160.22	0.12	8500	350	2.3	
	Taladrado	160.22	0.12	8500	2040		
<b>Condiciones de monitorización</b>	Entrada	94.3	0.12	5000	200	4	
	Taladrado	94.3	0.12	5000	1200		

**Tabla 4.2.** Parámetros de corte utilizados

#### **4.2.10. Herramienta de preparación de ensayo: Fresa y plaquitas RCKT 12 04 MO-PM 4240 de Sandvik**

La fresa y plaquitas utilizadas para la operación de planeado de las superficies de los tochos de material de los ensayos son de Sandvik (ver Figura 4.17). Se tratan de unas plaquitas especialmente destinadas al trabajo sobre acero, con gran estabilidad del filo y geometría positiva.



**Figura 4.17.** Fresa y plaquitas utilizadas para el planeado

Aunque la operación que realizan es secundaria para el objetivo del ensayo, es muy importante una buena selección de las mismas, ya que al haber paredes delgadas y corte intermitente, es decir, con numerosos golpes en las plaquitas de la fresa, podrían aparecer problemas de Chatter y otros tipo de inestabilidades, que serán difíciles de suprimir, pero que deben ser evitados en la medida de lo posible.

Aún habiendo escogido de manera óptima las plaquitas, se generan grandes problemas de vibración que empiezan a afectar al eje del centro de mecanizado, de cómo que a partir del cuarto tocho de material, se recurrió al corte por sierra automática (ver punto 4.2.7).

#### **4.2.11. Calotest**

El calotest se utiliza para obtener el espesor de los recubrimientos. Siempre es más fiable realizarlo sobre una probeta plana, pero hay que tener presente que el espesor obtenido no será el mismo que el que se obtiene sobre la propia herramienta, por lo que el ensayo también se realiza sobre ésta.

El calotest es tal y como se muestra en la Figura 4.18, y está formado por el apoyo, la bola y el sistema de movimiento. El apoyo es una chapa inclinada con unos topes adaptados de manera que la probeta plana queda fija mientras la bola rueda sobre ella. La bola es de acero inoxidable y mide 20 mm de diámetro. El sistema de movimiento consta de una pista de rodadura con una acanaladura en V de 90° aproximadamente para encarrillar la bola y guiarla de manera que no se desvíe, de un motor de 11.99 SV que proporciona el giro a un eje rectificado de acero al carbono, unos rodamientos para evitar holguras y proporcionar un giro más limpio y un sistema de reducción mediante engranajes de muy pequeño diámetro.

Además para una correcta rodadura de la bola, se necesita una lubricación basada en alcohol etílico al 98% y una pasta de diamante que actúa como agente abrasivo (ver Figura 4.18).



**Figura 4.18.** Calotest y pasta de diamante abrasiva

#### **4.2.12. Durómetro Rockwell C**

El durómetro Rockwell C (ver Figura 4.19) se utiliza para la medida cualitativa de la adhesión y tiene las siguientes propiedades:

<i>Modelo:</i>	HRR-150 <sup>a</sup>
<i>Escala de Rockwell:</i>	HRA, HRB, HRC, HRD, HRE, HRF, HRG, HRH, HRK, HR15N, HR30N, HR45N, HR15T, HR30T, HR45T
<i>Fuerza del examen preliminar:</i>	10Kg (98.0N), 3Kg (29.42N)
<i>Fuerza total de la prueba:</i>	60Kg (588N), 100Kg (980N), 150Kg (1471N), 15Kg (147.1N), 30Kg (294.2N), 45Kg (441.3N)
<i>Datos de la dureza leídos:</i>	Dial
<i>Tamaño del instrumento:</i>	465×180×655m m (L×W×H)
<i>Gama del valor de la dureza:</i>	HRA: 20~88 HRB: 20~100 HRC: 20~70 HR15N: 70~91 HR30N: 42~80 HR45N: 20~70 HR15T: 73~93 HR30T: 43~82 HR45T: 12~72
<i>Estándar ejecutivo:</i>	GB/T230.2 estándar nacional, reglas de la inspección JJG112

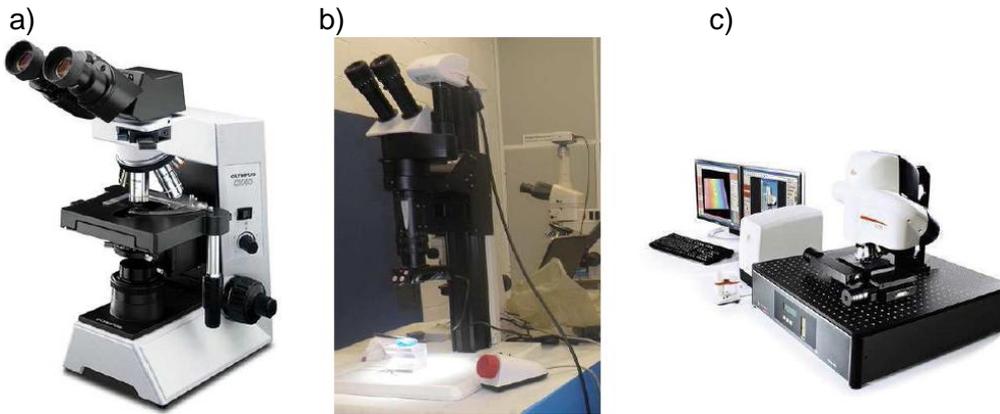


Figura 4.19. Durómetro Rockwell C

#### 4.2.13. Microscopio óptico, microscopio multifoco y microscopio confocal 3D

El microscopio óptico (ver Figura 4.20. a) se utiliza en la medida del espesor y de la adhesión y es propiedad de Metal Estalki. Trabaja bajo 20 aumentos y está conectado

a una cámara CCD que lo conecta con el PC donde se hace el tratamiento de la imagen con el software METREO.



**Figura 4.20.** a) Microscopio óptico Olympus; b) Microscopio óptico multifoco Leica Z6 APO; c) Microscopio confocal Leica DCM 3D

El microscopio multifoco y el confocal 3D (ver Figura 4.20. b y c) son propiedad del taller mecánico de la Escuela de Ingenieros de Bilbao, y su funcionamiento es muy similar. La ventaja que ofrecen estos microscopios es la profundidad de campo que tienen debido al barrido que realizan. Mediante la introducción del plano más bajo y el más alto enfocados, se hace un barrido de planos con el paso deseado y se consiguen perfiles en 3D del objeto a analizar.

#### 4.2.14. Microdurómetro y perfilómetro

El microdurómetro (ver Figura 4.21. a) se utiliza para comprobar las propiedades de dureza que garantiza el fabricante. Proporciona valores de dureza Vickers y Rockwell C e indentación Knoop o Vickers, y permite aplicar un amplio rango de cargas en función de la dureza del material.

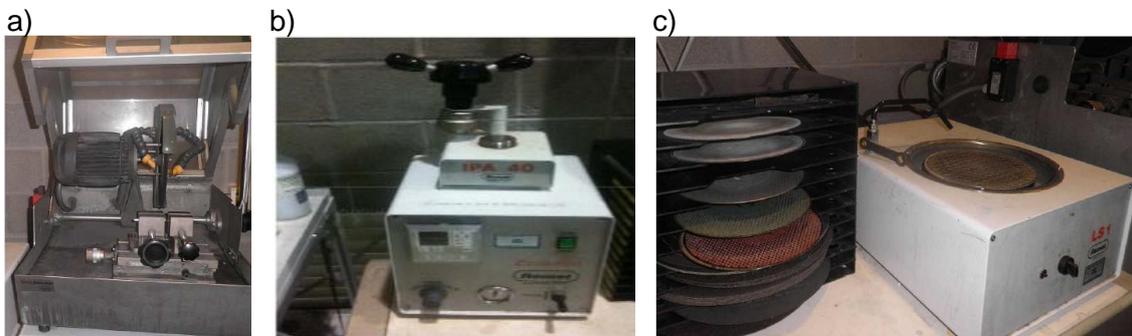


**Figura 4.21.** a) Microdurómetro Future Tech FM 800; b) perfilómetro Taylor Hobson From Talysurf Series 2

El acabado superficial de los agujeros se midió con el Perfilómetro Taylor Hobson, que permite obtener perfiles en dos dimensiones y discernir el factor de forma del de la rugosidad. Cuenta con un recorrido de 80 mm en dirección “X”, y 50 mm en la dirección “Y” y tiene una precisión de 12  $\mu\text{m}$ .

#### 4.2.15. Cortadora, encapsuladora y pulidora metalográfica

La cortadora metalográfica (ver Figura 4.22 a) se utiliza para el corte de las brocas de metal duro y para el corte del material con el fin de observar su estructura metalográfica. La cortadora posee unas mordazas para garantizar el correcto amarre de la pieza a cortar. Utiliza como refrigerante taladrina y el avance se determina de forma manual mientras el disco gira arrastrado por un motor.



**Figura 4.22.** a) Cortadora metalográfica Remet TR 100 Evolution; b) encapsuladora térmica Remet IPA 40 Evolution; c) pulidora metalográfica de plato Remet LS1 con discos de lija

La encapsuladora (ver Figura 4.22 b) se utiliza para introducir las muestras cortadas con la cortadora metalográfica en una resina. Mediante la realización de capsulas, se permite una mejor manipulación para la realización del pulido que se realiza posteriormente. Además, permite un mejor apoyo y colocación para cuando se vayan a examinar las muestras en el microscopio. Para el encapsulado de una muestra se introduce en el interior de la encapsuladora con resina de encapsular, que es introducido en formato polvo, y mediante la compresión con un pistón a altas temperaturas, se obtiene una solidificación del producto, obteniendo como producto final, una pastilla de resina, con la superficie de la muestra a estudiar en una cara de la misma.

La pulidora (ver Figura 4.22. c) se utiliza para pulir las probetas y la muestra de acero de modo que no queden rayas visibles y se pueda realizar el ataque con NitAl. La pulidora consta únicamente de una conexión con agua de la red, y un plato imantado girando, arrastrado por un motor sobre le que se ponen discos cada vez más finos. En

los últimos discos, es necesario añadir jabón como lubricante y spray con micropartículas de diamante de diámetro 20  $\mu\text{m}$ , 5  $\mu\text{m}$  y 2  $\mu\text{m}$ .

#### 4.2.16. Microscopio electrónico de barrido: Microscopía SEM y análisis EDX

El microscopio electrónico se utilizó para captar los fenómenos no observados en otros ensayos. Este microscopio, utiliza un haz de electrones en vacío para formar la imagen de la muestra conductora. Posee una gran profundidad de campo y permite obtener imágenes de alta resolución.



Figura 4.23. Microscopio electrónico de barrido JEOL JSM-6400

### 4.3. Análisis realizados

#### 4.3.1. Espesor, adhesión y rugosidad de los recubrimientos

La determinación de estos parámetros resulta imprescindible a la hora de definir cualquier recubrimiento. Por una parte, el espesor puede afectar de forma drástica al comportamiento de las herramientas, y además variará enormemente en función de la aplicación y herramienta sobre la que se aplique el recubrimiento. Por otra parte, la adhesión juega un papel crítico en el rendimiento de los recubrimientos, ya que si ésta es mala, el recubrimiento se despegará cuando esté trabajando, dejando la broca al descubierto y dejando de aportar las ventajas para las cuales fue creado. Y finalmente, la rugosidad es una característica importante en mecanizado y conformado, debido a los microgolpes y a los desgarros de material que puede provocar respectivamente.

Para la obtención del **espesor**, se necesitan los siguientes equipos: Calotest, Microscopio óptico, Software de adquisición y tratamiento de datos METREO Kappa.

Para conseguir el valor del espesor, normalmente se utilizan unas probetas circulares y luego los resultados se extrapolan de manera cualitativa a la herramienta recubierta, teniendo en cuenta que la probeta deberá estar en una posición muy similar dentro de la cámara de recubrir, para evitar el factor dispersión. La probeta, antes de recubrirse, tiene que pasar por un proceso de pulido y limpiado. Por una parte, se pule en una pulidora (ver Figura 4.24), haciéndola pasar por distintos discos hasta llegar al paño con partículas de  $2\mu\text{m}$ , que permiten un pulido prácticamente a espejo.



**Figura 4.24.** Pulidora metalográfica de plato Remet LS1 y discos de lija

Hay que tener en cuenta, que el pulido debe ser uniforme, de tal forma que para conseguirlo hay que ejercer una presión uniforme sobre la probeta para que todo esté igualmente en contacto con los discos o paños. Una vez pulida se limpia en el equipo de limpieza.

Ya limpias, se las pasa un paño con alcohol al 98% para asegurar que no contenga partículas causantes de desperfectos en el recubrimiento de la propia probeta o en el del resto de la carga, y se colocará dentro de la máquina de recubrimiento con la carga a recubrir.

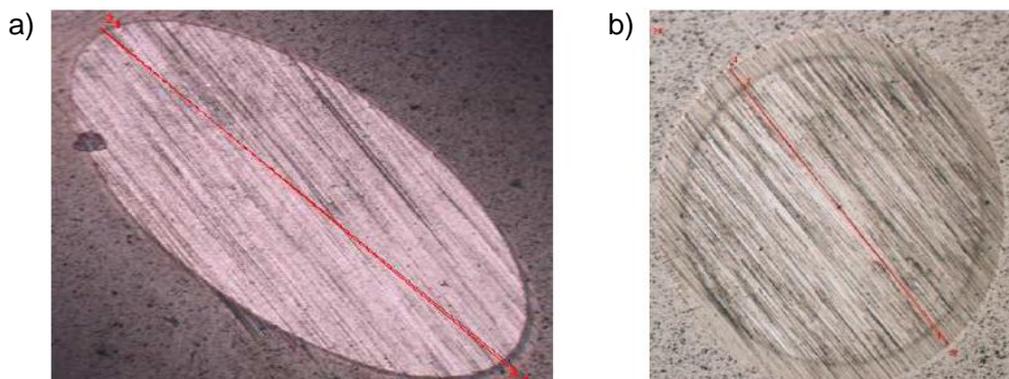
Terminado el proceso de recubrimiento, se extrae la probeta y se coloca sobre el apoyo del calotest como aparece en la Figura 4.25., orientando la pista de la bola de acero de tal forma que haga contacto con la probeta. Se le aporta pasta de diamante a la bola y lubricación, y se activa el interruptor para que la bola empiece a rodar, haciendo la muesca.



**Figura 4.25.** Calotest

La probeta se lleva al microscopio y allí se enfoca y se aporta la luz necesaria para tomar la imagen. Una vez tomada, esta es exportada al software METREO y se realizan las medidas explicadas en el punto 2.4.1.1, obteniendo el valor del espesor de la probeta.

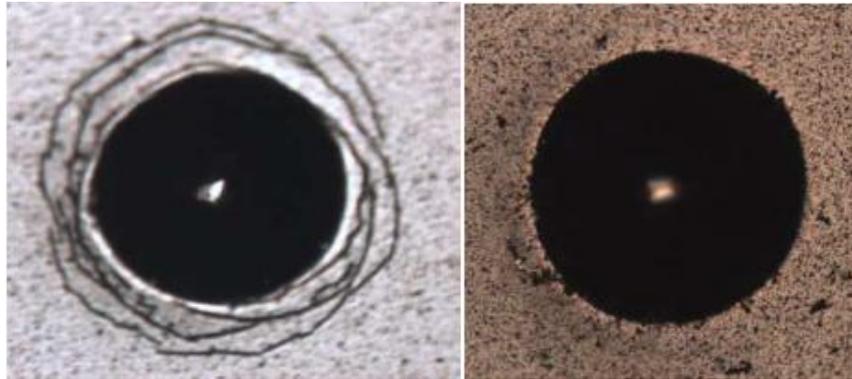
En general, la medida de espesor se lleva a cabo sobre unas probetas circulares de diámetro 15 mm de AISI D2. De este modo se obtiene la típica muesca redonda, sin embargo las medidas se pueden realizar también sobre la propia herramienta, obteniendo así una muesca elíptica, donde las medidas anteriormente descritas se deben realizar en el semieje mayor. En la Figura 4.26 se muestran dos medidas de calotest, una sobre la broca y otra sobre la probeta.



**Figura 4.26.** a) Muesca del calotest sobre broca; b) muesca de calotest sobre probeta

Para evaluar la **adhesión** de los recubrimientos, se necesitan los siguientes equipos: Máquina Rockwell C y Microscopio óptico.

En la misma probeta donde se ha realizado el cálculo del espesor se realiza la medida de la adhesión. Como se ha descrito en el punto 2.4.1.2, esto es una propiedad cualitativa, por lo que tras aplicar la carga al realizar el ensayo Rockwell C, se compara la delaminación existente alrededor de la muesca con las figuras patrón. En la Figura 4.27 se pueden ver dos ejemplos de distintas adhesiones.



**Figura 4.27.** Muestras de distintos grados de adhesión

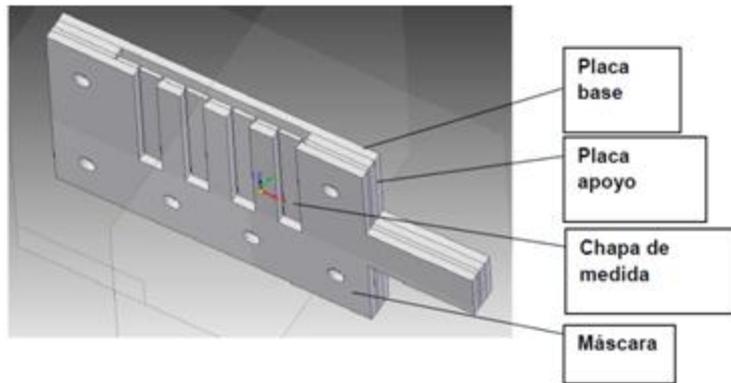
Para calcular la **rugosidad** de estos recubrimientos se necesitan los siguientes equipos: Rugosímetro digital y Mesa de calibración.

Para la realización de esta medida, hay que tener en cuenta que la probeta debe estar fija en una posición y no se mueva durante la medida. Además hay que poner atención en la orientación de la probeta de tal modo que la longitud de medida sea inferior a sus dimensiones y finalmente hay que poner especial cuidado en la presión que ejerce el palpador, evitando choques o la pérdida de contacto. Tras la realización de la medida, se filtra la señal obtenida con un filtro gaussiano de 0.15, obteniendo finalmente los parámetros Ra y Rz de la probeta.

#### **4.3.2. Medida de tensiones residuales de los recubrimientos**

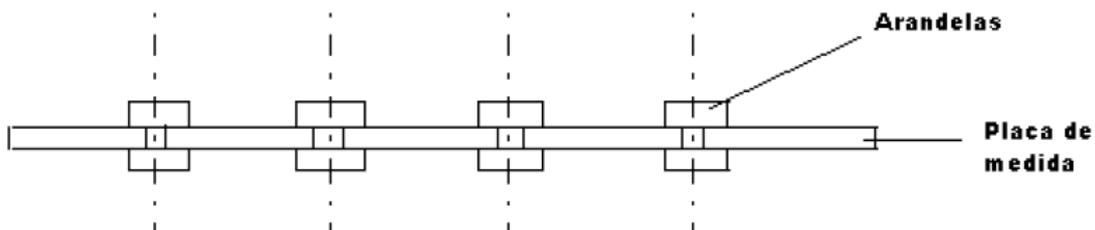
Para realizar la medida de las tensiones residuales de los recubrimientos, se recurre al ensayo diseñado, que está basado en las tensiones de Stoney (ver punto 2.4.1.8).

Para el **montaje de las probetas**, únicamente se deben unir la placa base, la placa apoyo, la chapa de medida y la máscara, en el orden descrito mediante seis tornillos de métrica 4, como se muestra en la Figura 4.28.



**Figura 4.28.** Montaje de las probetas

Las arandelas de diámetro interior de 5 mm se colocarán en cada tornillo a ambos lados de la chapa de medida de tensión, de modo que se garantice la inexistencia de contacto de la chapa de medida con el resto de placas. Para mejor comprensión se puede ver el montaje de las arandelas en la Figura 4.29.



**Figura 4.29.** Montaje de arandelas entorno a la chapa de medida de tensiones

Se deben notar las siguientes observaciones:

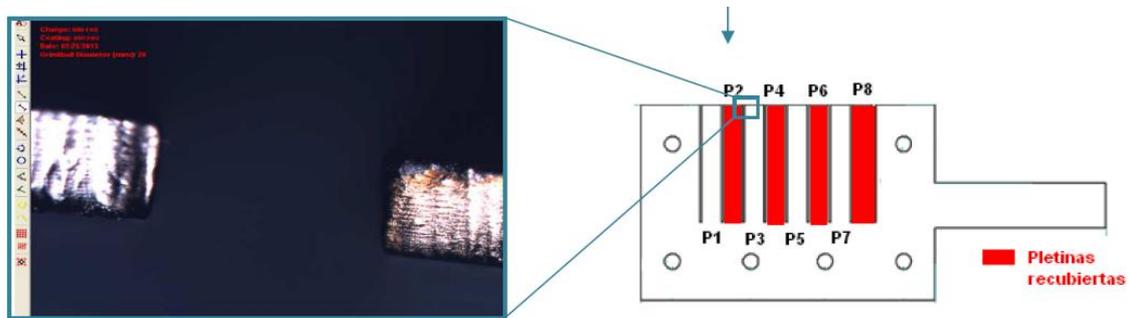
- No doblar y evitar manipular salvo en caso necesario, las chapas de medida tras la recepción. La deformada inicial de esta chapa es crucial para obtener un valor correcto. Evitar así mismo la manipulación brusca de las mismas durante el transporte y la medida, evitando de manera crítica tocar o golpear la placa de medida de tensión una vez montada la probeta.
- En caso de que la placa de medida de tensión se reciba con rebabas del láser, poner especial cuidado en colocarla de manera que la parte recubierta sea la que carece de rebabas.
- Es importante no ejercer demasiado par de apriete sobre los tornillos, ya que dotarían a la chapa de medida de una deformación inicial que podría invalidar

el ensayo. Se apretarán los tornillos hasta que hagan tope, inmovilizando las chapas, en caso de verlo suelto, apretar un poco más.

- Tras el montaje y la medida previa al recubrimiento, se colocará sobre un casquillo base largo de 14mm, junto con una probeta AISI D2.

En este **procedimiento para la medida de tensiones**, la probeta debe medirse antes y después del recubrimiento de la misma, para conocer el desplazamiento relativo de las pletinas.

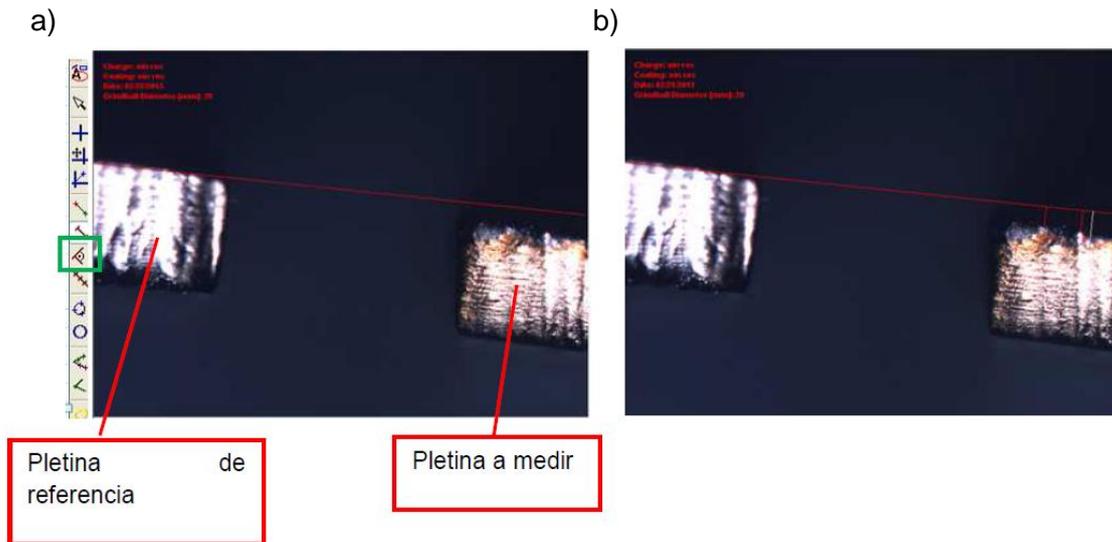
Se coloca la probeta de manera que la luz del microscopio incida sobre el lado inferior de las pletinas, apoyándolo con las pletinas en vertical y con la cabeza de los tornillos de cara al usuario. Mediante el programa de medición METREO, se enfoca la unión entre la primera y segunda pletina, obteniéndose una imagen con los dos extremos, como se observa en la Figura 4.30



**Figura 4.30.** Zona a medir de la probeta de las tensiones

Una vez localizada la zona, se comprobará que no es posible enfocar ambas pletinas de forma simultánea, de modo que sin desenfocar completamente la pletina de referencia se dará más importancia al enfoque de la pletina de medida. La luz que se aportará a la imagen será tal que permita discernir con nitidez alguna zona de la chapa de medida, sin llegar a quemarla.

Tras la toma de la imagen, se procederá a la medida. Se quiere obtener el desplazamiento de la pletina recubierta, en este caso la P2, respecto a la que se mantendrá en la posición inicial, es decir, la P1, ya que no está recubierta. Para ello, se tomará como referencia la recta paralela a la pletina de referencia (ver Figura 4.31. a) y respecto a ella, se medirá la distancia en tres puntos de la chapa de medida (ver Figura 4.31. b). Se capturará la imagen, y se comparará con la misma situación, pero tras la realización del recubrimiento.



**Figura 4.31.** Pasos a seguir para la medida del desplazamiento de las probetas de medida de tensión. a) recta paralela a la pletina de referencia; b) medida de la distancia

Este procedimiento, se repetirá con cada uno de los límites entre pletinas de cada probeta y tras el recubrimiento se llevará a cabo la misma tarea, teniendo presente que las medidas se deben hacer sobre los mismos puntos.

Debe tenerse en cuenta las siguientes observaciones:

- Es imprescindible tener bien identificada la probeta, para luego comparar los datos obtenidos antes y después del recubrimiento en cada una. Distintas probetas arrojan distintas medidas, de modo que si se mezclan no es válida la medición.
- Es muy importante que los puntos medidos antes y después del recubrimiento sean los mismos. Se sabe que debido al enfoque y luz variable, resulta complicado que estos puntos sean idénticos, ya que requerirían mismo punto de trabajo, que es imposible. Asumiendo este contratiempo, resulta de extrema importancia trazar la línea pasando por los mismos puntos de la probeta de referencia y escoger los mismos puntos para calcular la distancia.
- Tras la medida, colocar inmediatamente en los casquillos correspondientes, y no volver a manipularlos hasta su recubrimiento para evitar alterar la posición de las pletinas. Lo mismo tras el recubrimiento, se debe evitar alterar la posición y se debe medir cuanto antes.

Para el **cálculo del espesor** es necesario tomarlo en la propia pletina de medida, en la zona central de la misma. Conviene realizar al menos dos medidas, en una de las pletinas de los extremos y en otra de las centrales, aunque lo óptimo es trabajar con el espesor de cada una de las pletinas.

Una vez realizadas las dos medidas se debe determinar la diferencia en desplazamientos de las pletinas teniendo en cuenta el signo de cada una de las distancias. El criterio de signos escogido será positivo cuando la pletina se encuentre por encima de la referencia y negativo cuando se encuentre por debajo.

El desplazamiento neto será la diferencia entre la medida antes del recubrimiento y la medida tras el recubrimiento, con este desplazamiento y aplicando la ecuación de Stoney:

$$\sigma = \frac{E_S \cdot h_s^2 \cdot \Delta h}{3 \cdot (1 - \nu) \cdot h_f \cdot L^2}$$

Siendo:  $E_S$ = módulo de elasticidad  
 $h_s$ = espesor del sustrato (0.5 mm)  
 $\Delta h$ = desplazamiento neto de las pletinas  
 $\nu$ = coeficiente de Poisson  
 $h_f$  = espesor del recubrimiento  
 $L$ = longitud de las pletinas

En cada pletina se obtienen ocho valores de tensión, se descartarán aquellos que aporten un valor muy dispar del resto y se tendrá en cuenta que estos valores poseen un error que suele afectar dando valores inferiores, es decir, se dará mayor importancia a los valores altos de tensión.

### 4.3.3. Esfuerzos en el mecanizado

Con la medida del par y la fuerza de avance durante el taladrado, se trata de obtener un valor cualitativo del comportamiento de cada uno de los recubrimientos ensayados y de forma comparativa, teniendo en cuenta la relación de estos esfuerzos con el desgaste. Se sabe, que a mayor desgaste de las herramientas, mayor es la fuerza de avance, mientras que el comportamiento del par generado por el giro de la broca es más aleatorio.

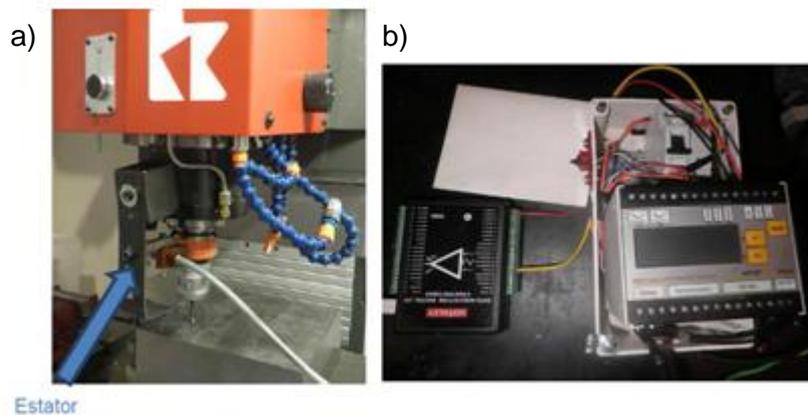
Para realizar este ensayo se han utilizado varios equipos, que son: Centro de mecanizado Kondia A6, Sistema de monitoreo de esfuerzos Artis, Software de recepción de datos QuickData y Software matemático Matlab.

En este caso se utilizó un portaherramientas de doble contacto que actúa como rotor en el monitoreo, con una pinza de amarre de la broca de diámetro 6 mm (ver Figura 4.32). Por último, el conjunto se coloca en el cabezal por medio del accionamiento hidráulico y se comprueba que esté bien fijado.



**Figura 4.32.** Montaje de broca, pinza y portaherramientas Artis

A continuación se realiza el montaje del sistema de monitoreo. Por una parte, se coloca el estator de manera que la distancia al rotor sea inferior a 5 mm (ver Figura 4.33. a) y se procede al cableado del transductor con el PC (ver Figura 4.33. b).



**Figura 4.33.** a) Montaje de estator y rotor del Artis DDU4; b) cableado del transductor del Artis

Antes de empezar con los ensayos, es imprescindible calibrar el sistema Artis, para una buena adquisición de medidas. La escala se escoge de acuerdo con la magnitud de los esfuerzos que se van a medir, en este caso, en ensayos previos se determinó que el valor de las fuerzas oscilaba entre 1000-1600 [N] y el par era menor que 10 [N·m], de modo que los valores de escalas escogidos para este ensayo fueron 2 [kN] y 20 [N·m], que son los valores que permitían un mejor ajuste. En cuanto al valor de la

ganancia se mantiene el establecido por defecto con valor la unidad. Los límites se deben desactivar, y siempre que surja algún problema de saturación se debe comprobar que estén desactivados, de no ser así, sólo se recogerían los datos que se encuentren dentro de los márgenes establecidos por los límites.

Una vez que el sistema de monitoreo de esfuerzos esta colocado y calibrado, se procede a la ejecución del programa CNC en el centro de mecanizado, con el que se realizarán las operaciones de taladrado. Simultáneamente al comienzo de ejecutarse el programa, se activa el sistema de captura de datos, obteniendo al final del proceso las gráficas de la evolución del par y fuerza de avance.

Esta operación se repetirá hasta alcanzar el criterio de parada de la herramienta, es decir, 1000 operaciones o el desgaste excesivo de la misma.

#### **4.3.4. Desgaste de flanco**

Estas pruebas se realizan para tener un valor comparativo del desgaste de flanco sufrido en las brocas y poder determinas cuál de ellas tiene un desgaste mayor o se desgasta más rápidamente.

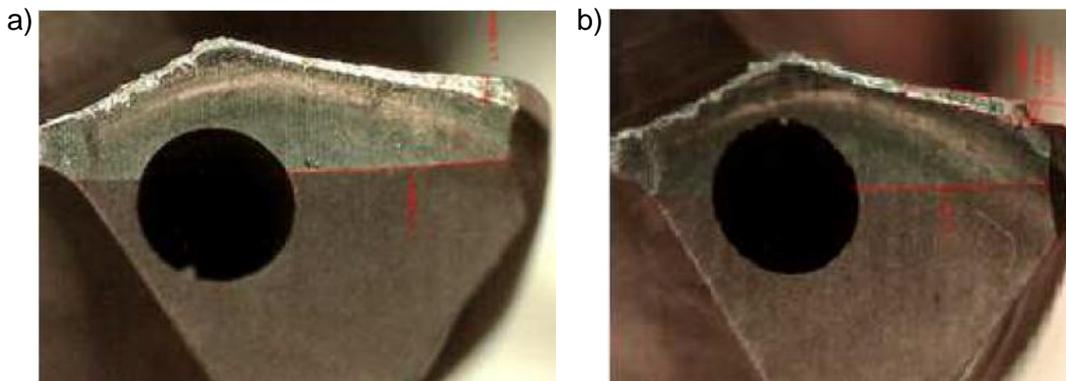
Para realizar este ensayo se han utilizado los siguientes equipos: Cámara de alta resolución, Software de adquisición y tratamiento de datos PCE y Soporte del portaherramientas microset.

Para medir el desgaste de flanco, se debe realizar previamente una fotografía para después medirla con el software de tratamientos de datos PCE. Para ello se colocará la herramienta de tal forma que no se mueva durante la adquisición, la cámara debe enfocar perfectamente la zona a medir (ver Figura 4.34), y además hay que tener en cuenta que no pueden aparecer brillos y que los aumentos sean los adecuados para cada herramienta y medida a tomar, siendo los mismos para cada herramienta, para compensar los posibles errores.



**Figura 4.34.** Posición de la herramienta para la medida con la cámara de alta resolución

Mediante el software de medición se procede a obtener el valor del desgaste, midiendo lo más cerca posible del diámetro exterior, donde el desgaste de flanco es mayor por ir a más velocidad en el taladrado. Mediante la limitación del desgaste se obtiene el valor del mismo (ver Figura 4.35. a). Si se observa que se ha perdido parte del filo (ver Figura 4.35. b), para realizar la medida del desgaste, primero se tiene que trazar una recta que parta de la zona no dañada del filo, y paralela a él, se obtiene el desgaste como la resta de la distancia de un punto a esta recta, menos la distancia desde ese punto hasta el final del desgaste perceptible.



**Figura 4.35.** a) Medida típica del desgaste; b) medida del desgaste con pérdida de filo

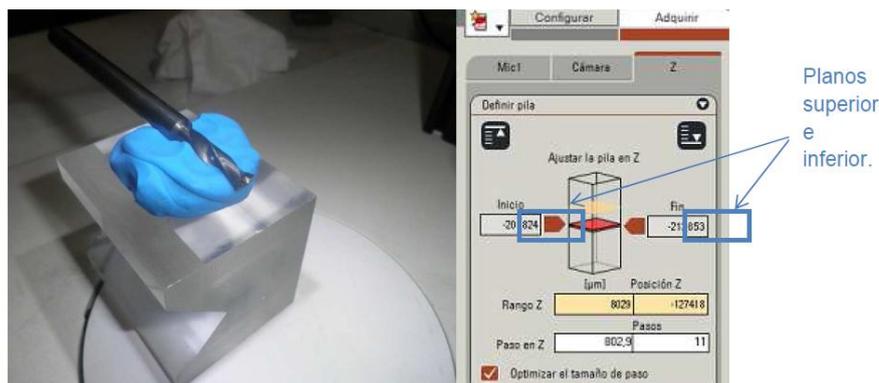
#### **4.3.5. Daño en la superficie de desprendimiento**

El objetivo de este ensayo es evaluar el daño sufrido por las herramientas tras la realización de los ensayos de taladrado. Como se trata de ensayos acelerados, se parte de la idea de que la broca que muestre mayor daño en estas condiciones,

tendría más posibilidades de sufrir la generación de cráteres en esta zona bajo las condiciones de corte habituales.

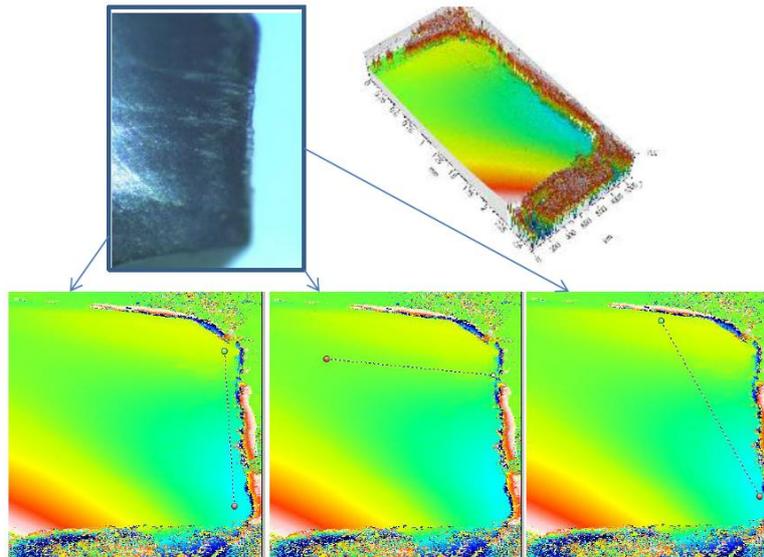
Para la medida de este desgaste o daño, se han utilizado los siguientes equipos: Microscopio confocal 3D Leica, Microscopio óptico multifoco 3D, Sistema de adquisición de datos Leica Application Suite, Sistema de adquisición de datos LeicaScan y Software de tratamiento de datos LeicaMap.

Para obtener una imagen visual de las brocas con los distintos recubrimientos, se han sacado fotos con el microscopio multifoco (ver Figura 4.36) que permite obtener imágenes nítidas incluso cuando la superficie no es lisa, realizando un barrido de planos. A la hora de utilizar este dispositivo, el único factor a tener en cuenta es la luz aportada, que debe ser lo suficiente como para iluminar toda la zona sin crear sombras ni puntos quemados. Además, se tratará que la mayor parte de los puntos a capturar estén en un mismo plano horizontal, con el objetivo de reducir los tiempos y hacer la operación más eficiente.



**Figura 4.36.** Colocación de la broca en el microscopio multifoco

Una vez tomadas las imágenes de las herramientas, para obtener la rugosidad de la superficie, se procede a analizarlas en el microscopio confocal 3D (ver Figura 4.37). Con la realización del perfil, se procede a realizar cortes en varios sentidos para apreciar el daño, y dando prioridad al corte transversal a la zona en la que debería aparecer cráter, en caso de que lo hubiera, para poder apreciar la profundidad y existencia del mismo.



**Figura 4.37.** Cortes realizados al perfil de rugosidad en la cara de desprendimiento de una broca con el microscopio confocal 3D

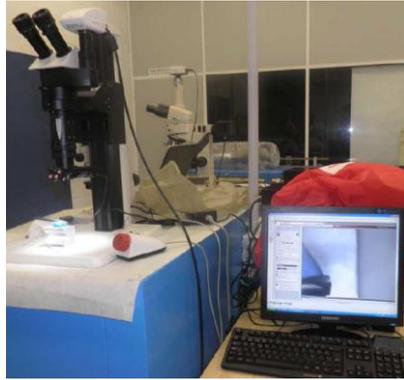
#### 4.3.6. Desgaste de los filos secundarios o diametrales

El valor de este tipo de desgaste tiene mayor importancia a nivel cualitativo, ya que en general solamente se trata de la delaminación del recubrimiento sin llegar a afectar al metal duro de las brocas.

Es importante conocer esto porque se encuentra estrechamente ligado con el acabado superficial de los agujeros, pues el acabado de los filos diametrales de las brocas será el que se reproduzca en las operaciones. Es decir, cuanto mayor delaminación exista peor acabado superficial tendrán los taladros.

En esta prueba únicamente se necesitaron dos equipos: Microscopio óptico multifoco y Microscopio óptico tradicional.

En este caso únicamente hay que colocar la broca bajo el chorro de luz e ir enfocando y moviendo la broca para comprobar si existe algún tipo de delaminación en el filo diametral y en qué grado, aportando la luz necesaria.



**Figura 4.38.** Adquisición de imágenes de los fillos diametrales

### 4.3.7. Microscopia SEM y análisis EDX

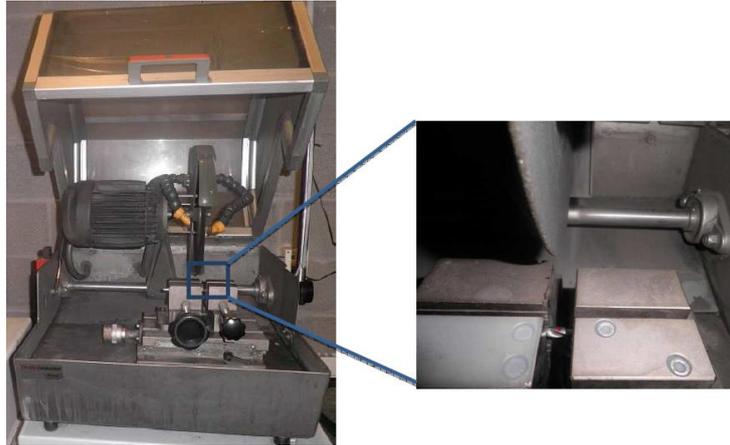
Esta prueba fue realizada en respuesta a la falta de congruencia en algunos resultados obtenidos y con las expectativas de obtener las razones de tales comportamientos, como por ejemplo la falta de cráteres, o el inesperado comportamiento de determinados recubrimientos.

Para la realización de este estudio se necesitan los siguientes equipos: Microscopio electrónico de barrido, Cámara de vacío, PC para la recepción de datos, Cortadora Metalográfica, Máquina de Drag Grinding OTEC, Equipo de limpieza industrial y Equipo de limpieza por ultrasonidos.

Antes de empezar a utilizar el microscopio electrónico, es imprescindible una buena preparación de las muestras a observar. Si las muestras contienen suciedad orgánica, enmascaran información útil.

Primero se deben eliminar los restos que pueda haber de restos o de lubricante, tanto líquido como carbonizado y sólido, introduciéndose para ello en el equipo de limpieza industrial con sosa caustica. Complementariamente, se puede utilizar el equipo OTEC, para eliminar los restos completamente. Al finalizar el proceso, se comprueba en el microscopio óptico, que se haya eliminado la suciedad por completo.

Se debe tener en cuenta el tamaño de la cámara de vacío, que será el que limite el tamaño de las muestras, es decir, en este caso, fue necesario cortar las puntas de las brocas que es lo que mayor información arroja en estos ensayos. Para el corte de las probetas en cortadora metalográfica (ver Figura 4.39), fue necesaria la utilización de un disco especial de corte de metal duro con incrustaciones de diamante, que soportase la dureza sin desgastarse rápidamente.



**Figura 4.39.** Corte metalográfico de las brocas

Una vez realizado el corte en todas las brocas, es necesario volver a limpiarlas, aunque ahora ya no tiene partículas sólidas de lubricante. La limpieza por ultrasonidos es una buena opción ya que es rápida y efectiva. Primero se introducen las muestras en un vaso de precipitados con alcohol al 98%, y este se introduce en la cuba del equipo. Se podría introducir directamente en la cuba, pero se corre el riesgo de perder las muestras al ser tan pequeñas.

Las muestras limpias son transportadas a la Universidad de Leioa, donde se llevaron a cabo las pruebas SEM y EDX. El primer paso es colocar las muestras sobre el apoyo de la cámara de vacío en la posición en que deseen ser medidas. Las muestras se manipulan con guantes para no aportarles residuos orgánicos y para su apoyo y fijación se utiliza cinta adhesiva de grafito. Hay que tener en cuenta que la realización del vacío es la parte que más tiempo requiere, de modo que en la medida de lo posible se tratará de aprovechar al máximo el espacio, introduciendo el mayor número de muestras posibles en cada ciclo. En este caso, se introdujeron 6 muestras a la vez. El siguiente paso es meterlo en la cámara de vacío aproximadamente unos 15 minutos, teniendo especial cuidado en no mover las probetas y orientándolas de manera que se vea la zona a analizar. A continuación, se enciende el microscopio y activa la fuente de electrones, ajustando la cantidad y modo de incidir de estos en la muestra así como el enfoque y los aumentos. En este proyecto, se tomaron imágenes a 100X, 500X y 2000X, es conveniente realizar fotos a distintos aumentos para que partiendo de la visión general, se puedan ir apreciando las zonas que más interesan y los fenómenos que aparecen más en detalle. Además se tomaron imágenes de dos zonas, aunque lo conveniente es sacar las muestras, recolocarlas de modo que la segunda zona a inspeccionar estuviese bien expuesta, y volver a realizar el vacío. Como estos pasos

son más costosos, se aprovecha el giro y movimiento limitado que dispone el microscopio dentro de la cámara, hasta observar la cara de incidencia. De la misma forma que antes, se toman fotos a 100X, 500X y 2000X intentando en todas las ocasiones que las zonas anteriormente medidas de la cara de desprendimiento sean las equivalentes y contiguas a la de incidencia que se están tomando actualmente.

#### 4.4. Ensayos previos: Definición de los parámetros de corte para acelerar el desgaste

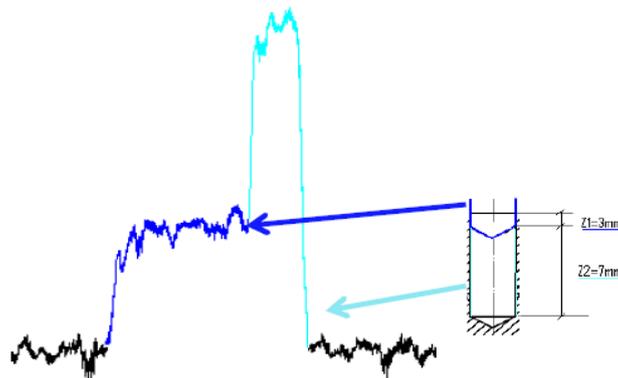
Los ensayos se pueden realizar bajo las condiciones de corte recomendadas por el fabricante de herramientas y material de trabajo. Si se quiere estudiar la influencia de los diferentes recubrimientos, es necesario caracterizar la broca inicialmente, y definir que parámetros de corte son los necesarios para acelerar el desgaste que se quiere estudiar sin llegar a realizar las 6000 operaciones que resisten bajo las condiciones recomendadas.

Los nuevos parámetros se han obtenido de forma experimental a base de prueba y error. En un primer paso se aumentó el avance con respecto a las condiciones recomendadas. Debido a la dureza del material, las brocas se rompían catastróficamente, por lo que se decidió variar la velocidad de corte por encima del valor recomendado, obteniendo los resultados de la Tabla 4.3.

	N (r.p.m.)	f (mm/rev)	Resultado
1	4500	0.17	Rompe
2	4500	0.15	No rompe
3	5000	0.15	Poco desgaste
4	6000	0.15	Poco desgaste
5	6500	0.15	Poco desgaste
6	7000	0.15	Poco desgaste
7	7500	0.15	Bien
8	8000	0.15	Bien
9	8500	0.15	Bien
10	8500	0.16	Demasiado desgaste

Tabla 4.3. Resultados de los ensayos previos

Con relación a estos resultados, se escogió como parámetros de corte los más exigentes sin que se rompiera la herramienta, es decir, un avance de 0.15 mm/rev, y una velocidad de giro de 8500 r.p.m. Tras esta elección, se procedió a una verificación de los parámetros, obteniendo una rotura de broca, lo que llevó a la conclusión de que había que recurrir a un punteado previo con menor velocidad de avance para guiar la herramienta (ver Figura 4.40.). Variando la velocidad de corte, se llegó a la conclusión de que los parámetros de corte iban a ser los mostrados en la Tabla 4.2 (ver punto 4.2.9.).



**Figura 4.40.** Señal de la fuerza registrada en la operación de taladrado con punteado

Como se muestra en la Tabla 4.2, hay dos condiciones para la realización del taladrado de agujeros ciegos de  $\varnothing 5.8$  mm. En ambos casos la perforación de 10 mm es dividida en dos pasos, una entrada lenta de 3 mm de profundidad (pilotaje) y la velocidad normal de taladrado durante los 7 mm de profundidad restantes. La realización en dos pasos elimina los riesgos de rotura de la herramienta a la entrada en el material a taladrar, cuando cualquier desalineamiento o filo defectuosos puede causar esta rotura. Se aplican dos secuencias de taladrado:

- A. **Condiciones de ensayo.** Se eligen altos valores de velocidad de rotación y de avance para acelerar el desgaste de la herramienta en un menor tiempo de ensayo. En otro caso, usando valores más moderados, el número de agujeros requeridos para apreciar el desgaste habría sido excesivo. Incluso aplicando estas condiciones, fueron requeridos más de 1000 agujeros para cada recubrimiento, alargando el ensayo durante varias semanas.
- B. **Condiciones de monitorización.** Al tomar la medida de los esfuerzos durante el taladrado, hay que tener en cuenta el rango del instrumento usado para registrar estos datos, el ARTIS DDU4 en este caso. El sistema ARTIS está basado en un anillo con galgas extensométricas montadas en el

portaherramientas. El uso de una velocidad de giro excesiva es una razón común del fallo de trabajos de investigación, donde no se tiene especial cuidado en la limitación de los instrumentos usados, obteniendo valores que no son del todo fiables. En este caso, se fija una velocidad de giro de 5000 r.p.m. para evitar este problema.

En ambas condiciones, las de ensayo, y las de monitorización, se mantiene constante el avance por revolución, para mantener la sección de viruta constante, que está directamente relacionado con las fuerzas. La velocidad de corte es diferente, pero esta velocidad está más relacionada con la temperatura que con las fuerzas. En la Figura 4.41 se representa la distribución de las dos condiciones de taladrado sobre el material de partida.

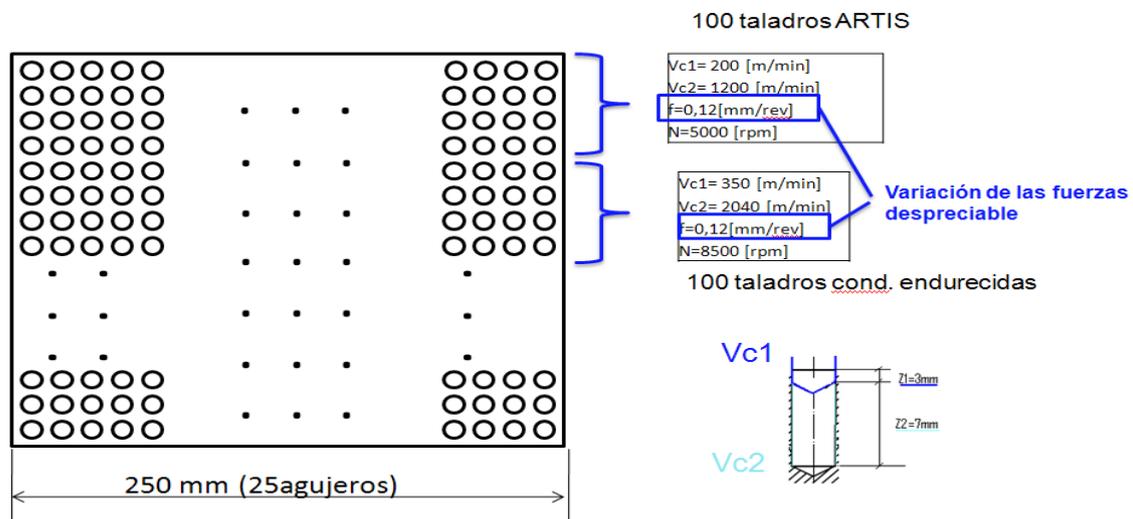


Figura 4.41. Estrategia de mecanizado

#### 4.5. Antecedentes, objeto de la optimización, y descripción de los procesos de fabricación y tareas a realizar

Para determinar los recubrimientos que se deben ensayar en la primera fase, se parte de la información que se tiene acerca de la operación en cuestión, aunque pasando de condiciones genéricas de taladrado a condiciones de alto rendimiento, lo que puede generar diferencias.

Actualmente, en el taladrado de acero con contenido medio en carbono, los recubrimientos utilizados son los siguientes:

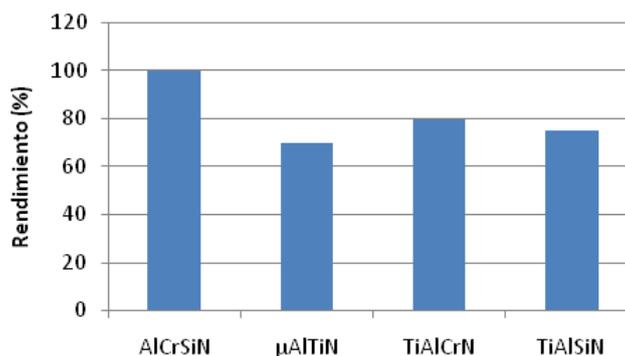
- **AlTiN**, recubrimiento convencional, de gran rendimiento, con un contenido muy elevado en aluminio, que proporciona una elevada resistencia térmica, y está orientado a corte en seco a alta velocidad.
- **μAlTiN**, recubrimiento mejorado respecto al anterior, que también tiene un alto contenido en aluminio, por lo que proporciona una alta resistencia térmica y estabilidad de filo, diferenciándose del anterior en la rugosidad. Esta mejora, facilita la evacuación de la viruta, incrementando sustancialmente la vida de la broca respecto al recubrimiento anterior.
- **AlCrSiN**, recubrimiento nanoestructurado, dotado de una mayor resistencia al desgaste, y una excelente adhesión a la herramienta, proporcionando una mayor durabilidad. Es un recubrimiento óptimo para taladrado, aunque también lo es para otras operaciones, con determinadas características y condiciones.

En la Tabla 4.4 se muestran las propiedades de los recubrimientos utilizados actualmente para el taladrado de aceros con contenido medio de carbono, en condiciones genéricas.

Recubrimiento	Dureza (GPa)	Espesor (μm)	Coefficiente de fricción	T <sup>a</sup> max de uso (°C)
<b>AlTiN</b>	38	1-4	0.70	900
<b>μAlTiN</b>	38	1-4	0.30	900
<b>AlCrSiN</b>	40	1-7	0.35	1100

**Tabla 4.4.** Propiedades de los recubrimientos utilizados actualmente en taladrado

Por otra parte, en la Figura 4.42 se presentan los datos de estudios anteriores, del rendimiento de distintos recubrimientos sobre el material 16CrMn5, que presenta unas características tribológicas similares al material de ensayo que se usa en el presente trabajo experimental.



**Figura 4.42.** Rendimiento para distintos recubrimientos sobre el acero 16CrMn5

Con estos datos hay que tener en cuenta dos aspectos. El primero de ellos es la diferencia en el material; pese a que ambos poseen similares propiedades no son los mismos, y su comportamiento frente al mecanizado es imprevisible, pudiendo pasar de un desgaste predominantemente abrasivo a uno térmico o de cualquier otro tipo. El segundo factor a tener en cuenta son los parámetros de corte. En el presente caso, los ensayos son acelerados de modo que se pasa de las 6000 operaciones previstas hasta fin de vida de la herramienta bajo condiciones de corte recomendadas, a 1000 operaciones bajo condiciones de ensayo. Esto también puede influir en el desgaste de una manera poco conocida; en este caso sólo se han tenido en cuenta extrapolaciones cualitativas a nivel abrasivo, ya que las consideraciones térmicas o químicas no siguen ningún patrón conocido ni a nivel cualitativo ni cuantitativo.

El objeto es conseguir una herramienta recubierta con la que se consigan reducir tiempos de proceso y por lo tanto cuellos de botella, optimizando la vida de la herramienta. Además se intentan conseguir otras mejoras, como son:

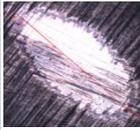
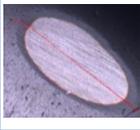
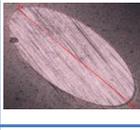
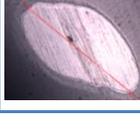
- Conseguir un desgaste uniforme y gradual de la broca, permitiendo un mayor aprovechamiento de la herramienta y por lo tanto, reducir costes.
- Aumentar el número de operaciones que son posibles realizar con una broca antes de su desgaste total.
- Conseguir un mejor acabado superficial de los agujeros taladrados mediante el uso de componentes que actúan como lubricantes, o también actuando sobre la mejora de la rugosidad de estos.

Para determinar la composición del nuevo recubrimiento, en la primera fase se caracterizan los recubrimientos habituales para operaciones similares, evaluando a prueba y error su comportamiento.

En la segunda fase, bajo las mismas condiciones de corte, se intenta optimizar los procesos de recubrimiento y/o crear un nuevo recubrimiento mejorando a los recubrimientos que han obtenido mejores resultados en la primera fase, optimizando el desgaste y/o tiempo en operación. Tras un análisis y evaluación de los resultados (prueba-error), se puede ir a una tercera fase, y así sucesivamente, buscando la optimización del proceso de recubrimiento (ver punto 4.1).

## 4.6. Resultados experimentales y observaciones Fase I

Esta primera fase consiste en el ensayo de seis recubrimientos diferentes sobre la misma herramienta (ver Tabla 4.5). Tras realizar el recubrimiento de las brocas y realizar el ensayo de taladrado en el centro de mecanizado, se procede a estudiar su comportamiento y a obtener los diferentes resultados experimentales.

	Recubrimiento	Espesor (µm)	Microestructura	T <sup>a</sup> (°C)	Dureza (GPa)	Coef. Fric.	Imagen calotest	Post-tratamiento
<b>Fase I</b>	AlCrSiN	2.5	Nanoestructurado	1000	42	0.35		Drag grinding
	µAlTiN	3	Monocapa	900	38	0.3		Drag grinding
	TiAlCrN	2	Nanocapa	850	40	0.55		Drag grinding
	AlTiCrN	4	Nanocapa	850	34	-		Drag grinding
	TiAlSiN	3	Nanoestructurado y multicapa	1200	45	-		Drag grinding
	AlCrN	4	Monocapa	1100	33	-		Drag grinding

**Tabla 4.5.** Propiedades de los recubrimientos aplicados a la broca, en la Fase I

Todos los recubrimientos se ensayaron dos veces, para realizar la verificación de los resultados. En caso de que hubiera una discrepancia de más del 10% entre ambos ensayos, se recurre a un tercer ensayo.

### 4.6.1. AlCrSiN

Recubrimiento nanoestructurado (capa de adhesión de cromo + capa nanocomposite) y ultraduro, dotado de una excelente resistencia al desgaste y adhesión a la herramienta. Posee también una dureza muy elevada de 42 GPa, y a pesar del alto

valor de tensiones internas, su buena adhesión natural le permite espesores de capa relativamente elevados, hasta las 7  $\mu\text{m}$ , aunque en este caso es de 2.5  $\mu\text{m}$ .

El silicio y el aluminio le aportan buenas propiedades mecánicas y térmicas, permitiéndole trabajar bien hasta los 1100°C, y el cromo le proporciona una gran resistencia a la corrosión. Además, tiene un bajo coeficiente de fricción de 0.35, que le permite trabajar sin desgaste abrasivo prematuro.

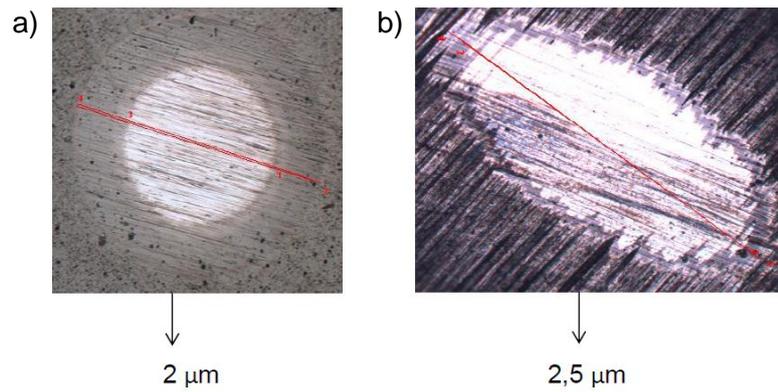
El mayor inconveniente de este recubrimiento es la alta rugosidad que presenta y que le hace menos adecuado para trabajos con materiales especialmente duros. Está realizado en el equipo  $\pi 80$ , con tecnología rotativa LARC, con un post-tratamiento de diez minutos en la máquina de acabado con cáscara de nuez y partículas de alúmina (drag grinding).

Durante el ensayo, la broca recubierta con AlCrSiN presentó problemas, rompiéndose al introducir la broca en el material de trabajo. Para estudiar el comportamiento de este recubrimiento se procedió a realizar los ensayos con brocas de similar geometría pero que habían sufrido varios procesos de decapaje, por lo que la rugosidad se ve reducida, permitiendo la entrada de la herramienta en el acero. Con esta broca similar, se quiere observar el comportamiento de este recubrimiento, sin poder compararse con el resto.

Su comportamiento en general no fue malo, sin presentar especiales daños en la zona de desprendimiento y con un ligero aumento de la fuerza de avance ( $\Delta F = 180 \text{ N}$  y  $F_{\text{máx.}} = 1450 \text{ N}$ ), lo que indica un desgaste progresivo pero no excesivo.

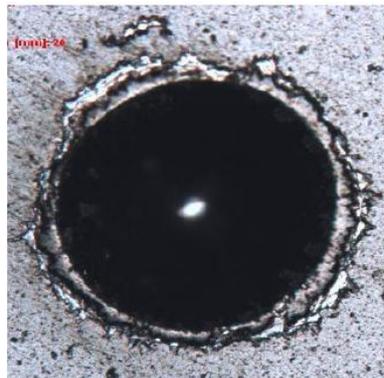
#### **4.6.1.1. Espesor, adhesión y rugosidad**

En la Figura 4.43 se muestran las imágenes del ensayo calotest para determinar el espesor del recubrimiento, tanto en la probeta (2  $\mu\text{m}$ ), como en la broca (2.5  $\mu\text{m}$ ) en la que se ha realizado el recubrimiento. Aunque la estructura del recubrimiento se aprecia mejor en la muesca realizada en la probeta, el valor del espesor obtenido en la broca es más exacto. El valor del espesor obtenido en la broca es superior debido al factor tamaño, que hace que el espesor aumente en las zonas de menor tamaño.



**Figura 4.43.** Imágenes del calotest del recubrimiento AlCrSiN: a) sobre probeta; b) sobre broca

En la Figura 4.44 se observa la huella obtenida tras el ensayo Rockwell C. Observando esta imagen, se aprecia que no hay demasiadas fisuras, por lo que se puede decir que la adhesión es adecuada.



**Figura 4.44.** Imagen del ensayo Rockwell C del recubrimiento AlCrSiN

Por último, el valor de la rugosidad obtenido es de 0.1 μm.

#### 4.6.1.2. Esfuerzos

En la Tabla 4.6 se muestran los valores de la evolución de la fuerza máxima y del par máximo a medida que se iban realizando los agujeros con las brocas recubiertas con AlCrSiN. En el taladrado con herramientas recubiertas con AlCrSiN, la fuerza máxima que se alcanza es de 1450 N, y un incremento de fuerza,  $\Delta F$  de 180 N. En la Figura 4.45 se representa gráficamente la fuerza y el par máximos alcanzados durante el taladrado de los diferentes agujeros.

Nº Agujero	F máx. (N)	Par (N·m)	Nº Agujero	F máx. (N)	Par (N·m)	Nº Agujero	F máx. (N)	Par (N·m)
1	1159.44	4.98	220	1230.93	4.08	436	1202.84	4.78
5	1268.36	4.92	225	1251.93	4.88	440	1200.30	4.16
10	1176.62	4.55	230	1237.14	4.88	442	1247.62	4.17
13	1167.04	4.87	234	1237.12	4.67	450	1163.07	4.29
20	1161.99	4.70	236	1238.84	4.51	457	1257.66	4.79
25	1176.67	4.94	240	1236.04	5.07	460	1276.07	4.88
30	1131.16	4.55	242	1227.32	4.78	462	1244.17	4.37
34	1146.74	4.68	250	1303.82	4.99	467	1249.41	4.83
36	1121.40	5.54	257	1243.28	4.70	475	1267.99	5.02
40	1191.88	5.04	260	1317.71	4.91	479	1306.09	4.39
42	1165.97	4.54	262	1244.17	5.06	482	1258.01	4.61
50	1260.41	4.58	267	1296.68	5.16	486	1285.88	4.63
57	1182.51	4.97	275	1268.52	5.00	494	1324.24	4.36
60	1154.74	5.01	279	1276.04	5.16	500	1298.98	4.52
62	1180.72	4.47	282	1239.38	4.76	601	1320.01	4.52
67	1200.93	4.86	286	1284.93	4.67	605	1382.13	4.72
75	1208.43	4.65	294	1206.06	4.37	610	1405.02	5.44
79	1167.38	4.52	300	1211.88	4.14	613	1412.38	5.25
82	1247.52	4.92	401	1208.55	4.89	620	1407.04	5.19
86	1183.65	4.89	405	1257.24	4.84	625	1415.97	5.29
94	1262.78	4.84	410	1212.27	4.61	630	1443.59	5.45
100	1202.21	4.61	413	1220.65	4.62	634	1571.74	5.03
201	1167.80	4.62	420	1222.58	4.88	636	1568.57	5.18
205	1217.01	4.88	425	1230.75	5.11	640	1555.56	4.61
210	1241.09	5.11	430	1212.16	4.54	642	1672.11	4.82
213	1194.67	4.95	434	1257.07	5.04			

Tabla 4.6. Valores de la evolución de la fuerza máxima y par máximo a medida que se realizan taladros con la broca recubierta con AlCrSiN

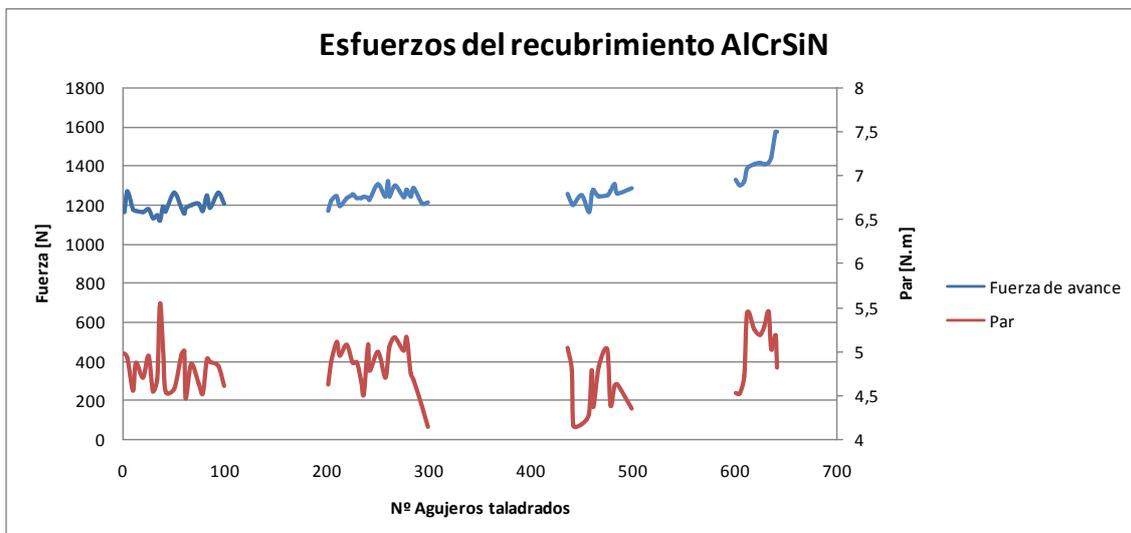
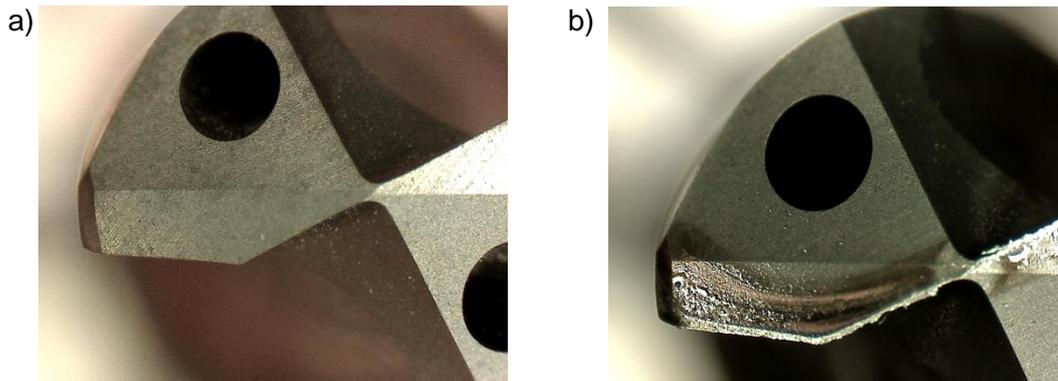


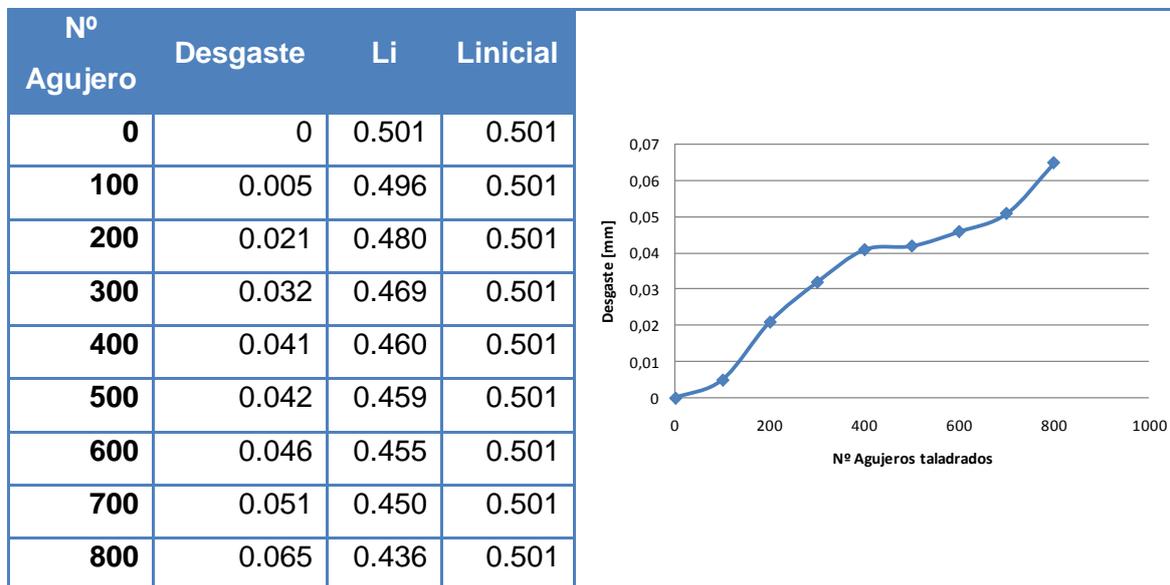
Figura 4.45. Evolución de los esfuerzos de la broca recubierta con AlCrSiN

#### 4.6.1.3. Desgaste de flanco

En la Figura 4.46 se muestra el estado de los filos de corte de dos brocas tras la realización de los ensayos. En la Tabla 4.7, se muestran los valores de desgaste obtenidos según el número de agujeros que se iban realizando. En esta tabla,  $L$  inicial es la longitud de un punto al extremo, y  $L_i$  es la longitud en cada momento del mismo punto al punto en el que empieza el desgaste de flanco, siendo el valor de este, la diferencia entre ambas longitudes.



**Figura 4.46.** Imagen de la cámara de alta resolución del filo de las brocas recubiertas con AICrSiN en las que se medirá el desgaste de flanco: a) al inicio; b) al final de su vida útil



**Tabla 4.7.** Desgaste de flanco de la broca recubierta con AICrSiN

#### 4.6.1.4. Microscopía SEM y análisis EDX

El análisis de las brocas con microscopía óptica de barrido tiene por objeto percibir fenómenos inapreciables en el resto de ensayos. En este caso, se trata de encontrar

indicios que permitan confirmar si hay un calentamiento excesivo, y por otra parte, buscar la explicación de la ausencia de cráteres, además de mejorar la observación de la adhesión y el salto en la desaparición de los recubrimientos.

Analizando la broca con el microscopio SEM, se obtienen las imágenes que se pueden ver en la Figura 4.47 y Figura 4.48. En ellas se pueden apreciar los siguientes fenómenos especiales:

- Adhesión de lubricante en fase sólida en la zona de desprendimiento donde deberían aparecer cráteres.
- Gran salto del recubrimiento que se elimina de manera brusca, no gradual.
- Poca adhesión y defectos en el recubrimiento.

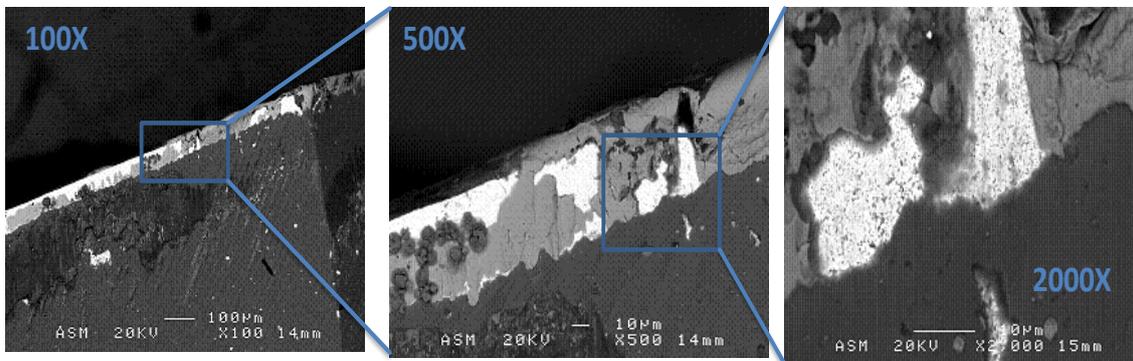


Figura 4.47. Imagen SEM de la zona de desprendimiento del recubrimiento AlCrSiN

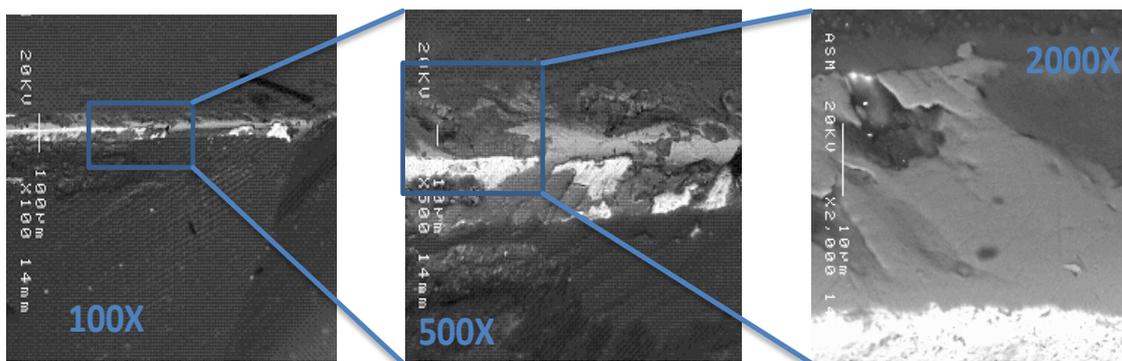
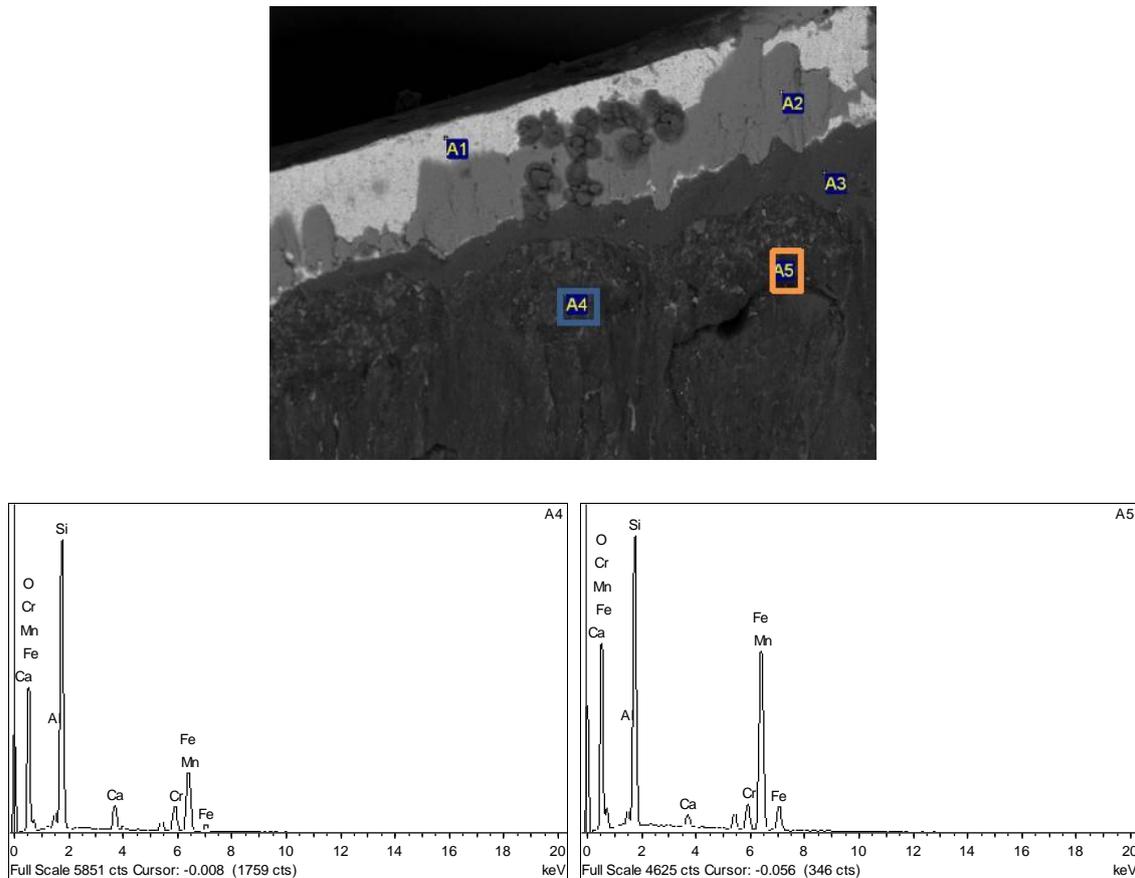


Figura 4.48. Imagen SEM de la zona de incidencia del AlCrSiN

La ausencia de cráteres cuando eran de esperar, puede ser debido a la existencia de lubricante solidificado en la zona de desprendimiento. Al tener lubricante adherido en esta zona, la viruta desliza con facilidad sobre él, evitando la formación de cráteres en

la herramienta. Para comprobar esta hipótesis se procede a realizar un análisis EDX de la zona de desprendimiento (ver Figura 4.49).



**Figura 4.49.** Composición EDX de la masa apreciada en la zona de desprendimiento

De la masa estudiada se aprecian elementos del material de trabajo (Cr, Mn, Fe...), parte del recubrimiento (Al, Si, Cr...) y lubricante (Ca, Mn, Si...). Hay que destacar que en un análisis EDX sólo aparecen los elementos no orgánicos, a ello se debe la ausencia de carbono en los resultados. De los elementos que se obtienen del análisis, el Ca sólo puede ser atribuido a la taladrina, siendo indudable que esta masa tiene propiedades lubricantes explicando la ausencia de los cráteres y facilitando la evacuación de la viruta.

#### 4.6.2. $\mu$ AlTiN

Se enmarca dentro de los recubrimientos monocapa avanzados debido al alto rendimiento que ofrece. Tiene un contenido en aluminio extraordinariamente alto. Mediante la adición de aluminio se logra que, a altas temperaturas (corte en seco) el

nitrógeno de la mezcla sea reemplazado por oxígeno, produciéndose óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) a nivel superficial. El  $\text{Al}_2\text{O}_3$  es refractario y extremadamente duro, propiedades que incrementan significativamente el rendimiento de los filos de corte y le permiten trabajar en seco o con MQL. Por lo tanto, la adición del aluminio le proporciona mayor tenacidad, resistencia a la corrosión y buena evacuación del calor, permitiéndole trabajar perfectamente hasta los  $900^\circ\text{C}$ .

Cuenta con una mínima rugosidad, que se traduce en un coeficiente de fricción de 0.3 y una dureza de 38 GPa. Su bajo nivel de tensiones residuales le permite la deposición en capas de espesores entre 2-6  $\mu\text{m}$ , aunque en este caso es de 3  $\mu\text{m}$ .

Puede aumentar la dureza original de CW-Co hasta un 20%, mejorando su comportamiento frente al desgaste. Proporciona una elevada estabilidad a los filos, siendo especialmente indicado para las operaciones de escariado de precisión y roscado. Está realizado en el equipo PL-1001, con un post-tratamiento de diez minutos (Drag grinding).

Este recubrimiento tuvo un comportamiento especialmente bueno, con unas magnitudes de fuerza relativamente bajas y un ligero aumento de la fuerza ( $F_{\text{máx.}} = 1240\text{N}$  y  $\Delta F = 150\text{N}$ ), lo que indica un desgaste ligero y gradual, como se comprobó en los resultados de desgaste de flanco.

Además, es de los recubrimientos que menos daño tuvo en la zona de desprendimiento tras la realización de los ensayos. La evolución en la rotura de la viruta también fue buena, sin atascamiento de la misma ni al final de los ensayos, como en el caso del  $\text{AlCrSiN}$  y  $\text{TiAlSiN}$ .

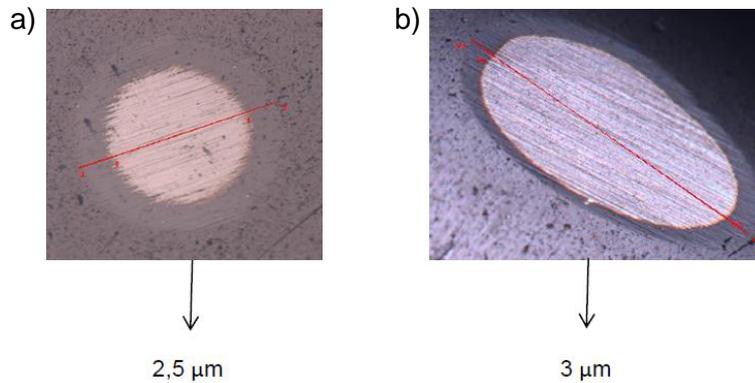
El único problema que muestra este recubrimiento es la delaminación en los filos secundarios al aumentar el número de taladros realizados.



**Figura 4.50.** Pérdida de recubrimiento en los filos secundarios al aumentar el número de taladros realizados

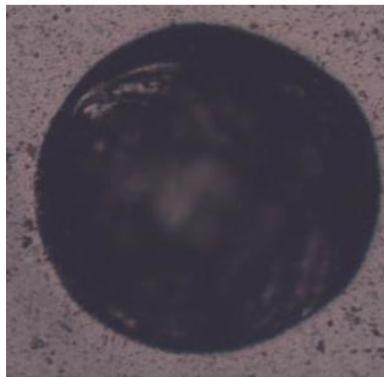
#### 4.6.2.1. Espesor, adhesión y rugosidad

Midiendo las huellas de la Figura 4.51 originadas por el ensayo de calotest, se obtiene un espesor de recubrimiento de  $2.5 \mu\text{m}$  al realizarlo sobre la probeta, y un espesor de  $3 \mu\text{m}$  si se realiza sobre la broca.



**Figura 4.51.** Imágenes del calotest del recubrimiento  $\mu\text{AlTiN}$ : a) sobre probeta; b) sobre broca

Analizando el resultado del ensayo Rockwell C (ver Figura 4.52), no se observa ninguna fisura en el contorno de marca del indentador, interpretando como resultado final que la adhesión de este recubrimiento es idónea.



**Figura 4.52.** Imagen Rockwell C del  $\mu\text{AlTiN}$

En cuanto al valor de la rugosidad del recubrimiento se obtuvo un valor de  $0.05 \mu\text{m}$ .

#### 4.6.2.2. Esfuerzos

A continuación se muestra la evolución de los valores de la fuerza de avance máxima y de par máximo que sufre la broca cuando taladrada a medida que va realizando agujeros (ver Tabla 4.8). Para este recubrimiento destaca un valor de fuerza máxima

de 1240 N, y un aumento de la fuerza de 150 N, que son unas magnitudes relativamente bajas. Además, en la Figura 4.53 se muestra una representación gráfica de dicha tabla.

Nº Agujero	F máx. (N)	Par (N·m)	Nº Agujero	F máx. (N)	Par (N·m)	Nº Agujero	F máx. (N)	Par (N·m)
1	1057.79	3.58	236	1173.53	3.55	475	1211.87	4.94
5	1105.23	3.57	240	1171.73	4.08	479	1222.95	4.26
10	1105.57	4.81	242	1162.53	3.87	482	1210.81	3.79
13	1108.93	3.95	250	1178.73	3.87	486	1211.67	4.07
20	1110.62	4.00	257	1199.57	3.65	494	1228.54	3.89
25	1118.82	4.07	260	1202.92	3.69	500	1247.07	3.98
30	1119.49	4.35	262	1232.08	3.58	601	1198.53	3.89
34	1095.82	4.35	267	1191.19	3.75	605	1185.29	4.42
36	1151.11	4.35	275	1186.87	3.58	610	1203.01	3.90
40	1194.54	4.15	279	1197.95	3.73	613	1206.26	4.53
42	1140.02	4.15	282	1185.81	3.73	620	1250.74	4.20
50	1232.34	4.15	286	1186.68	3.99	625	1256.52	4.29
57	1212.25	4.10	294	1203.54	4.06	630	1211.69	4.29
60	1162.78	4.10	300	1222.07	3.67	634	1205.96	3.88
62	1184.91	4.90	401	1250.36	3.87	636	1219.41	4.84
67	1151.15	4.90	405	1194.97	3.87	640	1217.45	3.81
75	1177.68	4.64	410	1241.10	3.62	642	1249.58	4.13
79	1311.16	4.64	413	1232.35	3.80	650	1225.19	4.07
82	1177.29	4.64	420	1216.57	3.60	657	1170.85	3.56
86	1148.19	3.73	425	1277.65	3.60	660	1180.88	3.56
94	1143.13	4.26	430	1368.89	3.64	662	1203.31	3.56
100	1138.56	5.62	434	1178.33	3.64	667	1195.27	3.63
201	1179.62	3.78	436	1167.96	3.42	675	1201.74	3.43
205	1161.91	3.78	440	1187.58	4.06	679	1190.39	3.77
210	1124.01	3.54	442	1189.17	3.74	682	1214.20	3.77
213	1126.32	3.51	450	1203.82	3.73	686	1169.07	3.99
220	1161.22	3.51	457	1207.13	3.73	694	1176.24	3.99
225	1154.03	3.51	460	1223.13	3.73	700	1190.24	3.91
230	1157.64	3.55	462	1257.07	4.19	801	1170.62	3.91
234	1167.81	3.55	467	1216.19	4.94	805	1244.86	3.82
						810	1207.92	4.17

**Tabla 4.8.** Valores de la evolución de la fuerza máxima y del par a medida que se realizan taladros con la broca recubierta con  $\mu$ AlTiN

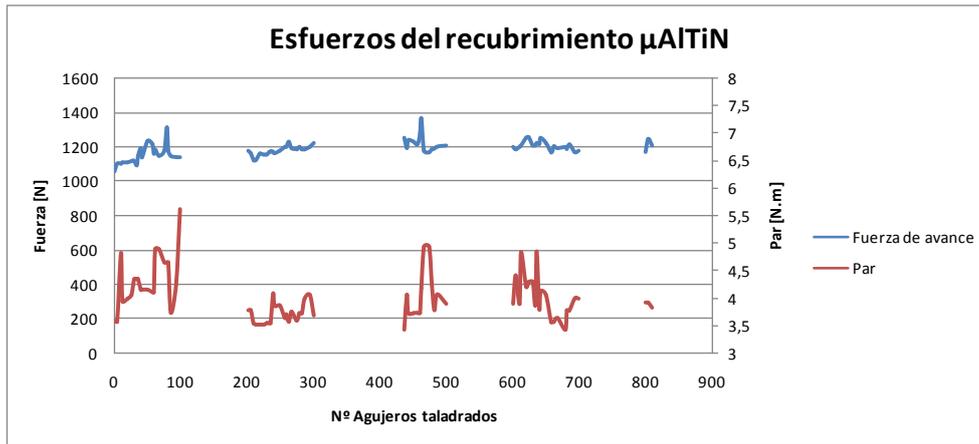


Figura 4.53. Evolución de los esfuerzos de la broca recubierta con  $\mu\text{AlTiN}$

#### 4.6.2.3. Desgaste de flanco

Estudiando el desgaste de flanco de la herramienta recubierta con  $\mu\text{AlTiN}$  (ver Figura 4.54), a medida que se van realizando taladros, se observa un desgaste ligero y gradual, hasta alcanzar un valor de desgaste máximo de 0.055 mm (ver Tabla 4.9).

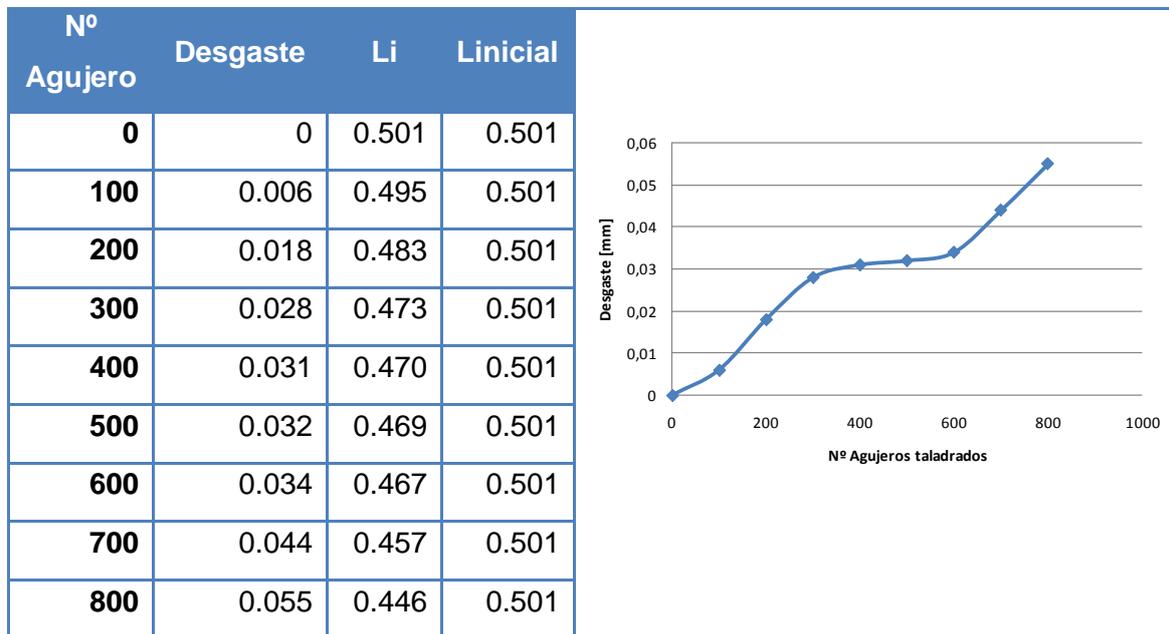


Tabla 4.9. Valores obtenidos para el desgaste de flanco del recubrimiento  $\mu\text{AlTiN}$

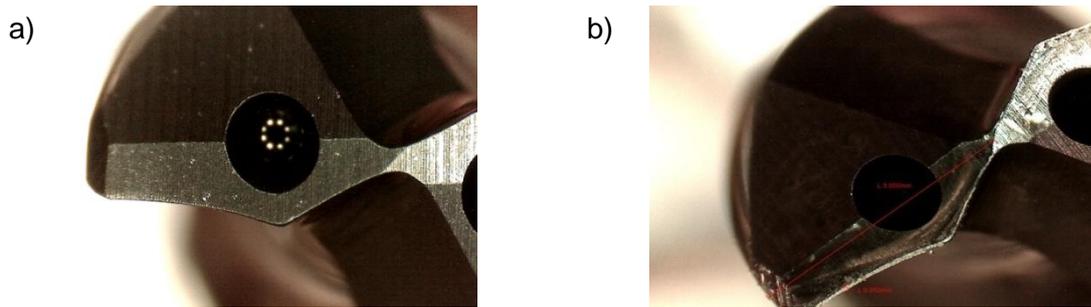


Figura 4.54. Filo principal: a) broca nueva; b) broca desgastada

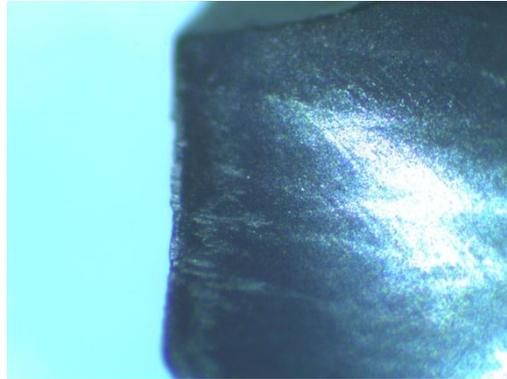
#### 4.6.2.4. Daño en la superficie de desprendimiento

En la Tabla 4.10, se muestra la topografía de la superficie de desprendimiento de la broca analizada. En ella se han obtenido diferentes perfiles de rugosidad en direcciones diferentes de esta superficie.

	<p>Perfil ondulación, Filtro gaussiano, cut-off 0.250000 mm</p>	<p><b>Ra</b> 1.59 µm</p> <p><b>Rz</b> 10.92 µm</p> <p><b>Rt</b> 19.98 µm</p>
	<p>Perfil ondulación, Filtro gaussiano, cut-off 250.000 µm</p>	<p><b>Ra</b> 0.58 µm</p> <p><b>Rz</b> 2.83 µm</p> <p><b>Rt</b> 7.63 µm</p>
	<p>Perfil ondulación, Filtro gaussiano, cut-off 0.250000 mm</p>	<p><b>Ra</b> 1.11 µm</p> <p><b>Rz</b> 5.96 µm</p> <p><b>Rt</b> 11.79 µm</p>

Tabla 4.10. Diferentes perfiles de rugosidad de la superficie de desprendimiento

En este recubrimiento no se observa ningún cráter ni daño excesivo en la superficie de desprendimiento. En la Figura 4.55 se observa una imagen de esta superficie, en la que se observan unos pequeños rasguños que sólo son perceptibles con grandes aumentos (20X).

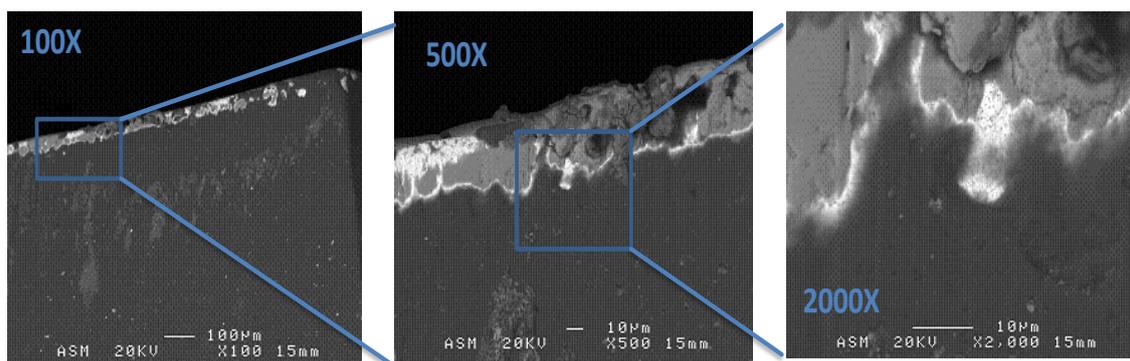


**Figura 4.55.** Superficie de desprendimiento de la broca recubierta con  $\mu$ AlTiN

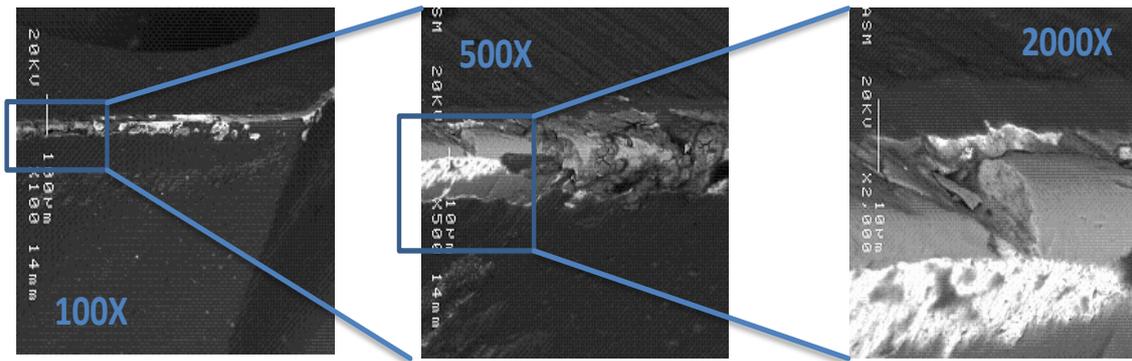
#### 4.6.2.5. Microscopia SEM y análisis EDX

Analizando la superficie de desprendimiento mediante el microscopio SEM (ver Figura 4.56 y Figura 4.57), se pueden distinguir los siguientes fenómenos especiales:

- Adhesión de lubricante en fase sólida en la zona de desprendimiento.
- Poco salto del recubrimiento, que se elimina de forma gradual.
- Poca adhesión de acero y poco descascarillamiento del recubrimiento, existiendo zonas aún con recubrimiento.



**Figura 4.56.** Imágenes SEM de la zona de desprendimiento del  $\mu$ AlTiN



**Figura 4.57.** Imágenes SEM de la superficie de incidencia del  $\mu\text{AlTiN}$

### 4.6.3. $\text{TiAlCrN}$

Este recubrimiento nanocapa cuenta con la alta resistencia a la oxidación y a la corrosión que le proporciona el cromo, y con buenas propiedades mecánicas aportadas por el titanio. Además, el titanio es capaz de formar aleaciones con otros compuestos que permiten una mejora extra de la resistencia. Posee un buen comportamiento general pero la estabilidad e inercia química son menores que en otros recubrimientos como el  $\mu\text{AlTiN}$  o el  $\text{TiAlSiN}$ .

A igual que en muchos recubrimientos, se deposita sobre una capa de titanio para mejorar la adhesión. En este caso la adhesión es especialmente buena por contar también con la presencia de cromo, otro agente que mejora la adhesión.

Posee una dureza de 34 GPa y tiene un coeficiente de fricción más elevado que los anteriores, de 0.55, la temperatura máxima de trabajo es de  $900^{\circ}\text{C}$  y permite capas de hasta 4  $\mu\text{m}$ . Está realizado en el equipo PL-1001, con post-tratamiento de diez minutos (Drag grinding).

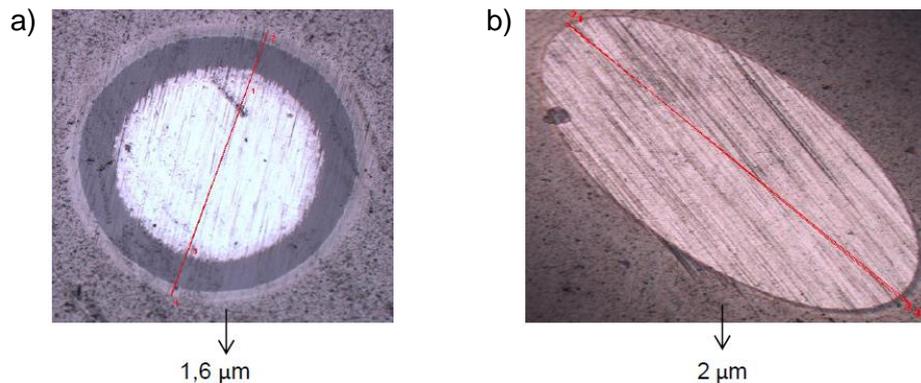
El comportamiento de este recubrimiento no fue especialmente bueno, ya que el valor de las fuerzas, tanto en magnitud ( $F_{\text{máx.}} = 1450 \text{ N}$ ) como en incremento ( $\Delta F = 220 \text{ N}$ ), son superiores a los casos anteriores, indicando un mayor desgaste. Se obtiene un desgaste de flanco máximo,  $V_{\text{bmax}}$  de 0.067 mm, superior a los casos anteriores.

El daño en la zona de desprendimiento, también es superior a otros casos, aunque no es excesivo, y no se llega a formar ningún cráter. Existe una adhesión del material sobre el filo de la herramienta, lo que provoca una elevación de la temperatura y aceleración del desgaste durante el taladrado. También se nota una creciente

tendencia al atascamiento de la viruta en la broca a medida que se van realizando agujeros.

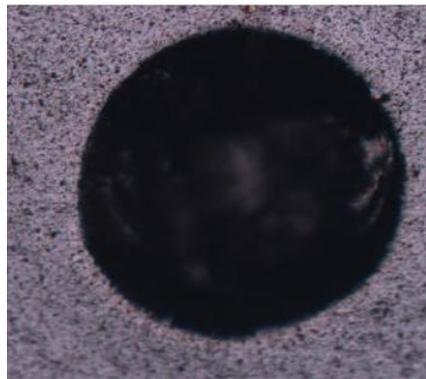
#### 4.6.3.1. Espesor, adhesión y rugosidad

Realizando el ensayo del calotest sobre el recubrimiento TiAlCrN, se obtiene un espesor de  $1.6\ \mu\text{m}$  en la probeta, y  $2\ \mu\text{m}$  en la herramienta (ver Figura 4.58), siendo el valor obtenido sobre la broca el más exacto.



**Figura 4.58.** Imágenes del calotest del recubrimiento TiAlCrN: a) sobre probeta; b) sobre broca

Así mismo, se realiza el ensayo Rockwell C para comprobar la adhesión del recubrimiento (ver Figura 4.59). Como se puede comprobar en la imagen obtenida de este ensayo, no se aprecia ninguna fisura, por lo que se da una adhesión idónea.



**Figura 4.59.** Imagen del ensayo Rockwell C del recubrimiento TiAlCrN

Por último, el valor de la rugosidad obtenida es de  $0.08\ \mu\text{m}$ .

#### 4.6.3.2. Esfuerzos

A continuación se muestra la evolución de los valores de la fuerza de avance máxima y de par máximo que sufre la broca cuando taladrada a medida que va realizando agujeros (ver Tabla 4.11). Para este recubrimiento destaca un valor de fuerza máxima de 1450 N, y un aumento de la fuerza de 220 N, que son unas magnitudes relativamente bajas. Además, en la Figura 4.60 se muestra una representación gráfica de dicha tabla.

Nº Agujero	F máx. (N)	Par (N·m)	Nº Agujero	F máx. (N)	Par (N·m)	Nº Agujero	F máx. (N)	Par (N·m)
1	1267.16	4.57	236	1179.04	4.76	475	1349.47	4.51
5	1186.99	4.44	240	1137.97	4.84	479	1321.71	4.87
10	1189.33	4.56	242	1165.79	4.44	482	1341.55	5.14
13	1174.60	4.38	250	1198.77	4.46	486	1344.00	4.80
20	1168.17	4.65	257	1202.71	4.58	494	1355.00	4.70
25	1193.80	4.53	260	1242.09	4.92	500	1321.00	4.90
30	1246.57	4.99	262	1282.86	5.25	601	1341.00	4.67
34	1196.16	5.22	267	1216.05	5.11	605	1341.39	4.55
36	1174.04	4.75	275	1234.00	5.00	610	1363.36	5.60
40	1132.97	4.83	279	1250.00	4.80	613	1377.91	4.57
42	1160.79	4.44	282	1269.00	4.80	620	1375.78	4.75
50	1193.77	4.45	286	1201.17	4.38	625	1394.91	4.37
57	1197.71	4.57	294	1243.11	4.59	630	1404.63	4.93
60	1237.09	4.91	300	1276.09	4.61	634	1401.51	4.91
62	1277.86	5.25	401	1250.33	4.77	636	1420.00	4.60
67	1211.05	5.11	405	1314.04	5.24	640	1399.00	4.60
75	1229.00	4.99	410	1254.87	4.48	642	1405.00	4.80
79	1245.00	4.80	413	1239.56	5.08	650	1407.00	4.90
82	1264.00	4.80	420	1262.33	4.74	657	1401.51	4.50
86	1196.17	4.80	425	1237.46	4.82	660	1420.00	4.58
94	1238.11	4.58	430	1238.00	4.82	662	1399.00	4.89
100	1271.09	4.61	434	1240.00	4.82	667	1405.00	4.27
201	1272.16	4.58	436	1279.00	4.82	675	1407.00	4.24
205	1191.99	4.44	440	1233.00	4.82	679	1396.00	4.18
210	1194.33	4.7	442	1231.00	4.70	682	1399.06	4.34
213	1179.60	4.39	450	1237.03	4.63	686	1501.61	4.71
220	1173.17	4.65	457	1230.90	4.51	694	1426.29	4.73
225	1198.80	4.43	460	1278.65	4.61	700	1390.47	4.75
230	1251.56	5.00	462	1275.55	4.73	801	1388.08	4.77
234	1201.16	5.23	467	1322.77	4.63	805	1362.78	4.79
						810	1400.39	4.81

**Tabla 4.11.** Valores de la evolución de la fuerza máxima y del par a medida que se realizan taladros con la broca recubierta con TiAlCrN

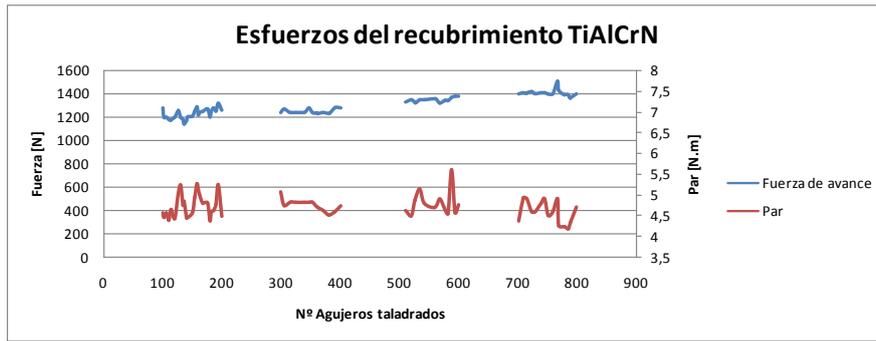


Figura 4.60. Evolución de los esfuerzos de la broca recubierta con TiAlCrN

#### 4.6.3.3. Desgaste de flanco

En la Tabla 4.12, se pueden observar los valores del desgaste a medida que avanza el número de agujeros que se realizan. Con este recubrimiento se obtiene un desgaste de flanco máximo de 0.067 mm.

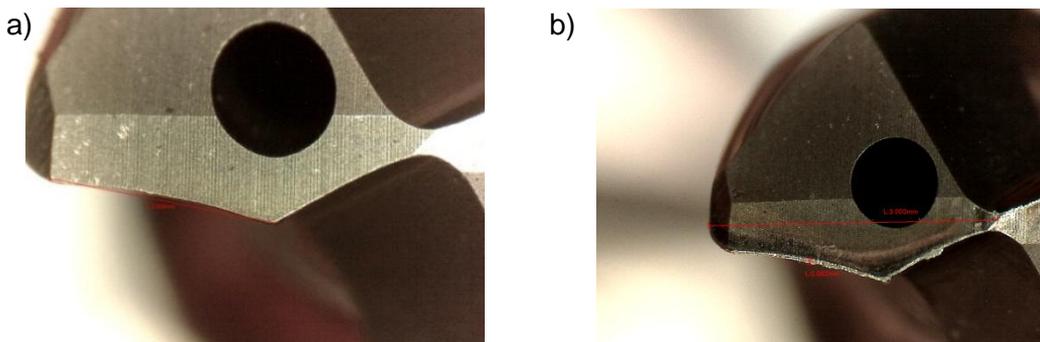


Figura 4.61. Imagen del filo principal: a) broca nueva; b) broca desgastada

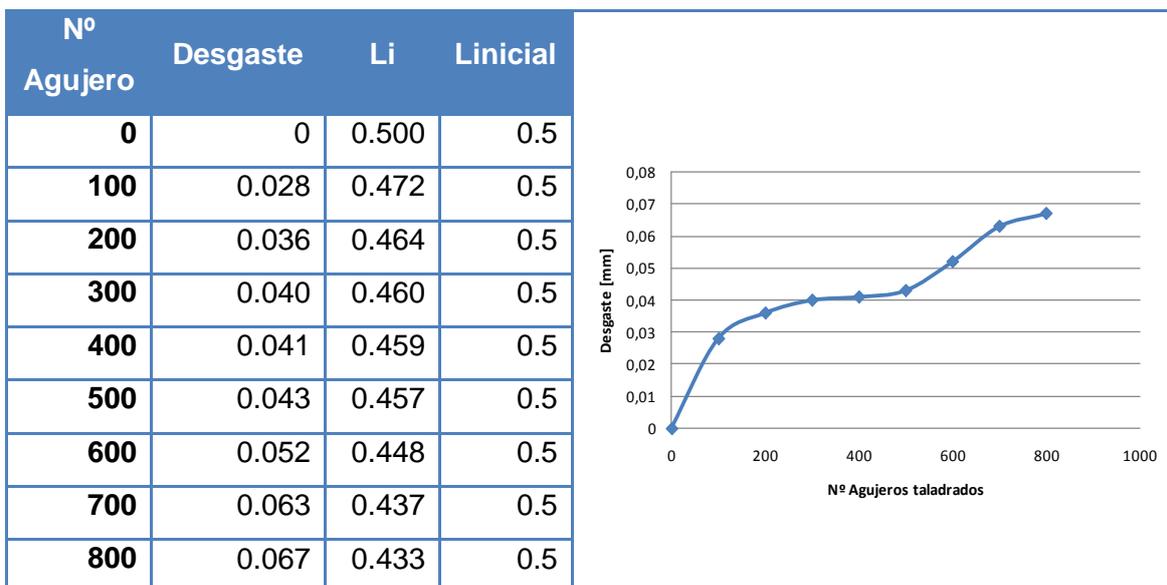
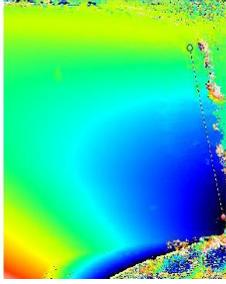
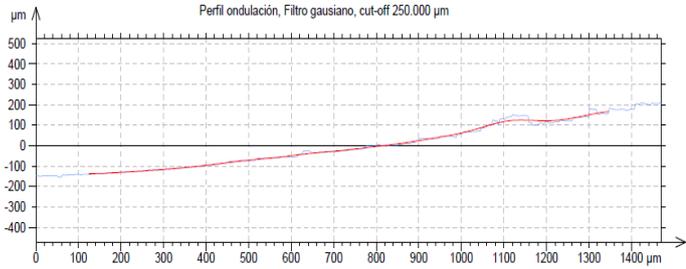
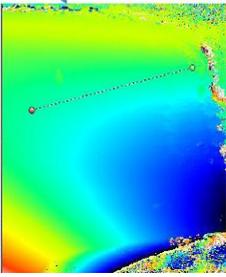
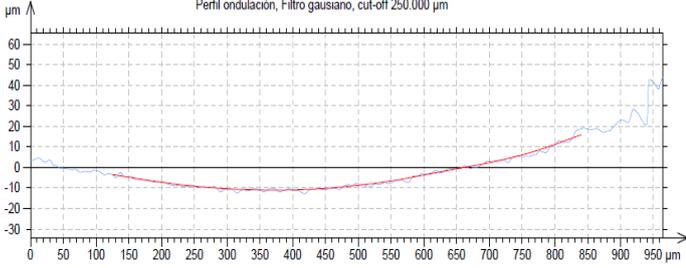
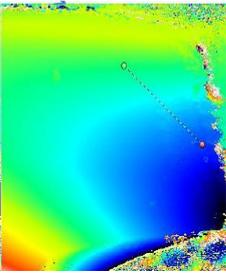
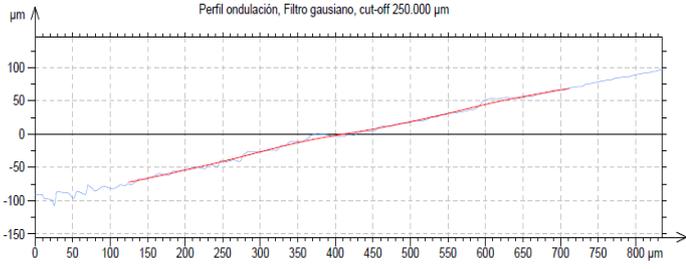


Tabla 4.12. Valores obtenidos para el desgaste de flanco del recubrimiento TiAlCrN

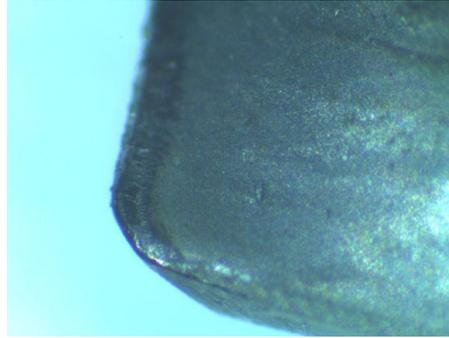
**4.6.3.4. Daño en la superficie de desprendimiento**

En la Tabla 4.13, se muestra la topografía de la superficie de desprendimiento de la broca analizada. En ella se han obtenido diferentes perfiles de rugosidad en direcciones diferentes de esta superficie.

	<p>Perfil ondulación, Filtro gaussiano, cut-off 250.000 <math>\mu\text{m}</math></p> 	<p><b>Ra</b> 3.48 <math>\mu\text{m}</math></p> <p><b>Rz</b> 18.15 <math>\mu\text{m}</math></p> <p><b>Rt</b> 48.24 <math>\mu\text{m}</math></p>
	<p>Perfil ondulación, Filtro gaussiano, cut-off 250.000 <math>\mu\text{m}</math></p> 	<p><b>Ra</b> 0.51 <math>\mu\text{m}</math></p> <p><b>Rz</b> 2.81 <math>\mu\text{m}</math></p> <p><b>Rt</b> 5.34 <math>\mu\text{m}</math></p>
	<p>Perfil ondulación, Filtro gaussiano, cut-off 250.000 <math>\mu\text{m}</math></p> 	<p><b>Ra</b> 1.77 <math>\mu\text{m}</math></p> <p><b>Rz</b> 9.11 <math>\mu\text{m}</math></p> <p><b>Rt</b> 11.73 <math>\mu\text{m}</math></p>

**Tabla 4.13.** Diferentes perfiles de rugosidad de la superficie de desprendimiento

En este caso la rugosidad parece superior pero no hay indicios de cráteres de gran tamaño, aunque sí se aprecian pequeñas hendiduras debidas al desgaste (ver Figura 4.62).

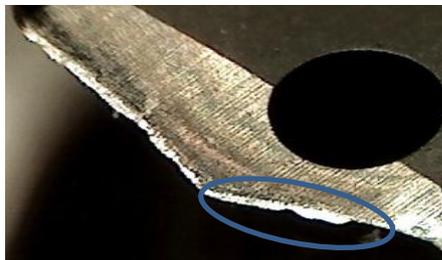


**Figura 4.62.** Superficie de desprendimiento de la broca recubierta con TiAlCrN

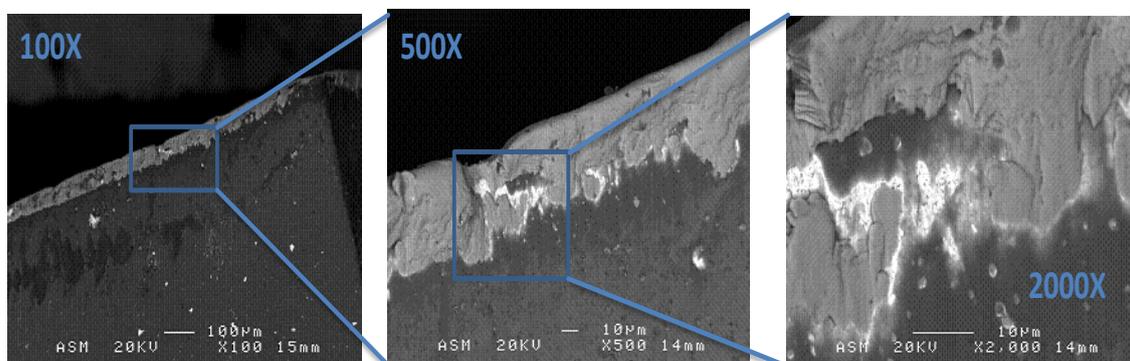
#### 4.6.3.5. Microscopia SEM y análisis EDX

Se procede a observar la masa adherida al filo de la broca (ver Figura 4.63), con el microscopio SEM. Analizando las imágenes obtenidas (ver Figura 4.64 y Figura 4.65) se aprecian los siguientes fenómenos:

- Adhesión de lubricante en fase sólida en la zona de desprendimiento
- Poco salto del recubrimiento, que se elimina de forma gradual
- Más adhesión de acero con principios de cráter



**Figura 4.63.** Adhesión de material al filo de la broca recubierta con TiAlCrN



**Figura 4.64.** Imágenes SEM de la zona de desprendimiento del TiAlCrN

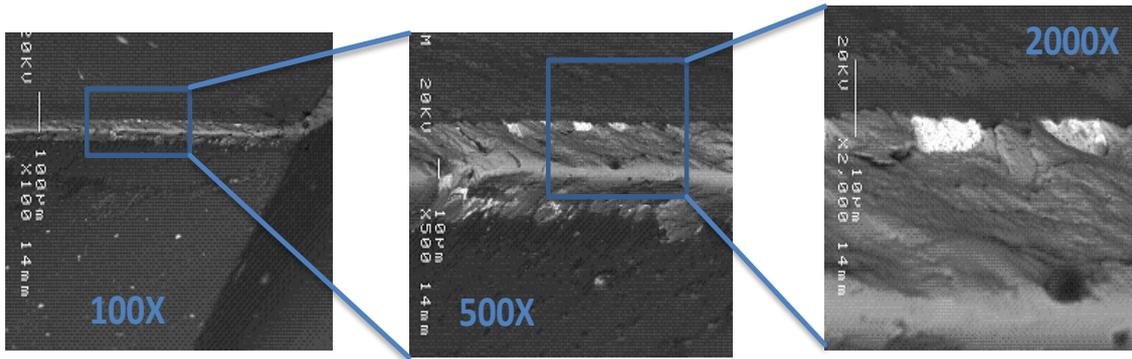


Figura 4.65. Imágenes SEM de la zona de incidencia del TiAlCrN

Realizando el análisis EDX de la masa que aparecía en la superficie de desprendimiento, se obtienen los resultados de la Figura 4.66. La composición que se obtiene de esta masa aparece una mezcla de componentes del material de trabajo (Cr, Mn, Fe...), parte del recubrimiento (Al, Ti, Cr...) y lubricante (Ca, Mn, Si...) confirmando de nuevo la aparición de lubricante solidificado en la zona de desprendimiento.

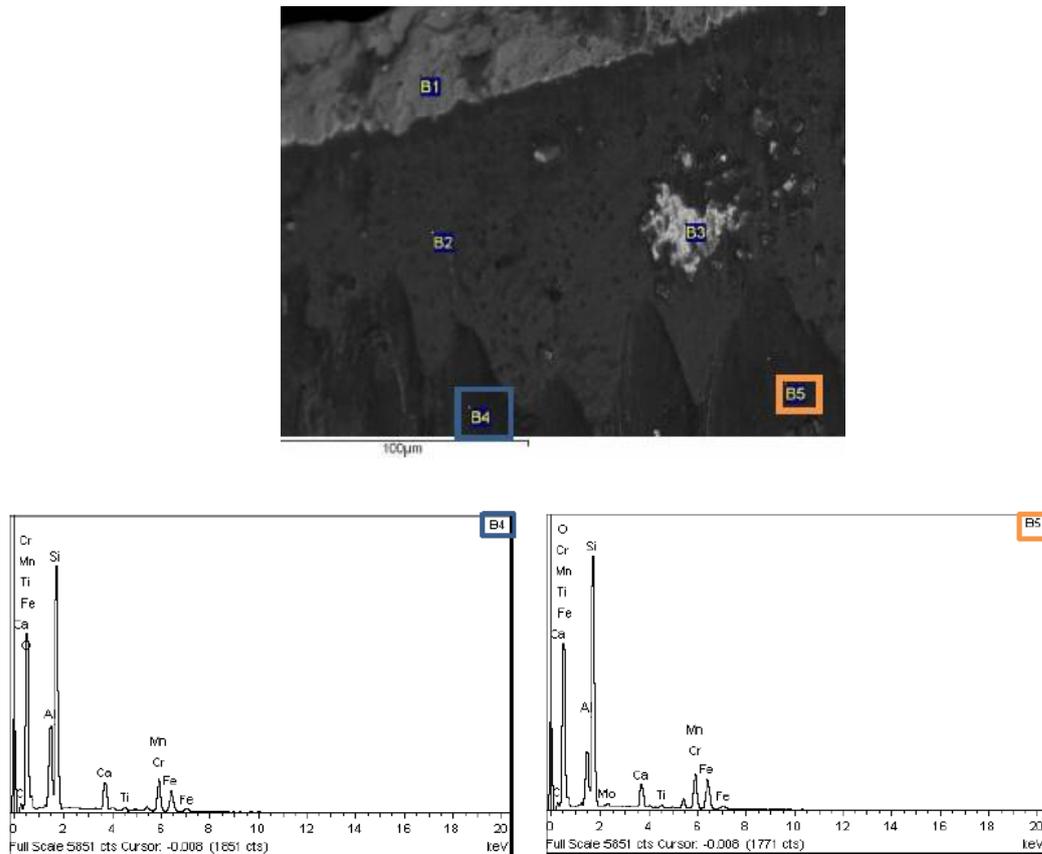


Figura 4.66. Resultado del análisis EDX de la masa apreciada en la zona de desprendimiento

#### 4.6.4. AlTiCrN

Este recubrimiento nanocapa, a diferencia de los anteriores, fue realizado en Platit, una empresa distinta, pero que colabora con Metal Estalki.

Es una variante del ya explicado TiAlCrN, con ligeras modificaciones en el proceso de deposición y en la composición de cada uno de los compuestos. En el caso anterior, el elemento predominante era el Titanio, que le confería mejores propiedades mecánicas a costa de no poseer tanta resistencia a la corrosión y estabilidad química como en este caso, en el que el elemento predominante es el aluminio.

El resto de propiedades son similares a las anteriores, con una dureza de 34 GPa, unos espesores de capa de hasta 4  $\mu\text{m}$ , como el espesor utilizado en estos ensayos, un coeficiente de fricción de entorno a 0.5, y una temperatura máxima de trabajo de 900°C.

Este recubrimiento es el que ha tenido peores resultados en los ensayos estudiados. En él se observa una magnitud de fuerzas elevada ( $F_{\text{máx.}} = 1520 \text{ N}$ ) y un aumento de las fuerzas excesivo ( $\Delta F = 280 \text{ N}$ ). Por ello, el desgaste de flanco es el más acusado y brusco de todos los recubrimientos, con un desgaste de flanco máximo de 0.385 mm.

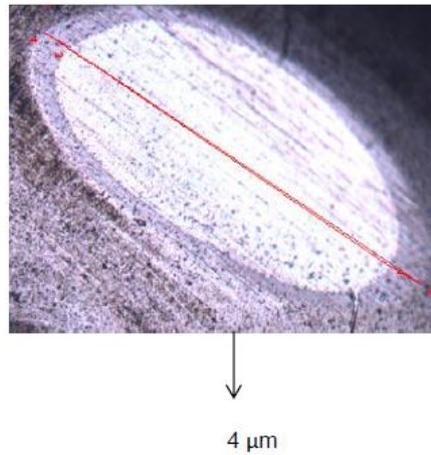
Además, las brocas presentaban roturas en la parte exterior de la herramienta y por lo tanto, daño en la superficie de desprendimiento muy superior al resto al cabo de 600 operaciones. Por otra parte, sufre un atascamiento de la viruta excesivo (ver Figura 4.67).



**Figura 4.67.** Enmarañamiento de la viruta ocasionado en la broca recubierta con AlTiCrN

#### 4.6.4.1. Espesor, adhesión y rugosidad

En este caso, se realiza el cálculo del espesor sobre la broca recubierta, ya que este recubrimiento no está realizado por la empresa colaboradora Metal Estalki (ver Figura 4.68). El espesor obtenido en este caso es de  $4\ \mu\text{m}$ .



**Figura 4.68.** Imagen del calotest del recubrimiento AlTiCrN realizado sobre la broca

Tampoco se obtienen imágenes del ensayo Rockwell C, considerándose que el grado de adhesión es bueno, debido a los estándares de calidad que proporciona la empresa suiza Platit.

El valor de la rugosidad en este caso se realiza sobre la broca, resultando prácticamente imposible un buen alineamiento manual, haciendo que el valor no sea exacto al 100 %. Considerando esta posible fuente de error, se obtiene un valor de  $0.09\ \mu\text{m}$ .

#### 4.6.4.2. Esfuerzos

Este recubrimiento tiene una magnitud de fuerzas elevada,  $F_{\text{máx.}} = 1520\ \text{N}$ , y un aumento de las fuerzas excesivo,  $\Delta F = 280\ \text{N}$ . Siendo el que peor comportamiento tiene de todos los recubrimientos ensayados (ver Figura 4.69 y Tabla 4.14).

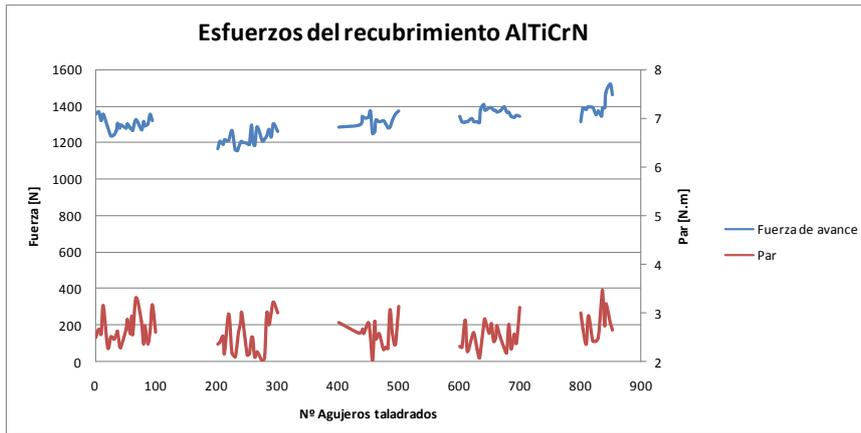


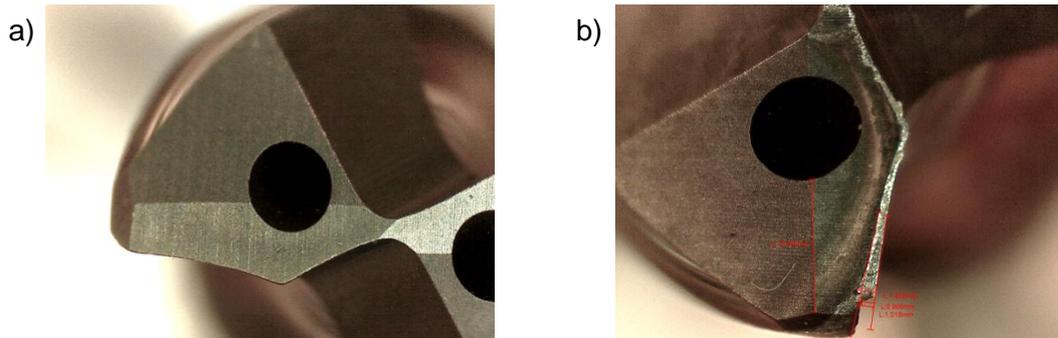
Figura 4.69. Evolución de los esfuerzos de broca recubierta con AlTiCrN

Nº Agujero	F máx. (N)	Par (N·m)	Nº Agujero	F máx. (N)	Par (N·m)	Nº Agujero	F máx. (N)	Par (N·m)
1	1355.60	2.49	236	1159.69	2.14	475	1282.62	2.59
5	1365.29	2.66	240	1157.06	1.17	479	1286.72	2.25
10	1322.78	2.57	242	1173.85	2.54	482	1321.38	2.08
13	1353.57	3.15	250	1199.71	2.50	486	1352.66	2.21
20	1281.77	2.29	257	1204.48	2.83	494	1371.09	2.75
25	1236.46	2.51	260	1193.97	2.83	500	1341.09	2.88
30	1244.05	2.47	262	1188.72	2.83	601	1390.24	2.89
34	1264.59	2.57	267	1294.33	2.10	605	1389.79	2.42
36	1303.03	2.62	275	1209.87	2.81	610	1365.83	2.51
40	1278.22	2.33	279	1184.85	2.77	613	1371.17	2.74
42	1293.78	2.29	282	1287.06	2.81	620	1393.52	2.52
50	1279.36	2.68	286	1209.39	3.23	625	1367.33	2.27
57	1302.32	2.87	294	1220.20	2.81	630	1364.49	2.19
60	1276.84	2.58	300	1238.94	2.82	634	1346.22	2.76
62	1278.55	2.93	401	1271.74	2.04	636	1339.35	2.28
67	1265.18	2.56	405	1230.96	2.83	640	1347.57	2.56
75	1327.68	3.32	410	1299.92	2.47	642	1344.44	2.38
79	1270.47	2.84	413	1262.75	2.58	650	1316.13	3.12
82	1315.22	2.37	420	1285.88	2.25	657	1390.72	2.99
86	1292.40	2.74	425	1298.98	2.29	660	1382.55	2.67
94	1300.99	3.17	430	1342.48	2.27	662	1395.02	2.36
100	1353.51	2.60	434	1336.93	3.06	667	1390.82	2.94
201	1318.04	2.17	436	1339.75	2.61	675	1352.68	2.44
205	1298.12	2.97	440	1370.75	2.36	679	1374.36	2.43
210	1168.10	2.19	442	1250.42	3.15	682	1344.64	2.49
213	1205.27	2.10	450	1263.04	2.31	686	1388.43	3.27
220	1189.53	2.59	457	1322.74	2.31	694	1392.03	3.46
225	1214.85	2.67	460	1313.72	2.85	700	1315.60	2.73
230	1211.58	2.58	462	1919.86	2.22	801	1472.15	3.18
234	1266.74	2.81	467	1299.76	2.49	805	1519.61	2.80
						810	1463.83	2.65

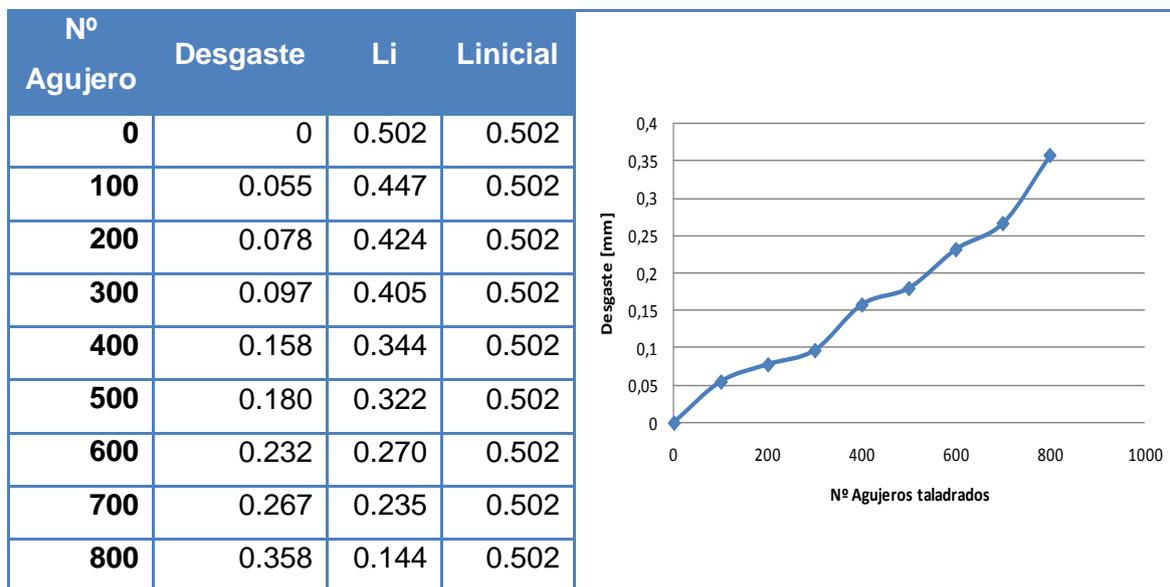
Tabla 4.14. Valores de la evolución de la fuerza máxima y par a medida que se realizan taladros con la broca recubierta con AlTiCrN

#### 4.6.4.3. Desgaste de flanco

El desgaste de flanco es más acusado y brusco que en otros recubrimientos (ver Figura 4.70), llegando a un valor máximo de 0.358 mm (ver Tabla 4.15). Este desgaste excesivo se puede justificar debido a las apariciones de roturas desde los 200 agujeros en uno de los dientes, por lo que al romper la simetría de la broca, provoca la rotura del diente contiguo, aumentando sucesivamente hasta alcanzar los filos transversales.



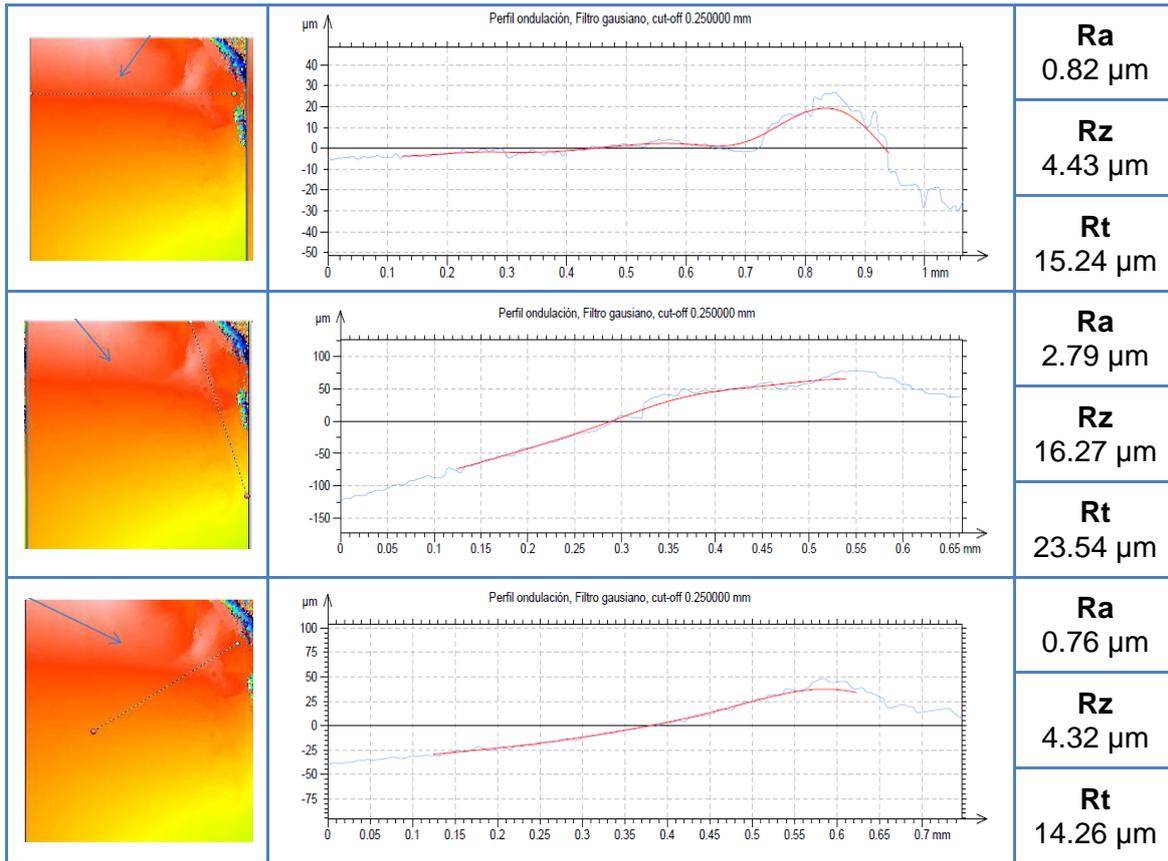
**Figura 4.70.** Imagen de la cámara de alta resolución del filo de las brocas recubiertas con AlTiCrN en las que se medirá el desgaste de flanco: a) broca nueva; b) broca desgastada



**Tabla 4.15.** Valores obtenidos para el desgaste de flanco del recubrimiento AlTiCrN

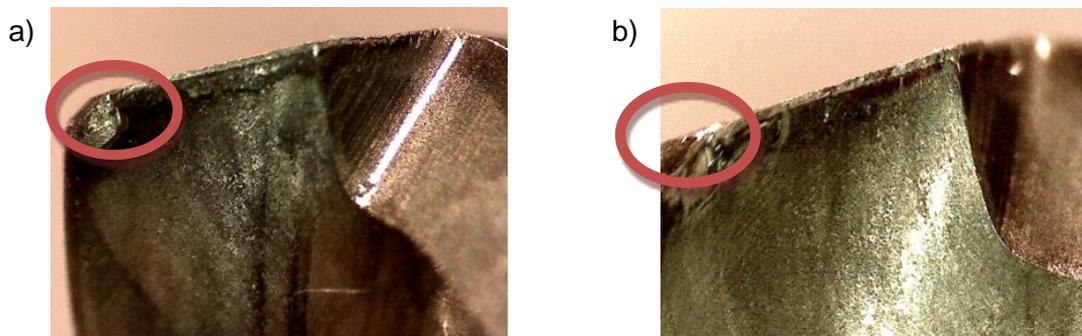
#### 4.6.4.4. Daño en la superficie de desprendimiento

En la Tabla 4.16, se muestra la topografía de la superficie de desprendimiento de la broca analizada. En ella se han obtenido diferentes perfiles de rugosidad en direcciones diferentes de esta superficie.



**Tabla 4.16.** Diferentes perfiles de rugosidad de la superficie de desprendimiento

La rotura de aproximadamente 100 µm que aparece, es consecuencia de la progresión de un cráter, que apareció a los 800 agujeros, con una profundidad aproximada de 800 agujeros. A continuación, en la Figura 4.71, se muestra la imagen del cráter que aparece en la superficie de desprendimiento, y que posteriormente degenera en una rotura.



**Figura 4.71.** a) Cráter en la superficie de desprendimiento; b) Rotura posterior

#### 4.6.4.5. Microscopía SEM y análisis EDX

De la microscopía SEM se aprecian lo siguiente (ver Figura 4.72 y Figura 4.73):

- Adhesión de lubricante en fase sólida en la zona de desprendimiento.
- Relativamente poco salto del recubrimiento, que se elimina de forma gradual.
- Gran adhesión de acero y gran desgaste de flanco.

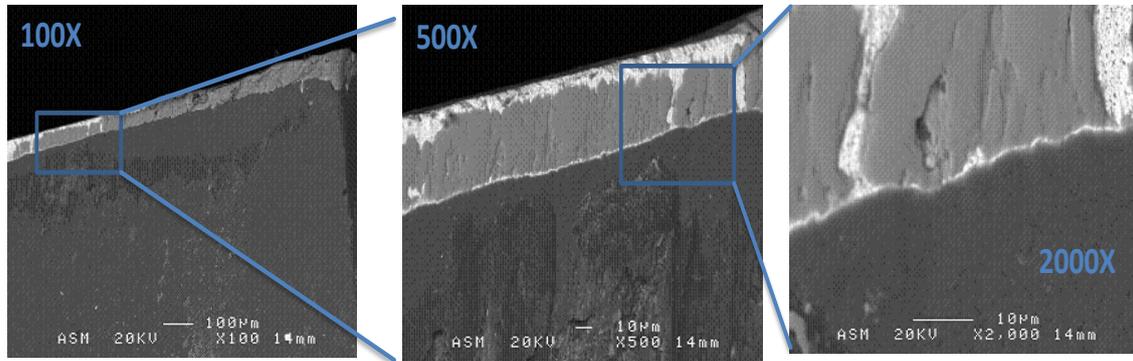


Figura 4.72. Imágenes SEM de la zona de desprendimiento AlTiCrN

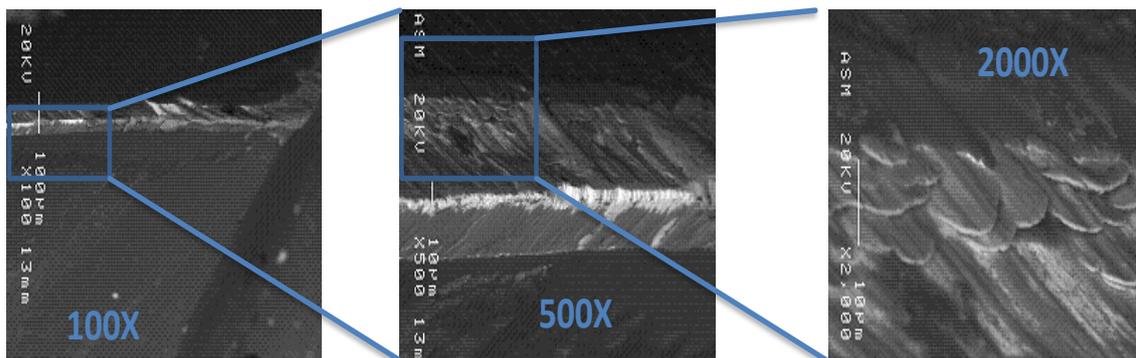


Figura 4.73. Imágenes SEM de la zona de incidencia del recubrimiento AlTiCrN

#### 4.6.5. TiAlSiN

Se trata de un recubrimiento nanocomposite, con una dureza muy alta de 45 GPa y un comportamiento sobresaliente trabajando a altas temperaturas, permitiendo el trabajo de manera adecuada hasta los 1200°C.

Está formado por una primera capa de adhesión de titanio, una capa intermedia gradiente y una capa exterior de mayor dureza de estructura nanocomposite.

Su nivel de tensiones residuales es relativamente alto, permitiendo espesores de hasta 4 μm, aunque en este caso es de 3 μm. Además cuenta con un coeficiente de fricción

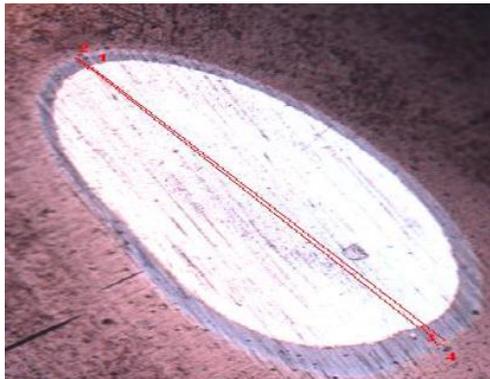
de 0.45. Al no poseer cromo posee menor resistencia a la corrosión y oxidación. Es un recubrimiento realizado por Platit, empresa colaboradora con Metal Estalki.

Este recubrimiento ha sido, junto con el recubrimiento  $\mu\text{AlTiN}$ , el que mayor rendimiento ha aportado. Se obtiene un valor de fuerza  $F_{\text{máx.}} = 1280 \text{ N}$ , y un aumento de  $\Delta F$  140 N, obteniendo un desgaste de flanco máximo de 0.074 mm.

Además presenta una evolución de viruta óptima, con rotura total inicial, seguida de una fragmentación intermitente hasta la falta de fragmentación, pero sin llegar al atascamiento.

#### 4.6.5.1. Espesor, adhesión y rugosidad

Al igual que en el recubrimiento  $\text{AlTiCrN}$ , este recubrimiento no está realizado por la empresa Metal Estalki, por lo que el valor del espesor del recubrimiento se realiza sobre la propia herramienta recubierta, obteniendo un valor de  $3 \mu\text{m}$  (ver Figura 4.74).



**Figura 4.74.** Imagen del calotest del recubrimiento  $\text{TiAlSiN}$  realizado sobre la broca

Tampoco se tiene imágenes del resultado del ensayo Rockwell C, garantizando por parte de la empresa Platit y sus estándares de calidad, el buen grado de adhesión del recubrimiento.

El valor de la rugosidad del recubrimiento obtenido sobre la herramienta es de  $0.06 \mu\text{m}$ .

#### 4.6.5.2. Esfuerzos

Este recubrimiento es el que mejores resultados ha obtenido con un valor de fuerza máximo de 1280 N, y un aumento de la fuerza de 140 N (ver Tabla 4.17 y Figura 4.75).

Nº Agujero	F máx. (N)	Par (N·m)	Nº Agujero	F máx. (N)	Par (N·m)	Nº Agujero	F máx. (N)	Par (N·m)
1	1222.40	2.34	236	1239.68	3.42	675	1195.75	3.45
5	1176.59	2.19	240	1241.39	3.43	679	1218.77	3.38
10	1166.02	2.22	242	1238.51	3.42	682	1263.06	3.81
13	1158.11	2.65	250	1239.02	3.41	686	1212.30	3.82
20	1174.89	2.48	257	1243.58	3.43	694	1209.25	3.84
25	1152.68	2.20	260	1231.11	3.45	700	1226.96	3.50
30	1189.28	2.30	262	1246.64	3.38	801	1244.57	3.88
34	1209.34	2.45	267	1245.89	3.39	805	1249.61	3.47
36	1204.22	2.34	275	1245.33	3.39	810	1282.41	3.38
40	1194.37	2.42	279	1250.43	3.37	813	1255.99	3.69
42	1261.72	2.64	282	1247.51	3.44	820	1259.66	3.33
50	1275.88	2.37	286	1257.05	3.42	825	1239.44	3.53
57	1273.18	2.31	294	1245.95	3.58	830	1242.15	3.70
60	1271.31	2.71	300	1250.37	3.41	834	1258.53	3.65
62	1257.33	2.39	601	1186.70	3.47	836	1245.62	3.76
67	1271.20	2.71	605	1247.05	3.80	840	1263.18	3.97
75	1263.70	2.79	610	1206.97	3.51	842	1237.86	4.09
79	1233.85	2.49	613	1223.74	3.71	850	1281.30	3.92
82	1351.07	2.36	620	1268.19	3.76	857	1227.24	3.83
86	1291.58	2.13	625	1303.42	3.81	860	1240.98	3.93
94	1319.12	2.50	630	1269.84	3.84	862	1266.04	3.59
100	1284.45	3.16	634	1216.24	3.57	867	1279.82	3.73
201	1202.35	3.31	636	1189.70	3.14	875	1247.33	3.74
205	1212.38	3.48	640	1197.07	3.58	879	1257.02	3.92
210	1218.88	3.28	642	1190.97	3.32	882	1238.17	3.97
213	1226.21	3.38	650	1274.50	3.71	886	1174.65	3.93
220	1222.41	3.28	657	1233.27	3.67	894	1177.83	3.68
225	1227.30	3.20	660	1167.49	3.55	1001	1234.73	3.65
230	1234.84	3.34	662	1246.06	3.56	1015	1208.97	3.45
234	1235.68	3.40	667	1178.27	3.51	1025	1225.91	3.54

Tabla 4.17. Valores de la evolución de la fuerza y par máximo a medida que se realizan taladros con la broca recubierta con TiAlSiN

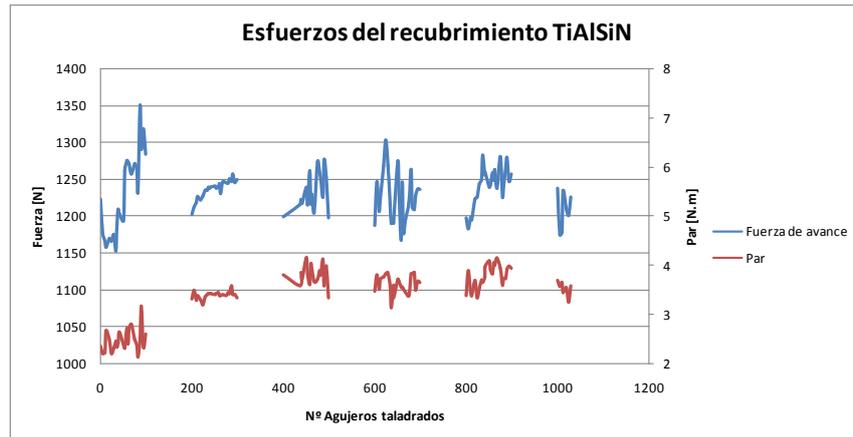


Figura 4.75. Evolución de los esfuerzos de la broca recubierta con TiAlSiN

#### 4.6.5.3. Desgaste de flanco

En la Figura 4.76 se muestra el filo de la broca, el cual tiene un desgaste de flanco progresivo hasta un valor máximo de 0.074 mm (ver Tabla 4.18).

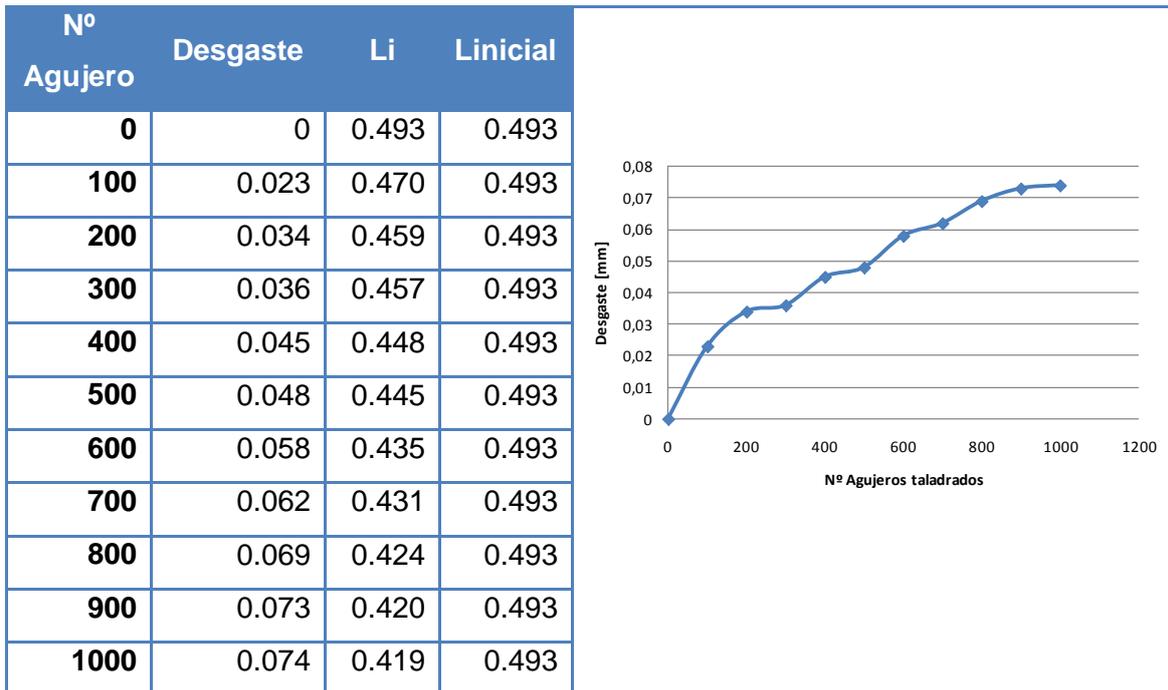


Tabla 4.18. Valores obtenidos para el desgaste de flanco del recubrimiento TiAlSiN



**Figura 4.76.** Imagen de la cámara de alta resolución del filo de la broca recubierta con TiAlSiN en la que se medirá el desgaste de flanco

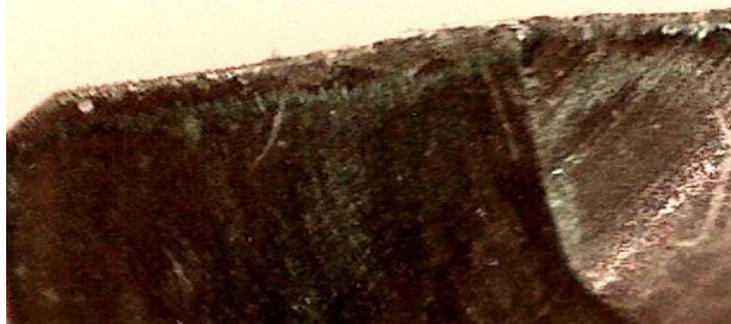
#### 4.6.5.4. Daño en la superficie de desprendimiento

En la Tabla 4.19, se muestra la topografía de la superficie de desprendimiento de la broca analizada. En ella se han obtenido diferentes perfiles de rugosidad en direcciones diferentes de esta superficie.

	<p>Perfil ondulación, Filtro gaussiano, cut-off 250.000 <math>\mu\text{m}</math></p>	<p><b>Ra</b> 1.96 <math>\mu\text{m}</math></p> <p><b>Rz</b> 10.48 <math>\mu\text{m}</math></p> <p><b>Rt</b> 15.57 <math>\mu\text{m}</math></p>
	<p>Perfil ondulación, Filtro gaussiano, cut-off 250.000 <math>\mu\text{m}</math></p>	<p><b>Ra</b> 0.70 <math>\mu\text{m}</math></p> <p><b>Rz</b> 3.53 <math>\mu\text{m}</math></p> <p><b>Rt</b> 5.33 <math>\mu\text{m}</math></p>
	<p>Perfil ondulación, Filtro gaussiano, cut-off 250.000 <math>\mu\text{m}</math></p>	<p><b>Ra</b> 0.64 <math>\mu\text{m}</math></p> <p><b>Rz</b> 3.79 <math>\mu\text{m}</math></p> <p><b>Rt</b> 6.10 <math>\mu\text{m}</math></p>

**Tabla 4.19.** Diferentes perfiles de rugosidad de la superficie de desprendimiento

A continuación, en la Figura 4.77, se muestra la imagen del microset de esta superficie de desprendimiento. Apparently no existen hendiduras que se puedan considerar cráteres, pero sí un astillamiento en la zona cercana al filo.

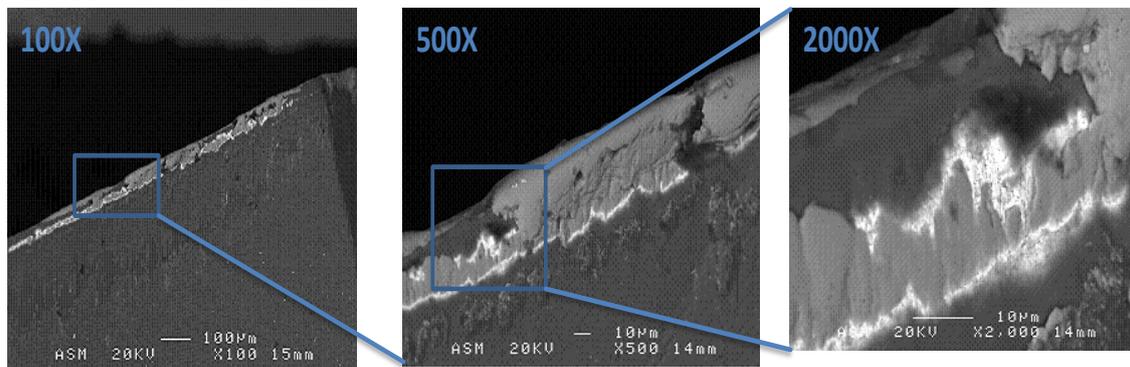


**Figura 4.77.** Superficie de desprendimiento de la broca recubierta con TiAlSiN

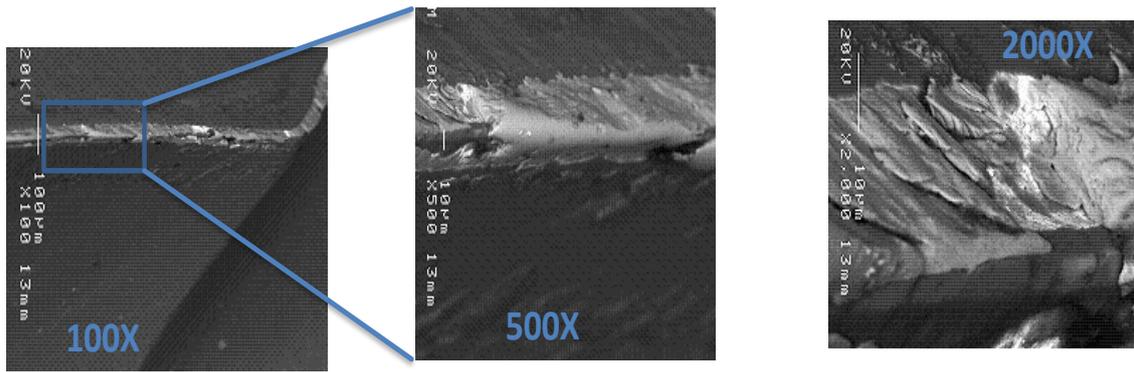
#### 4.6.5.5. Microscopía SEM y análisis EDX

En la Figura 4.78 y Figura 4.79 se observan las imágenes obtenidas con el microscopio SEM, obteniendo las siguientes conclusiones:

- Adhesión de lubricante en fase sólida en la zona de desprendimiento
- Poco salto del recubrimiento, que se elimina de forma gradual
- Poca adhesión de acero con principios de cráter



**Figura 4.78.** Imágenes SEM de la zona del desprendimiento del recubrimiento TiAlSiN



**Figura 4.79.** Imágenes SEM de la zona de incidencia del recubrimiento TiAlSiN

#### 4.6.6. AlCrN

Este recubrimiento monocapa con capa de adhesión de cromo es de una tercera empresa, que es uno de los mayores competidores de Metal Estalki.

Este recubrimiento se caracteriza por una excelente resistencia al desgaste y buen comportamiento frente a altas temperaturas. Está indicado para operaciones de fresado con óptimos resultados pero tampoco ha demostrado mal comportamiento en taladrado.

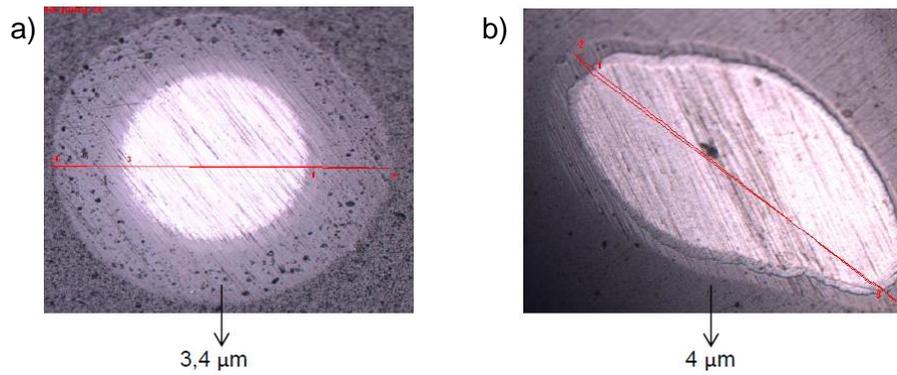
Tiene una dureza de 38 GPa, un coeficiente de fricción de 0.35 y su máxima temperatura de trabajo es de 1100°C.

El recubrimiento AlCrN no ha sido especialmente destacable en cuanto a ninguno de los ensayos, rompiendo las expectativas que se tenían.

Se obtiene un valor de fuerza máxima de 1380 N, un aumento de la fuerza  $\Delta F$  de 200 N, y un desgaste de flanco máximo,  $V_b$  máx. de 0.126 mm. El daño es pequeño en la zona de desprendimiento, con un desgaste de flanco de 0.12 mm.

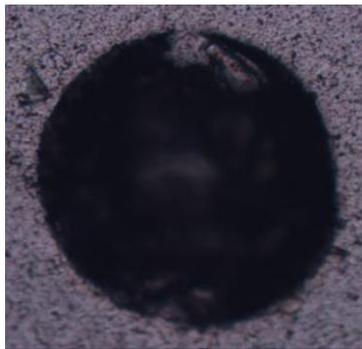
##### 4.6.6.1. Espesor, adhesión y rugosidad

Se obtiene un valor de espesor del recubrimiento de 3.4  $\mu\text{m}$  sobre la probeta, y de 4  $\mu\text{m}$  al realizar el ensayo calotest en la broca (ver Figura 4.80).



**Figura 4.80.** Imágenes del calotest del recubrimiento AICrN: a) sobre probeta; b) sobre broca

En la imagen de la Figura 4.81, se observa la huella producida al realizarse el ensayo Rockwell C. Mediante esta imagen se deduce que el recubrimiento tiene una adhesión idónea sobre el recubrimiento, ya que no se observa ninguna fisura.



**Figura 4.81.** Imagen del ensayo Rockwell C del recubrimiento AICrN

El valor de la rugosidad obtenido es de 0.6 μm.

#### 4.6.6.2. Esfuerzos

La fuerza de avance máxima alcanzada es de 1380 N, con un aumento de la fuerza de 200 N (ver Tabla 4.20 y Figura 4.82).

Nº Agujero	F máx. (N)	Par (N·m)	Nº Agujero	F máx. (N)	Par (N·m)	Nº Agujero	F máx. (N)	Par (N·m)
1	1191.39	3.53	236	1249.10	3.58	675	1312.84	4.10
5	1142.65	3.76	240	1236.35	3.37	679	1296.12	3.97
10	1173.75	3.49	242	1248.05	3.65	682	1285.79	4.11
13	1181.20	3.53	250	1227.03	3.42	686	1318.55	4.27
20	1165.91	3.48	257	1218.99	3.81	694	1334.85	4.17
25	1139.63	3.55	260	1249.73	3.30	700	1312.83	4.18
30	1138.79	3.34	262	1227.63	3.52	801	1328.38	4.10
34	1127.36	3.87	267	1262.15	3.32	805	1305.52	4.06
36	1141.65	3.63	275	1284.65	3.73	810	1315.58	4.03
40	1150.88	3.41	279	1263.58	3.28	813	1346.91	3.99
42	1132.08	3.54	282	1257.46	3.31	820	1329.23	4.17
50	1109.15	3.61	286	1239.70	3.50	825	1354.22	4.14
57	1134.70	3.70	294	1272.48	3.34	830	1335.15	3.87
60	1138.62	4.23	300	1251.85	3.51	834	1334.45	3.90
62	1106.68	3.51	601	1247.53	3.85	836	1345.85	4.07
67	1135.75	3.67	605	1284.63	4.13	840	1370.19	3.87
75	1103.84	3.72	610	1296.35	4.16	842	1351.68	4.08
79	1112.85	3.31	613	1302.97	4.01	850	1352.76	4.14
82	1115.46	3.23	620	1301.71	4.06	857	1354.12	4.12
86	1130.56	3.66	625	1283.09	4.15	860	1314.48	4.15
94	1183.93	3.84	630	1294.70	4.37	862	1343.78	4.53
100	1173.88	3.06	634	1295.53	4.04	867	1347.50	4.05
201	1175.83	3.23	636	1273.53	4.14	875	1350.22	3.99
205	1287.05	3.62	640	1332.63	4.07	879	1350.15	4.13
210	1303.72	3.48	642	1291.68	3.87	882	1348.97	3.90
213	1231.96	3.51	650	1305.44	3.96	886	1276.35	4.07
220	1230.97	3.73	657	1280.36	4.19	894	1348.93	4.36
225	1229.14	3.45	660	1314.88	3.93	1001	1325.51	4.07
230	1227.08	3.68	662	1284.88	4.19	1015	1342.22	4.00
234	1228.70	3.38	667	1273.16	3.93	1025	1382.75	4.07

Tabla 4.20. Valores de la evolución de la fuerza y del par máximo a medida que se realizan taladros con la broca recubierta con AlCrN

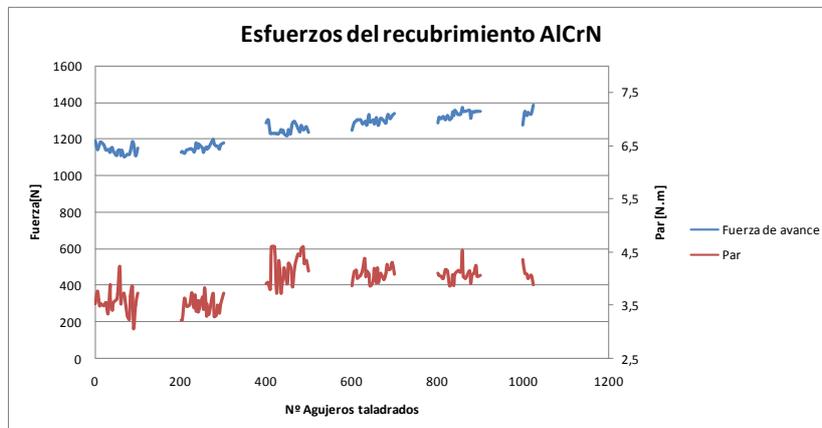
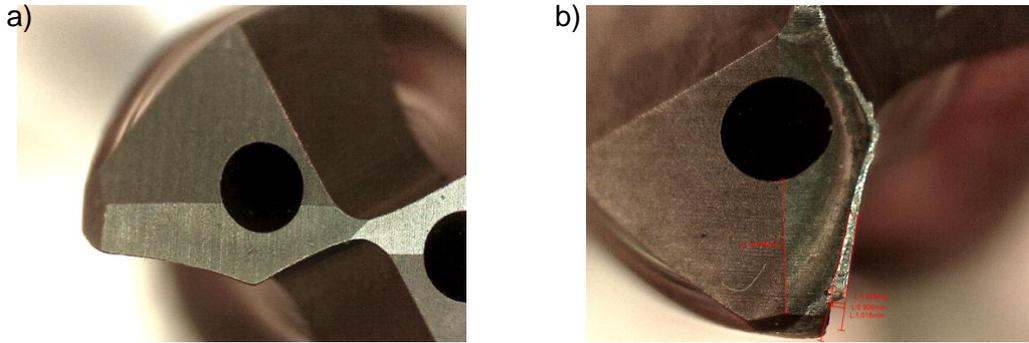


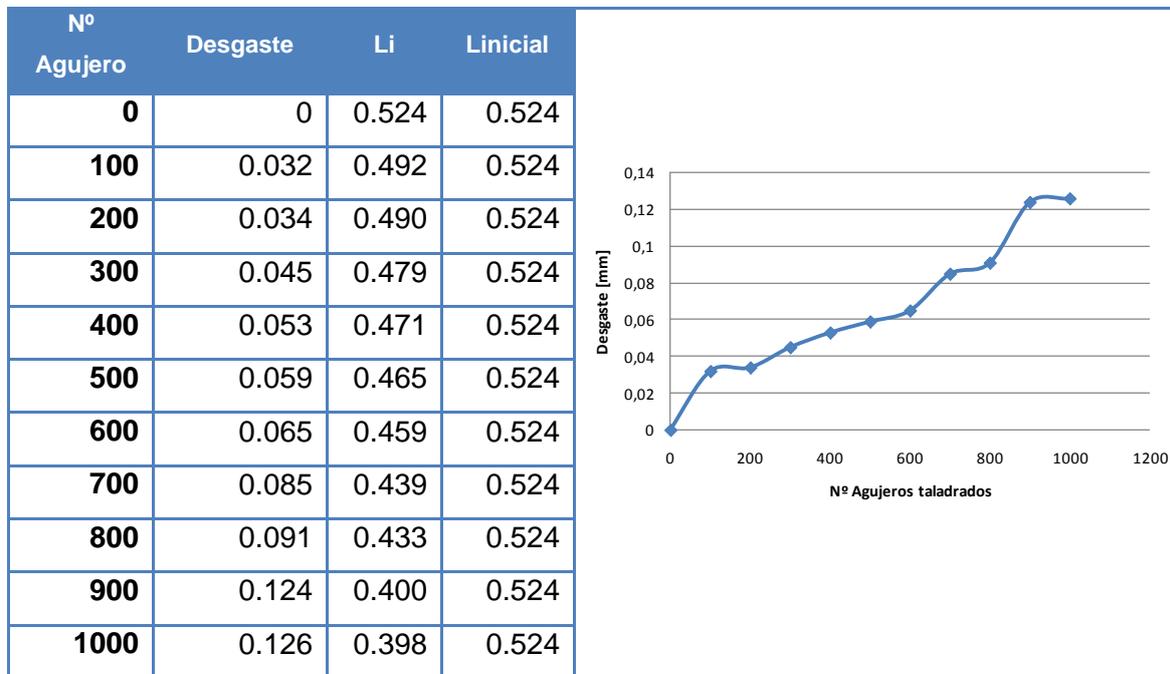
Figura 4.82. Evolución de los esfuerzos de la broca recubierta con AlCrN

#### 4.6.6.3. Desgaste de flanco

El desgaste de flanco máximo alcanzado es de 0.12 mm (ver Tabla 4.21).



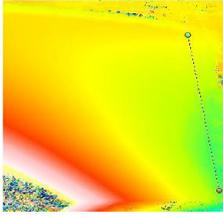
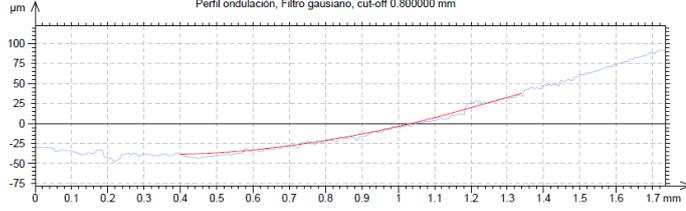
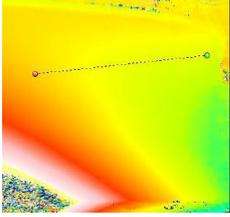
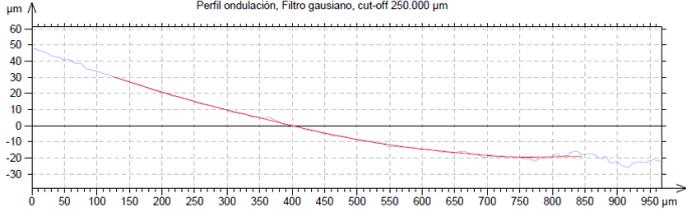
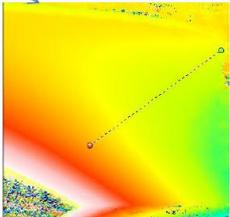
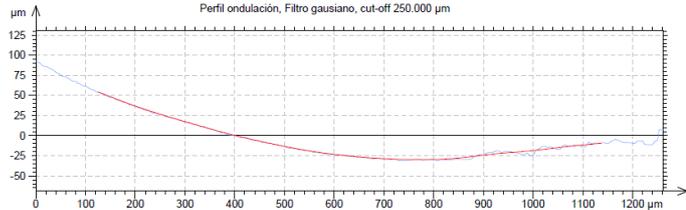
**Figura 4.83.** Imagen de la cámara de alta resolución del filo de las brocas recubiertas con AICrN en las que se medirá el desgaste de flanco: a) broca nueva; b) broca desgastada



**Tabla 4.21.** Valores obtenidos para el desgaste de flanco del recubrimiento AICrN

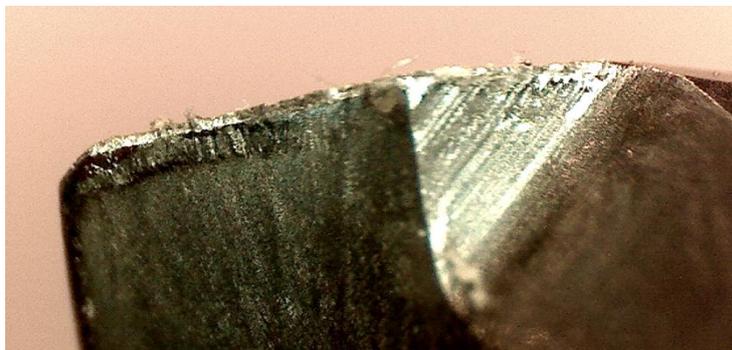
#### 4.6.6.4. Daño en la superficie de desprendimiento

En la Tabla 4.22, se muestra la topografía de la superficie de desprendimiento de la broca analizada. En ella se han obtenido diferentes perfiles de rugosidad en direcciones diferentes de esta superficie.

		<p><b>Ra</b> 1.22 <math>\mu\text{m}</math></p>
		<p><b>Rz</b> 7.39 <math>\mu\text{m}</math></p>
		<p><b>Rt</b> 12.43 <math>\mu\text{m}</math></p>
		<p><b>Ra</b> 0.35 <math>\mu\text{m}</math></p>
		<p><b>Rz</b> 2.39 <math>\mu\text{m}</math></p>
		<p><b>Rt</b> 4.45 <math>\mu\text{m}</math></p>
		<p><b>Ra</b> 0.64 <math>\mu\text{m}</math></p>
		<p><b>Rz</b> 3.23 <math>\mu\text{m}</math></p>
		<p><b>Rt</b> 9.12 <math>\mu\text{m}</math></p>

**Tabla 4.22.** Diferentes perfiles de rugosidad de la superficie de desprendimiento

En la Figura 4.84 se muestra la superficie de desprendimiento de esta broca, en la que se pueden apreciar astillamientos en la zona cercana al filo.



**Figura 4.84.** Superficie de desprendimiento de la broca recubierta con AlCrN

#### 4.6.6.5. Microscopía SEM y análisis EDX

Analizando el material adherido al filo (ver Figura 4.85.) mediante el microscopio SEM se obtienen las siguientes conclusiones (ver Figura 4.86 y Figura 4.87):

- Adhesión de lubricante en fase sólida en la zona de desprendimiento.
- Poco salto del recubrimiento, que se elimina de forma gradual.
- Poca adhesión de acero con principios de cráter y posible oxidación.



Figura 4.85. Material adherido al filo de la herramienta recubierta con AICrN

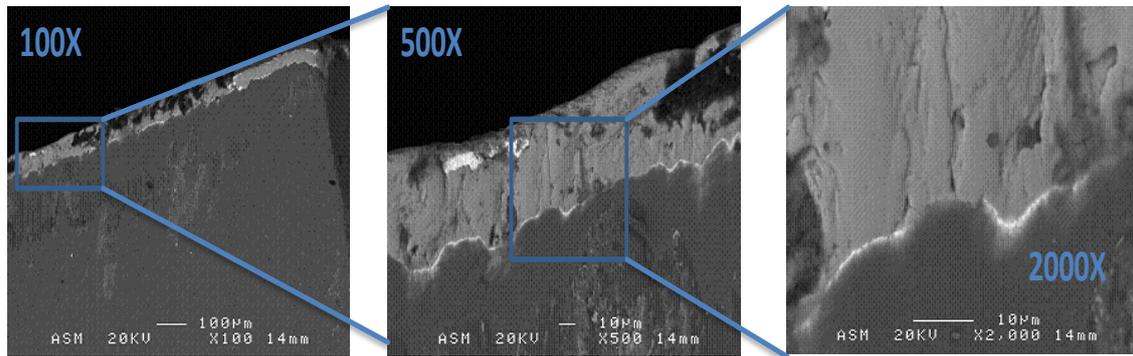


Figura 4.86. Imágenes SEM de la zona de desprendimiento del AICrN

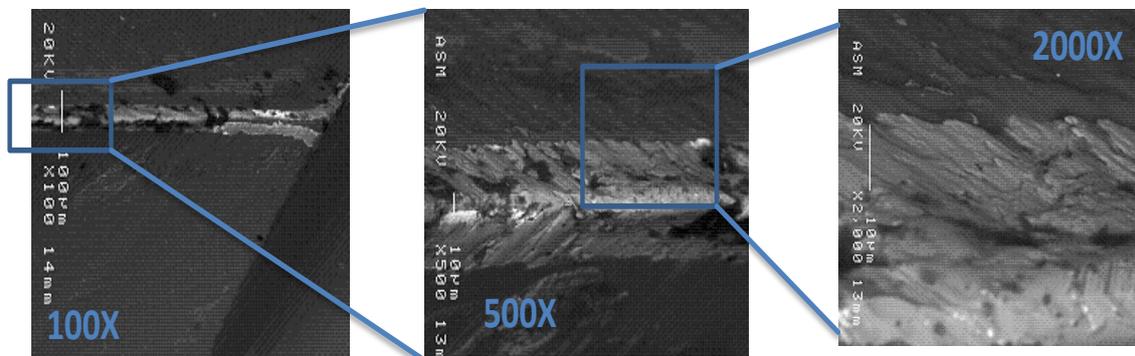


Figura 4.87. Imágenes SEM de la zona de incidencia del AICrN

#### 4.6.7. Tensiones residuales: Validación y ajuste de las probetas, y tensiones de los recubrimientos ensayados

En el punto 2.4.1.8, se explicó el Método de deflexión, ensayo de Stoney, y la utilización de un nuevo diseño de probetas que permitía medir con un microscopio tradicional. Además, se incluían dos tablas (Tabla 2.5 y Tabla 2.6) donde se mostraban los resultados comparativos entre el ensayo de Stoney y este nuevo método, en el que se efectuaron una nueva serie de correcciones para conseguir que el error estuviera dentro del 10% admisible.

Los resultados obtenidos, tras las modificaciones del diseño (principalmente introduciendo unas arandelas a ambos lados de la chapa de medida de tensiones), permitieron dar por válidas las probetas, ya que cumplían la especificación de reproducir la medida con menos de 10% de error (ver Tabla 4.24).

Los resultados de las tensiones residuales de los recubrimientos ensayados en la Fase I se muestran en la Tabla 4.23. Hay que tener en cuenta que tres de ellos no fueron realizados en Metal Estalki (AlTiCrN, TiAlSiN y AlCrN), de modo que no se dispone de datos acerca de las tensiones de estos recubrimientos.

Fase	Recubrimiento	$\sigma_1$ [GPa]	$\sigma_2$ [GPa]	$\sigma_3$ [GPa]	$\sigma_4$ [GPa]	$\sigma_{media}$ [GPa]
I	AlCrSiN	6.56	6.94	7.20	6.71	6.85
	$\mu$ AlTiN	2.83	2.96	3.50	3.10	3.09
	TiAlCrN	5.50	5.10	4.80	4.86	5.07

**Tabla 4.23.** Tensiones residuales de los recubrimientos ensayados en la Fase I

	Nº Plet	$\sigma_{\text{libre}}$ (GPa)	$\sigma_{\text{probetas}}$ (GPa)	$\epsilon_{\text{relativo}}$ (%)
<b>AlTiN</b> Ref. 22618	1	3.00	3.400	11.7
	2	3.15	3.400	7.3
	3	3.50	3.400	-2.9
	4	3.04	3.400	10.6
<b>TiN</b> Ref. 22665	1	2.83	2.905	-2.6
	2	3.77	2.905	25
	3	2.84	2.905	-2.23
	4	2.70	2.905	-7
<b>AlCrSiN</b> Ref. 17447	1	6.10	5.900	3.4
	2	6.30	5.900	6.6
	3	6.70	5.900	13
	4	6.10	5.900	3.4
<b>TiCN</b> Ref. 22721	1	5.97	5.800	2.9
	2	6.20	5.800	6.9
	3	5.83	5.800	0.51
	4	5.80	5.800	3.44
<b>CrN</b> Ref. 20993	1	2.15	2.600	20
	2	2.86	2.600	-9
	3	3.10	2.600	-15
	4	2.75	2.600	-5.5
<b>TiN</b> Ref. 22753	1	3.52	4.800	13
	2	3.95	4.800	1.2
	3	4.20	4.800	-4.7
	4	4.20	4.800	-4.7

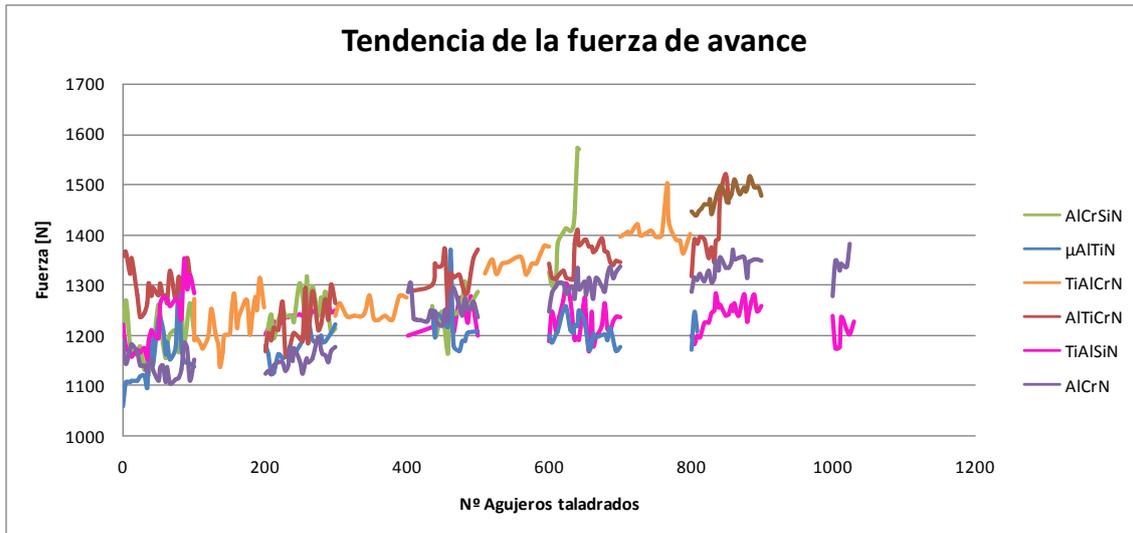
**Tabla 4.24.** Resultados del diseño final de las probetas

#### 4.6.8. Conclusiones Fase I

Para una mejor comprensión en la interpretación de los resultados, se agrupan todos los recubrimientos ensayados para cada resultado experimental obtenido, pudiendo realizar así una comparativa más visual.

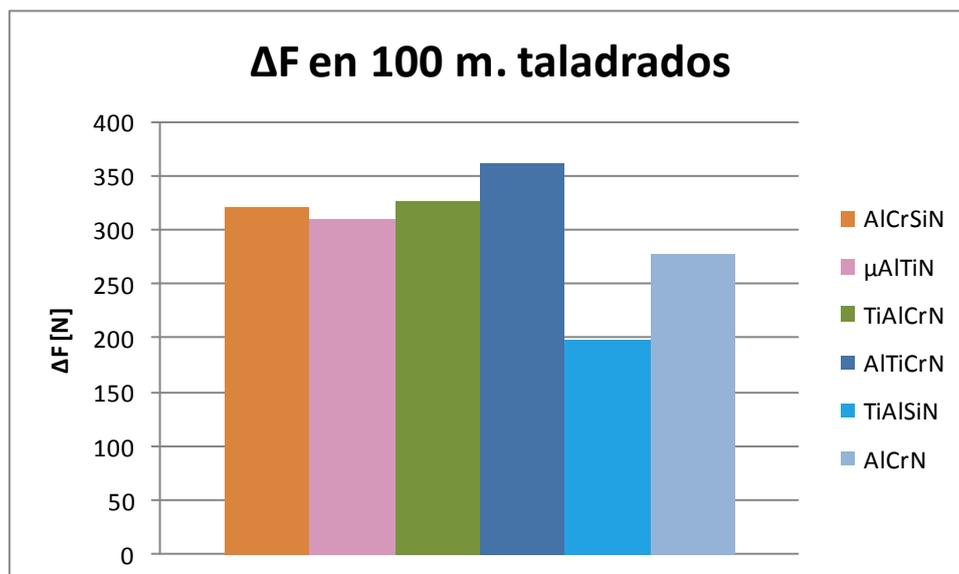
Atendiendo a la **fuerza de avance** (ver Figura 4.88.) destaca el buen comportamiento de los recubrimientos  $\mu\text{AlTiN}$  y el  $\text{TiAlSiN}$ , en la tendencia a lo largo de la realización

del número de agujeros taladrados. En contra, está el AlTiCrN, que es el que peor comportamiento tiene.



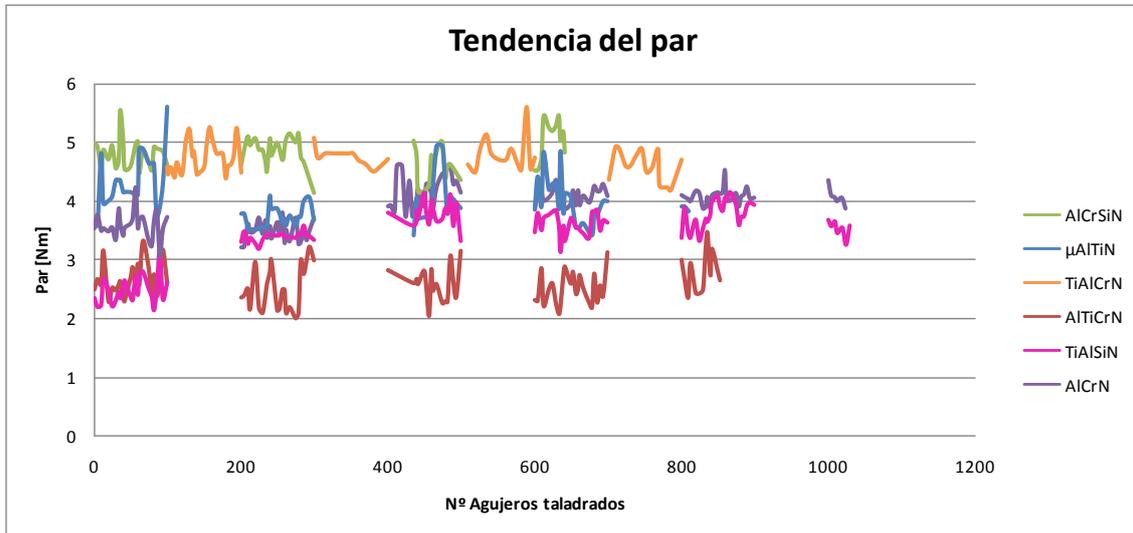
**Figura 4.88.** Gráfica comparativa de la fuerza de avance para los diferentes recubrimientos ensayados en la Fase I

Además, el TiAlSiN es el que muestra un menor aumento de la fuerza de avance al finalizar los 100 metros taladrados con la broca recubierta (ver Figura 4.89). El AlTiCrN es el que sigue mostrando peor comportamiento, siendo el que mayor aumento de la fuerza de avance presenta.



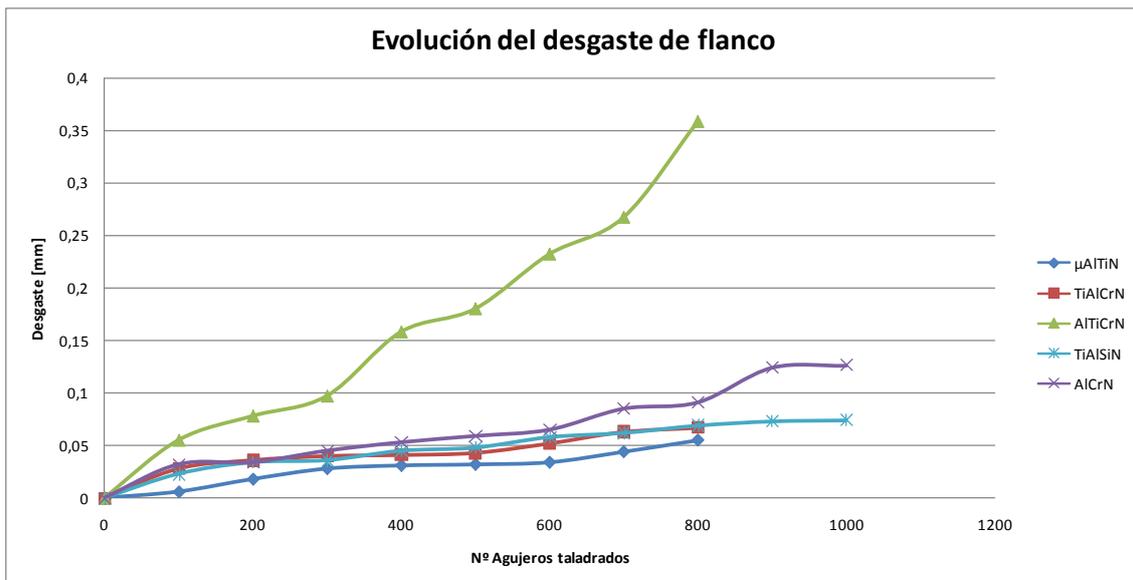
**Figura 4.89.** Gráfica comparativa del aumento de la fuerza de avance al final de 100 metros taladrados

Si se compara el **par** sufrido por las diferentes brocas recubiertas, representado en la Figura 4.90, se observa que los que tienen mejor comportamiento en la fuerza de avance, son los que tienen también mejor comportamiento en el par, teniendo una mayor constancia en el par.



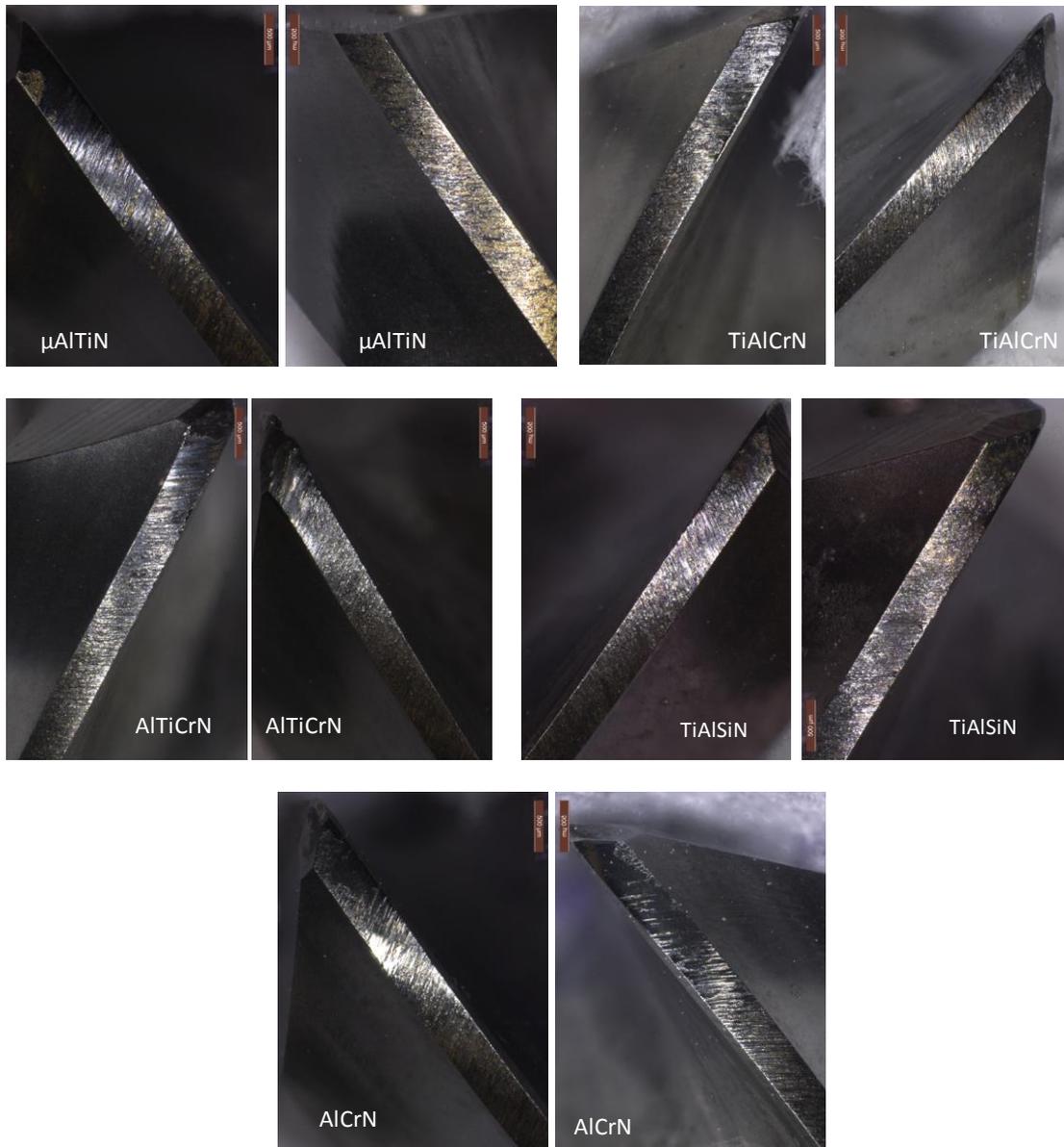
**Figura 4.90.** Gráfica comparativa del par para los diferentes recubrimientos ensayados en la Fase I

Para el **desgaste de flanco**, se obtiene la gráfica de la Figura 4.91 en la que se deduce claramente que el recubrimiento AlTiCrN es el que peor resultado tiene. En contra la mejor evolución del desgaste de flanco la posee el recubrimiento μAlTiN.



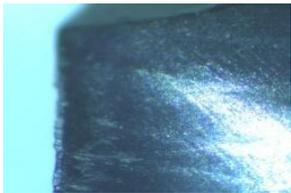
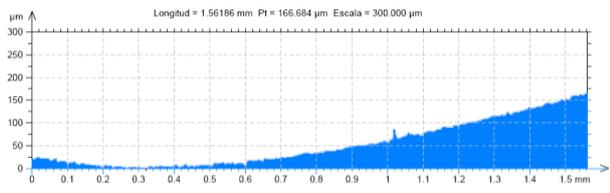
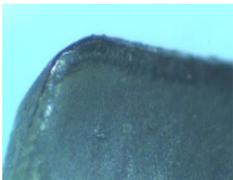
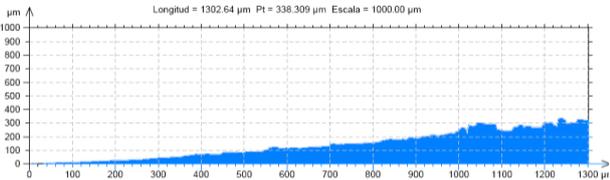
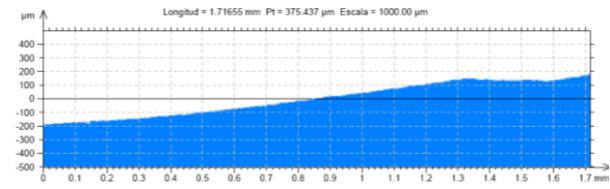
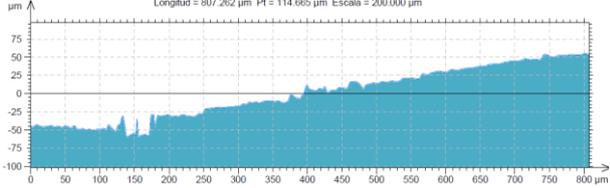
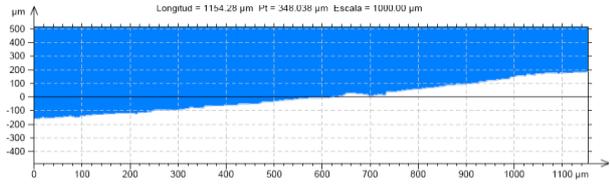
**Figura 4.91.** Gráfica comparativa de la evolución del desgaste de flanco para los diferentes recubrimientos ensayados en la Fase I

En la Figura 4.92, se muestra el estado de los **filos secundarios o diametrales** una vez que se han terminado los ensayos de taladrado, apreciándose un descascarillamiento brusco del  $\mu\text{AlTiN}$ , y del  $\text{TiAlSiN}$ .



**Figura 4.92.** Imágenes de los filos diametrales al finalizar los ensayos de taladrado

Como ya se vio en los resultados individuales, el **daño en la superficie de desprendimiento** del recubrimiento AlTiCrN, es el que muestra peores resultados, llegando incluso a la rotura. Los recubrimientos que sufren un menor desgaste son el  $\mu$ AlTiN, TiAlCrN y el AlCrN (ver Tabla 4.25).

RECUBRIMIENTO	HERRAMIENTA	PERFIL ZONA DE DESPRENDIMIENTO
$\mu$ AlTiN		
TiAlCrN		
AlTiCrN		
TiAlSiN		
AlCrN		

**Tabla 4.25.** Tabla comparativa del perfil de la zona de desprendimiento para los diferentes recubrimientos ensayados en la Fase I

Por último se muestra en la Tabla 4.26, una comparación de los resultados obtenidos en todas las pruebas realizadas.

		AICrSiN	μAITiN	TiAlCrN	AlTiCrN	TiAlSiN	AlCrN
Microscopio de barrido SEM	Desgaste de cráter	NO	--	NO	NO	-	---
	Grado de adhesión	+	++	--	---	+++	-
	Separación acero adherido del recubrimiento	-	--	+++	+	---	++
	Salto en la desaparición del recubrimiento	---	+++	+	--	++	-
Ensayos de taladrado	Desgaste de flanco	-	++	--	---	+++	+
	Evolución de los esfuerzos	+	+++	--	---	++	-
	Rugosidad en la zona de desprendimiento	+	+++	--	---	++	-
	Enmarañamiento de viruta	+	++	--	---	+++	-
	Grado de adhesión	+	++	--	---	+++	-
Microsc. óptico							
	Salto bruscos		---			+++	++

**Aclaraciones:**

- Mejor: +++
- Peor: ---
- Desgaste de cráter. --- será el recubrimiento con mayor cráter.
- Separación de acero adherido. --- será el recubrimiento que más separado está del acero adherido.
- Salto. --- será el que mayor salto tenga.

**Tabla 4.26.** Tabla comparativa de las propiedades ensayadas para los diferentes recubrimientos

De todas las comparativas que se realizan en este punto, se puede deducir el orden de los recubrimientos que mejor trabajan en las condiciones de ensayo son: 1º TiAlSiN, 2º μAITiN, 3º AlCrSiN, 4º AlCrN, 5º TiAlCrN y 6º AlTiCrN.

Atendiendo a los resultados generales, se puede ver que el comportamiento no ha sido el esperado y por lo tanto los resultados obtenidos en estos ensayos no son extrapolables a la operación real, ya que las condiciones de ensayo son extremas. Para que se vea mejor la razón por la cual no se puede realizar tal afirmación se comparan los datos que se conocían de ensayos anteriores y de la operación real, con los resultados experimentales.

Por una parte, se sabe que el recubrimiento que actualmente está siendo utilizado es el AlCrSiN, que en este caso, con la misma herramienta no soportó tales condiciones y necesitó varios procesos que rebajasen la rugosidad para poder trabajar en las condiciones de ensayo. Aunque sí es cierto que eso puede ser achacado a la diferencia de dureza y parámetros, y que después su funcionamiento ha sido bueno. Además, el comportamiento sobresaliente del  $\mu$ AlTiN no se esperaba debido a que atendiendo a los resultados previos tanto sobre el 16CrMn5 como sobre el propio 42CrMo4 pero con otras condiciones de corte, el AlCrSiN y el TiAlCrN deberían presentar mejores resultados.

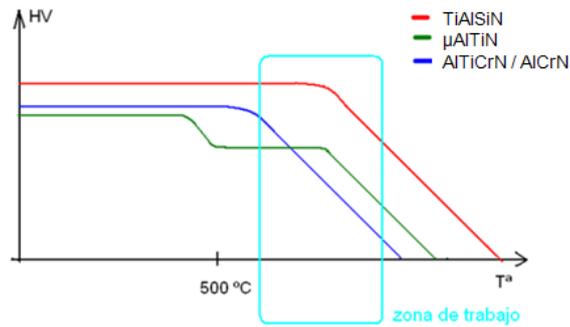
Estos resultados, no son totalmente concluyentes ya que pueden influir diversos factores en el comportamiento pero la razón que obliga a imposibilitar la validación es que en condiciones reales el motivo de fallo era en general la aparición de cráteres en la zona de desprendimiento y en nuestros ensayos sólo han aparecido en el  $\mu$ AlTiN y en el TiAlSiN de muy reducido tamaño.

Como ya se había previsto esta posibilidad, a partir de este momento se buscará un recubrimiento que permita trabajar a mayor velocidad de corte y avance. En este caso los ensayos han arrojado información suficiente como para asegurar que el TiAlSiN y el  $\mu$ AlTiN tienen un buen comportamiento en todos los sentidos del desgaste ante condiciones de corte extremas.

El problema que plantean las condiciones de corte extremas en los procesos de mecanizado es la temperatura alcanzada debido a que provoca, entre otros, la degradación de los recubrimientos, sobre todo en cuanto a tres propiedades básicas, que son **dureza, resistencia a la oxidación y afinidad química**. Además, estas son propiedades que juegan un papel vital en los recubrimientos con aplicación en taladrado.

Otro problema es que las propiedades de cada recubrimiento varían con respecto a la temperatura de una forma que no tiene por qué coincidir con la forma de variación de otros recubrimientos, pudiendo hacer que el recubrimiento que a 100 °C se comportaba mejor que los demás, pase a comportarse peor trabajando a 600 °C.

En la Figura 4.93 se ve la forma en la que varía la dureza a medida que se eleva la temperatura, en algunos de los recubrimientos. Se debe tener en cuenta que son curvas cualitativas, y que variarían ante cualquier variación en la composición o parámetros de recubrimiento.



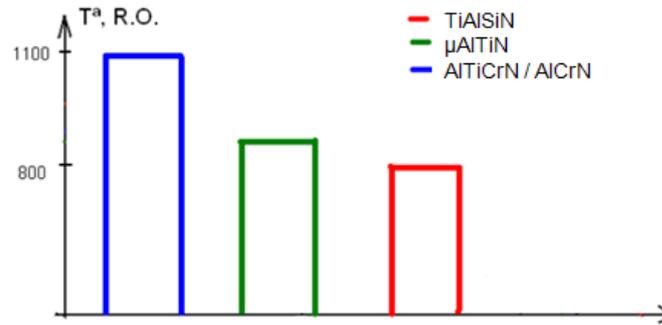
**Figura 4.93.** Evolución de la dureza con la temperatura para distintos recubrimientos

Por lo tanto, en función de la temperatura de trabajo el recubrimiento tendrá una u otra dureza y se desgastará en mayor o menor medida. En general, todos los recubrimientos tienden a reducir su dureza al aumentar la temperatura. Sin embargo, hay dos fenómenos característicos, que pueden afectar a nuestros ensayos, y son los siguientes:

- El TiAlSiN a parte de poseer mayor dureza de por sí, también mantiene su dureza a altas temperaturas mejor que otros. Por lo tanto, en nuestra aplicación a altas temperaturas, tendrá mucha más dureza que los demás y por tanto se desgastará menos.
- Si en una aplicación genérica de taladrado, en la que la temperatura no supera los 300 °C, el AlCrN, TiAlCrN y AlTiCrN poseen mayor dureza que el  $\mu$ AlTiN, a partir de los 550°C esto se invierte, debido a que este último aumenta su resistencia al ablandarse.

Cuando la dureza del TiAlSiN es prácticamente la misma que a temperatura ambiente, la del AlTiCrN o TiAlCrN ha descendido alrededor del 50%, de modo que comparativamente trabajarán mucho peor. Esto podría explicar por qué el TiAlSiN se comporta mucho mejor que los demás.

También se entiende con esto el porqué del mejor comportamiento del  $\mu$ AlTiN frente al TiAlCrN o AlTiCrN y AlCrN. Aunque a la temperatura de trabajo habitual su dureza es inferior, a la temperatura del ensayo acelerado es al revés.



**Figura 4.94.** Evolución de la resistencia a la oxidación con la temperatura para distintos recubrimientos

La resistencia a la oxidación varía con la temperatura y el recubrimiento (ver Figura 4.94) y como en el caso anterior, esto afectará más o menos según a qué temperatura estemos trabajando. Lo deseable es que el recubrimiento no se oxide, porque de ser así, su composición se verá alterada y por lo tanto también las propiedades. En este caso podría haberse oxidado alguno de los recubrimientos cambiando sus características.

Aún no se conocen las características ni el comportamiento de los recubrimientos oxidados, ni si esto afecta de manera positiva o negativa pero esto podría ser otra de las causas por las cuales el comportamiento relativo de los recubrimientos conocido para las condiciones de trabajo reales no coincida con el obtenido en las condiciones de ensayo de desgaste acelerado.

Otro aspecto a tener en cuenta es el fundamento que explica la diferencia de los resultados obtenidos a través de la **afinidad química**, que es similar a lo explicado anteriormente. Si algunos de los componentes del recubrimiento se enlazan con uno de los del acero de trabajo, el recubrimiento pierde propiedades y su comportamiento se ve alterado. La **estabilidad química y térmica** de los materiales es muy diversa, pero en general, con el aumento de la temperatura, mayor es la facilidad de unión entre compuestos.

Si, por ejemplo, se tiene un acero (Fe-C) como material de trabajo, el recubrimiento  $\mu\text{AlTiN}$  es totalmente inerte, es decir, no hay reacciones ni pérdida de propiedades debido a afinidades. Sin embargo, con un recubrimiento como el AlCrN, a 900°C no reacciona con el acero, mientras que a 1000°C el nitrógeno tiende a unirse con los elementos del acero.

Las reacciones entre compuestos podrían también suponer otro factor por el cual el AlTiCrN se podría comportar peor que los demás, o que el  $\mu$ AlTiN trabaje mejor que el AlCrSiN.

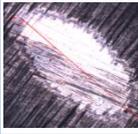
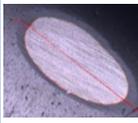
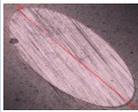
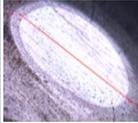
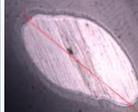
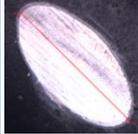
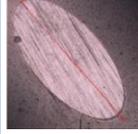
Todas estas razones pueden explicar por qué la diferencia en los comportamientos esperados, y la existencia de una capa de lubricante en la zona de desprendimiento explica por qué hemos pasado de un desgaste predominantemente de cráter a uno abrasivo.

## **4.7. Resultados experimentales y observaciones Fase II**

Una vez que se ha realizado la primera fase de ensayos, y se ha estudiado el comportamiento de los recubrimientos, se procede a una segunda fase.

En la primera fase se ha obtenido que el recubrimiento que mejor comportamiento ha tenido es el TiAlSiN, por ello se va a tratar de buscar un recubrimiento que se comporte igual o mejor trabajando a altas velocidades. Haciendo referencia al punto 4.6.5, el recubrimiento TiAlSiN no es un recubrimiento propio de Metal Estalki, pero que si está realizado con la misma tecnología de PLATIT con la que trabajan. Para hacer esta segunda fase, se recurre al recubrimiento AlTiSiN que si es ofrecido por Metal Estalki. De este recubrimiento se van a estudiar dos variaciones, una es el AlTiSiN+, que es un recubrimiento monocapa con un espesor en probeta de 2  $\mu\text{m}$ , y la segunda variación es el AlTiSiN-, que es también monocapa pero con un espesor en probeta de 1.3  $\mu\text{m}$ .

Aunque la composición del AlTiSiN no es igual a la del TiAlSiN que se quiere reproducir, los componentes químicos utilizados son los mismos.

	Recubrimiento	Espesor (µm)	Microestructura	T <sup>a</sup> (°C)	Dureza (GPa)	Coef. Fric.	Imagen calotest	Post-tratamiento
Fase I	AlCrSiN	2.5	Nanoestructurado	1000	42	0.35		Drag grinding
	µAlTiN	3	Monocapa	900	38	0.3		Drag grinding
	TiAlCrN	2	Nanocapa	850	40	0.55		Drag grinding
	AlTiCrN	4	Nanocapa	850	34	-		Drag grinding
	TiAlSiN	3	Nanoestructurado y multicapa	1200	45	-		Drag grinding
	AlCrN	4	Monocapa	1100	33	-		Drag grinding
Fase II	AlTiSiN +	3	Nanoestructurado y monocapa	1200	45	0.45		Drag grinding
	AlTiSiN -	2	Nanoestructurado y monocapa	1200	45	0.45		Drag grinding

**Tabla 4.27.** Propiedades de los recubrimientos aplicados a la broca, en las Fases I y II

#### 4.7.1. AlTiSiN +

El AlTiSiN es un recubrimiento nanoestructurado que puede tener distintas estructuras. En esta fase II se estudian dos versiones (AlTiSiN + y AlTiSiN -), ambas monocapas, y realizadas en el equipo de recubrimiento PL-50, de modo que no tendrán la capa de adhesión con titanio.

El recubrimiento AlTiSiN +, es muy frágil y al aplicarle el proceso de acabado (Drag grinding), se generan microfracturas en la unión entre la zona de desprendimiento y de incidencia. En algunos puntos, estas fracturas dejan ver el sustrato, y aunque en

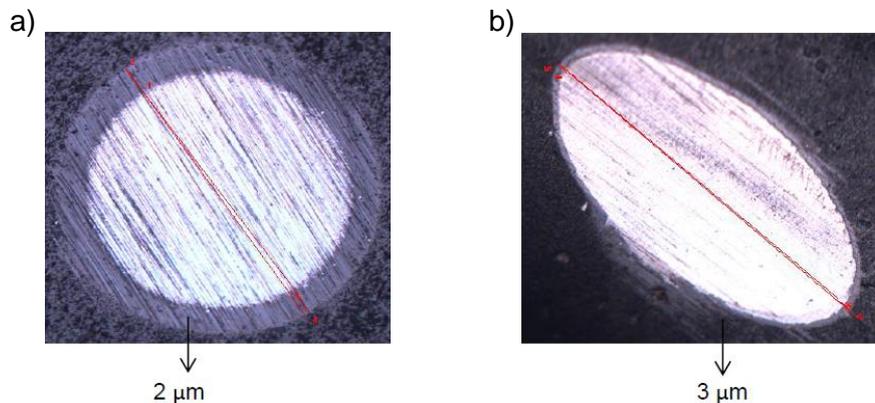
general no afecta de manera drástica al rendimiento de la herramienta, suponen puntos débiles del recubrimiento, pudiendo propagarse a lo largo de la vida útil.

Los principales inconvenientes que presenta esta versión son la ausencia de capa de adhesión y la fragilidad de este material. Además estas propiedades se afectan entre sí, de modo que si el recubrimiento se despega, y encima es frágil, este empieza a descascarillarse más fácilmente. Sin embargo, hay que tener presente, que la superficie del sustrato está previamente tratada para garantizar una buena adhesión aún sin contar con esta capa.

Los resultados con este recubrimiento fueron de un valor de fuerza máxima,  $F_{\text{máx.}}=1400$  N, y un aumento de fuerza,  $\Delta F=300$  N, destacando que los esfuerzos sufren un pico de fuerza inicial y luego se estabiliza. El desgaste de flanco, es mayor que en los casos anteriores, alcanzado  $V_b=0.09$  mm. Este recubrimiento también sufre daño en la superficie de incidencia.

#### 4.7.1.1. Espesor, adhesión y rugosidad

El valor del espesor obtenido con el ensayo calotest, es de  $2\ \mu\text{m}$  en la probeta, y de  $3\ \mu\text{m}$  si se realiza en la broca (ver Figura 4.95).



**Figura 4.95.** Imágenes del calotest del recubrimiento AlTiSiN+: a) sobre probeta; b) sobre broca

La Figura 4.96 muestra la imagen del ensayo Rockwell C, en la que no se puede apreciar ninguna fisura, concluyendo que la adhesión es idónea.

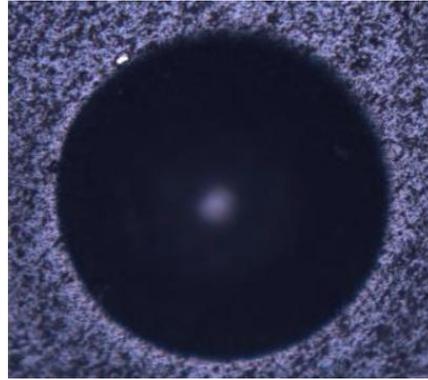


Figura 4.96. Imagen del ensayo Rockwell C del recubrimiento AlTiSiN+

El valor de rugosidad obtenido es de  $0.08 \mu\text{m}$ .

#### 4.7.1.2. Esfuerzos

Con este recubrimiento, se produce un pico inicial, tanto en fuerza de avance máximo, como en par máximo, estabilizándose posteriormente. La fuerza de avance máxima es de 1400N, con un incremento de la fuerza de 300 N (ver Figura 4.97 y Tabla 4.28).

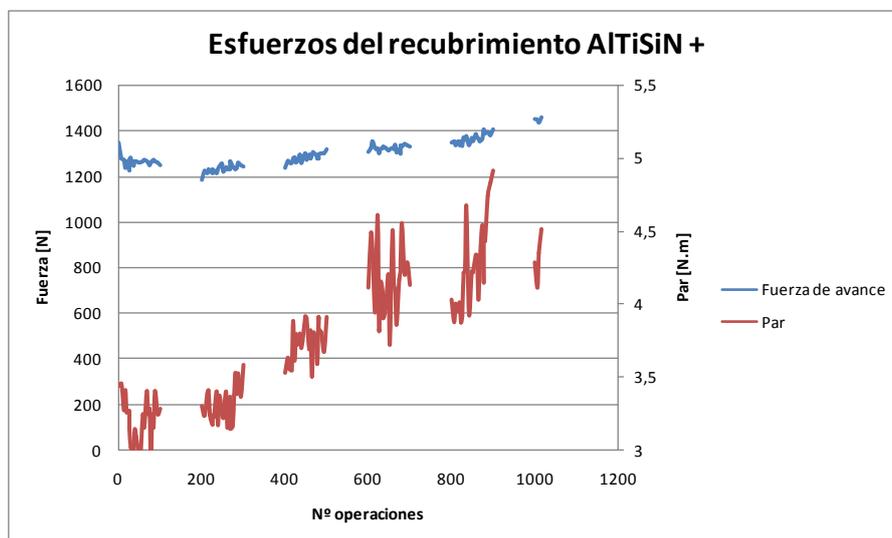


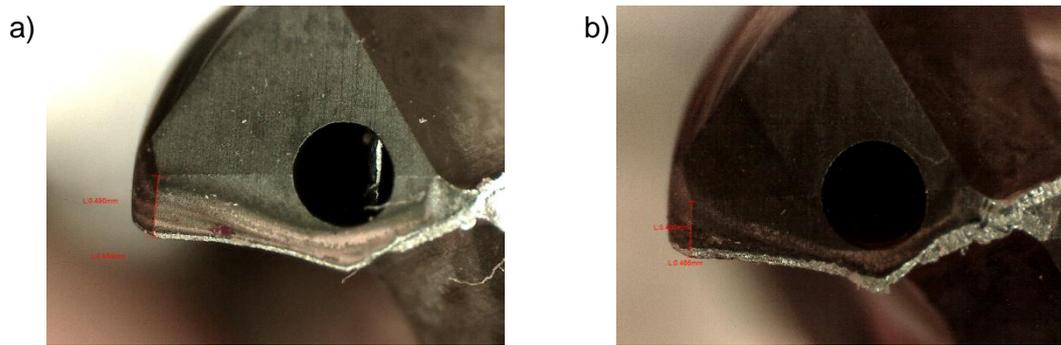
Figura 4.97. Evolución de los esfuerzos máximos de la broca recubierta con AlTiSiN +

Nº Agujero	F máx. (N)	Par (N-m)	Nº Agujero	F máx. (N)	Par (N-m)	Nº Agujero	F máx. (N)	Par (N-m)
1	1344.75	3.44	238	1232.12	3.17	678	1297.38	4.22
8	1277.33	3.45	243	1243.27	3.37	680	1334.33	4.29
12	1268.71	3.27	249	1253.65	3.24	683	1330.96	4.55
16	1234.71	3.41	252	1220.29	3.22	689	1342.56	4.21
20	1264.40	3.26	258	1238.88	3.39	695	1334.69	4.28
25	1224.53	3.27	262	1233.09	3.15	700	1330.50	4.13
27	1268.25	3.14	267	1233.13	3.36	801	1345.08	4.03
30	1278.31	3.02	270	1265.77	3.14	808	1353.67	3.88
35	1246.95	2.99	275	1240.52	3.16	812	1337.38	3.99
38	1263.25	3.14	275	1237.62	3.37	816	1350.46	3.95
43	1263.37	3.09	280	1230.99	3.53	820	1135.61	4.01
49	1258.66	2.97	283	1237.42	3.38	825	1353.80	3.87
52	1261.50	2.91	289	1257.00	3.52	827	1333.18	3.92
58	1265.61	3.24	295	1249.09	3.36	830	1367.38	4.22
62	1271.50	3.15	300	1243.93	3.59	835	1360.85	4.23
67	1264.98	3.40	601	1308.03	4.12	838	1374.54	4.67
70	1257.80	3.24	608	1324.73	4.49	843	1336.78	3.93
75	1250.41	3.28	612	1351.31	4.38	849	1366.78	4.22
78	1261.50	2.91	616	1323.74	3.94	852	1354.74	4.22
80	1265.61	3.24	620	1315.54	4.31	858	1382.49	4.33
83	1271.50	3.15	625	1319.58	4.59	862	1371.62	4.33
89	1264.98	3.40	627	1301.08	3.82	867	1365.55	4.03
95	1257.80	3.24	630	1317.78	4.14	870	1354.33	4.28
100	1250.41	3.28	635	1321.16	4.06	875	1366.03	4.54
201	1185.47	3.29	638	1330.52	3.89	878	1402.39	4.14
208	1221.67	3.24	643	1322.60	3.97	880	1393.07	4.45
212	1213.74	3.38	649	1313.41	3.19	883	1387.60	4.43
216	1230.70	3.40	652	1316.06	3.72	889	1393.06	4.74
220	1220.91	3.24	658	1322.03	3.49	895	1379.14	4.83
225	1228.71	3.17	662	1320.28	4.14	900	1407.93	4.91
227	1213.34	3.24	667	1336.79	4.09	1001	1448.58	4.29
230	1225.55	3.22	670	1304.55	3.86	1008	1447.19	4.11
235	1212.14	3.39	675	1316.81	4.17	1012	1436.62	4.35
						1016	1457.16	4.51

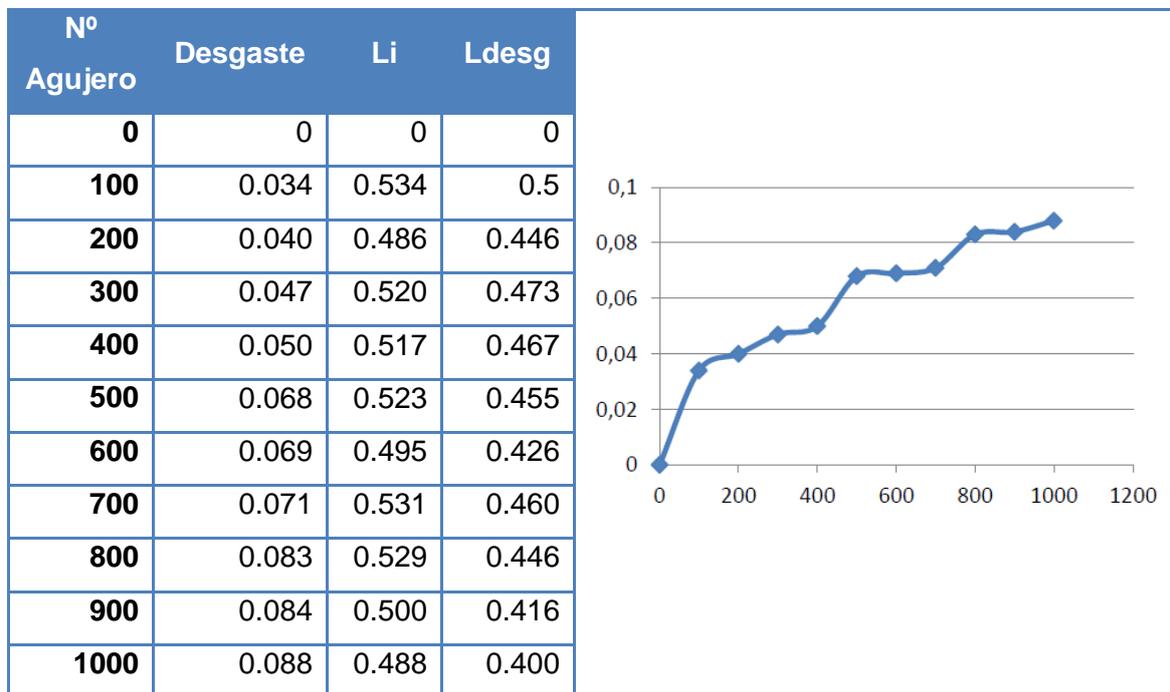
**Tabla 4.28.** Valores de la evolución de la fuerza y del par máximo a medida que se realizan taladros con la broca recubierta con AlTiSiN +

#### 4.7.1.3. Desgaste de flanco

En la Tabla 4.29 se muestra la evolución del desgaste de flanco a medida que se realizaban agujeros con las brocas recubiertas. En la Figura 4.98 se puede ver la evolución del desgaste, haciendo una comparativa entre los 100 agujeros realizados, y al de 1000 agujeros.



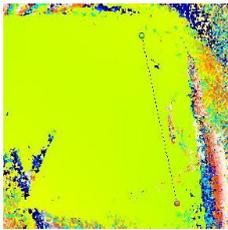
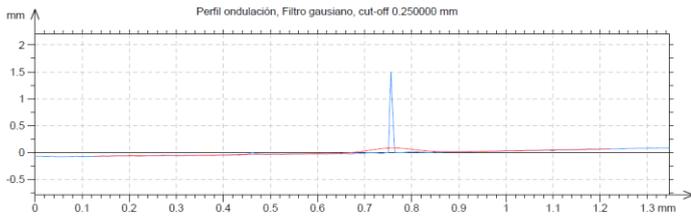
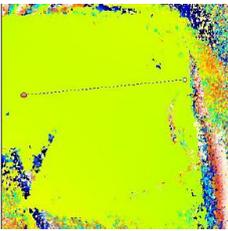
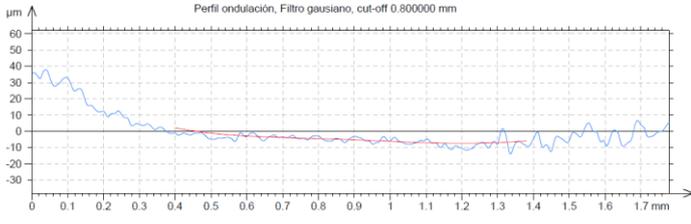
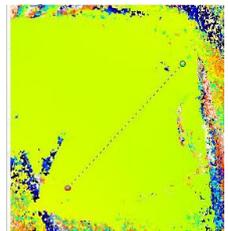
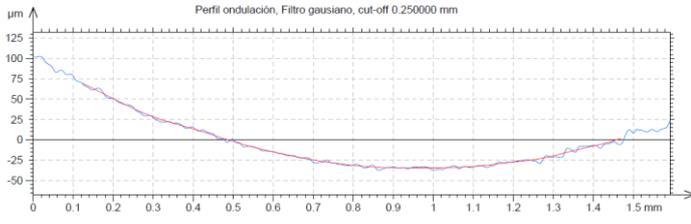
**Figura 4.98.** Desgaste de flanco del recubrimiento AlTiSiN +: a) al de 100 agujeros; b) al de 1000 agujeros



**Tabla 4.29.** Valores obtenidos para el desgaste de flanco del recubrimiento AlTiSiN+

#### 4.7.1.4. Daño en la superficie de desprendimiento

En la Tabla 4.30 se muestra la topografía de la superficie de desprendimiento de la broca analizada. En ella se han obtenido diferentes perfiles de rugosidad en direcciones diferentes de esta superficie.

		<b>Ra</b> 0.02 $\mu\text{m}$
		<b>Rz</b> 0.18 $\mu\text{m}$
		<b>Rt</b> 1.31 $\mu\text{m}$
		<b>Ra</b> 1.26 $\mu\text{m}$
		<b>Rz</b> 5.80 $\mu\text{m}$
		<b>Rt</b> 14.18 $\mu\text{m}$
		<b>Ra</b> 1.20 $\mu\text{m}$
		<b>Rz</b> 5.81 $\mu\text{m}$
		<b>Rt</b> 13.01 $\mu\text{m}$

**Tabla 4.30.** Diferentes perfiles de rugosidad de la superficie de desprendimiento

#### 4.7.2. AlTiSiN –

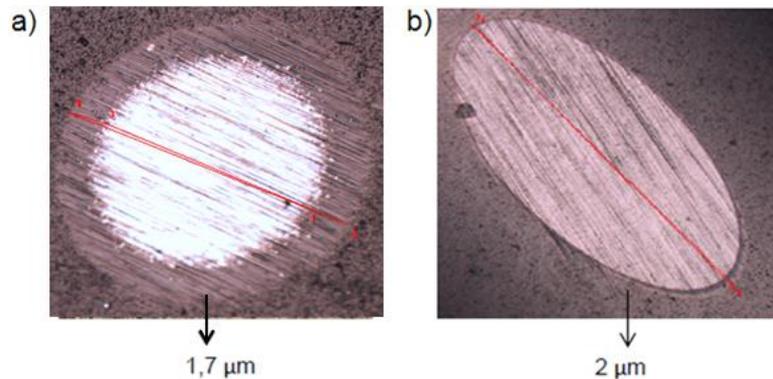
Como en el caso anterior, es un recubrimiento nanoestructurado y monocapa, realizado en el equipo PL-50.

Esta versión del recubrimiento AlTiSiN, tiene menor espesor respecto a la versión anterior, generando menos fracturas en la arista. Esta versión se realizó con la intención de que al haber menos espesor, se formaran menos droplets, que son los causantes de las fracturas. Al tener partículas salientes y ser el material frágil, en la máquina de acabado (Drag grinding) se producen múltiples roturas que dejan al descubierto el material del sustrato y pueden provocar problemas durante el mecanizado.

Los resultados son peores que la versión con mayor espesor, confirmando que este acabado no tiene especial influencia en su rendimiento. Se obtienen valores de fuerza máxima de 1500 N, y un aumento de fuerza de 450 N, teniendo la misma situación que el recubrimiento anterior: un pico de fuerza inicial que se estabiliza posteriormente. El valor de desgaste de flanco alcanzado es de 0.12 mm, y los daños en la superficie de desprendimiento también son mayores.

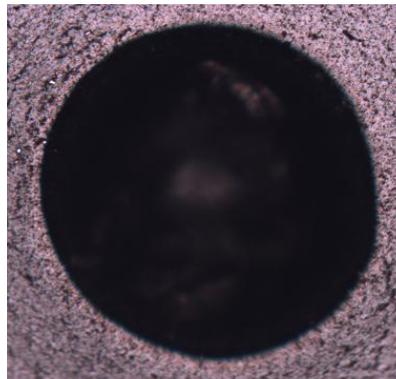
#### 4.7.2.1. Espesor, adhesión y rugosidad

El espesor que se obtiene tras la realización del calotest es de  $1.7 \mu\text{m}$  en la probeta, y  $2 \mu\text{m}$  en la broca recubierta (ver Figura 4.99).



**Figura 4.99.** Imagen del calotest del recubrimiento AlTiSiN-: a) sobre probeta; b) sobre broca

Con el estudio del ensayo Rockwell C, no se observa ninguna fisura, concluyendo que el recubrimiento tiene una adhesión idónea (ver Figura 4.100).



**Figura 4.100.** Imagen del ensayo Rockwell C del recubrimiento AlTiSiN-

El valor de la rugosidad obtenida es de  $0.07 \mu\text{m}$ .

#### 4.7.2.2. Esfuerzos

Con este recubrimiento, se produce un pico inicial, tanto en fuerza de avance máximo, como en par máximo, estabilizándose posteriormente. En la Figura 4.101, se muestran gráficamente los resultados de los esfuerzos máximos obtenidos durante las operaciones de taladrado, mientras que en la Tabla 4.31, se indican los valores numéricos, obteniendo un valor medio de fuerza máxima de  $1500 \text{ N}$ , y un incremento

de 450N. Comparando este resultado con el anterior recubrimiento, que consta de la misma composición, pero con mayor espesor, se obtienen peores resultados.

Nº Agujero	F máx. (N)	Par (N·m)	Nº Agujero	F máx. (N)	Par (N·m)	Nº Agujero	F máx. (N)	Par (N·m)
1	1198.93	3.27	235	1242.26	3.47	670	1451.13	5.57
8	1177.89	3.38	238	1265.67	3.73	675	1448.09	4.68
12	1182.93	3.43	243	1257.73	3.62	678	1472.79	6.04
16	1171.03	3.22	249	1262.68	3.58	680	1478.04	6.53
20	1173.49	3.16	252	1242.98	3.51	683	1444.51	4.93
25	1155.64	3.29	258	1272.78	3.51	689	1468.69	4.91
27	1166.09	3.09	262	1257.35	3.69	695	4170.09	4.92
30	1157.49	3.23	267	1274.68	3.79	700	1470.05	6.25
35	1156.67	3.36	270	1296.57	3.53	827	1469.75	4.99
38	1158.48	3.19	275	1284.18	3.54	830	1439.40	4.60
43	1157.29	3.10	278	1284.96	3.65	835	1470.94	4.85
49	1148.28	3.15	280	1294.32	3.61	838	1483.36	5.25
52	1157.44	3.22	283	1321.70	3.78	843	1496.76	4.93
58	1154.67	3.13	289	1299.27	3.79	849	1473.68	4.92
62	1160.40	3.14	295	1321.64	3.61	852	1464.81	4.82
67	1161.68	3.36	300	1316.87	3.78	858	1480.66	5.29
70	1148.27	3.28	601	1351.57	3.79	862	1509.36	5.21
75	1166.84	3.22	608	1351.51	4.17	867	1485.28	5.14
78	1148.10	3.22	612	1383.67	4.29	870	1481.05	4.63
80	1151.34	3.23	616	1407.72	4.35	875	1493.99	5.13
83	1146.32	3.27	620	1410.13	4.95	878	1486.80	5.55
89	1175.16	3.26	625	1372.46	4.39	880	1490.81	5.00
95	1178.05	3.24	627	1399.47	4.75	883	1516.57	4.92
100	1157.70	3.23	630	1401.63	4.45	889	1495.26	4.69
201	1204.71	3.29	635	1405.71	4.46	895	1494.31	4.84
208	1224.36	3.38	638	1415.74	4.44	900	1475.86	5.24
212	1241.04	3.46	643	1473.82	6.27	1001	1479.91	5.00
216	1240.21	3.35	649	1432.87	4.45	1008	1494.61	4.73
220	1232.52	3.52	652	1406.06	4.36	1012	1487.52	4.93
225	1236.15	3.47	658	1428.45	5.32	1016	1524.36	5.39
227	1245.06	3.47	662	1458.08	4.81	1020	1527.66	5.25
230	1241.03	3.73	667	1433.42	4.52	1025	1503.25	5.25

**Tabla 4.31.** Valores de la evolución de la fuerza y del par máximo a medida que se realizan taladros con la broca recubierta con AlTiSiN –

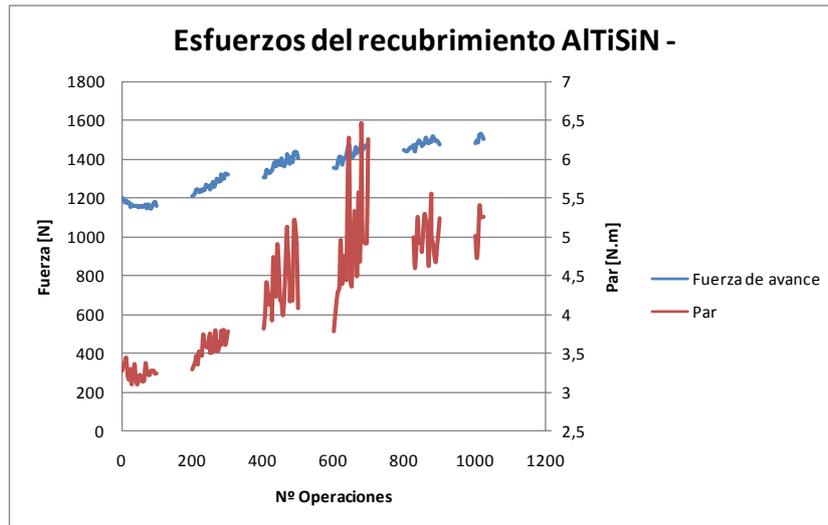


Figura 4.101. Evolución de los esfuerzos de la broca recubierta con AlTiSiN –

#### 4.7.2.3. Desgaste de flanco

En la Tabla 4.32, se muestra la evolución del desgaste de flanco a medida que se realizaban agujeros con las brocas recubiertas.

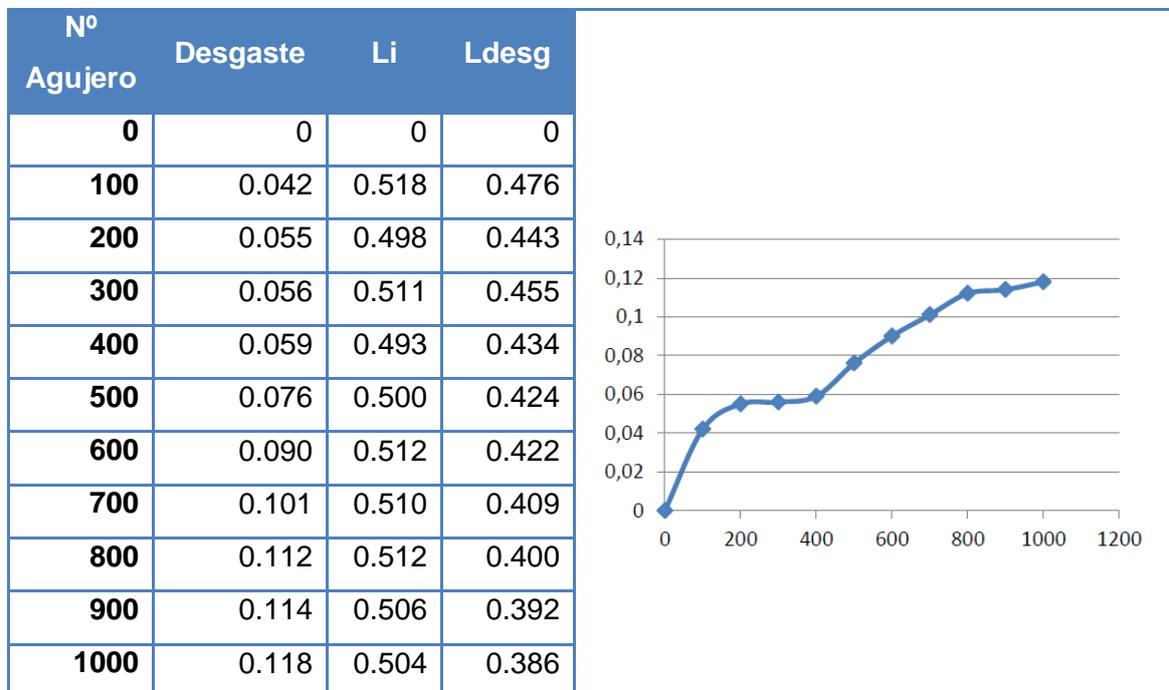
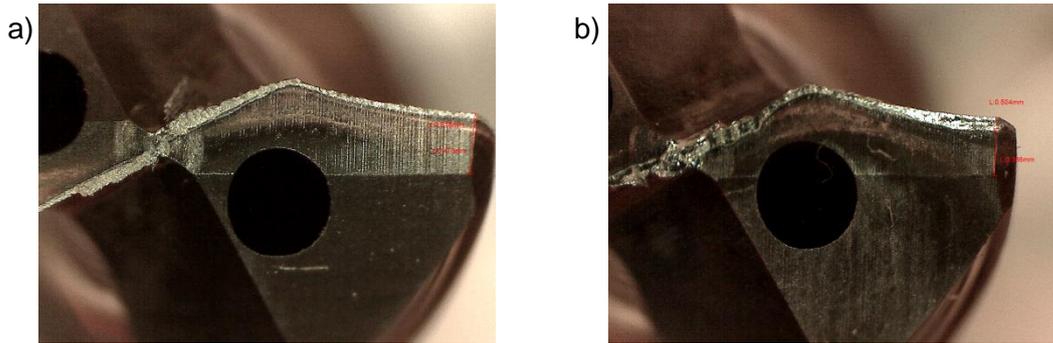


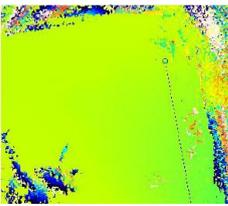
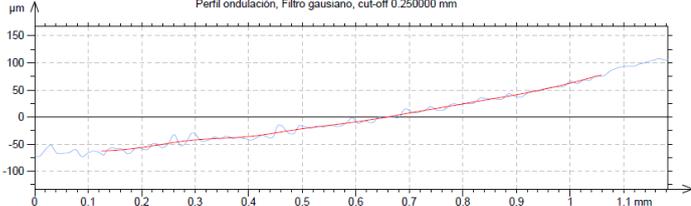
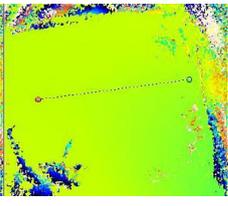
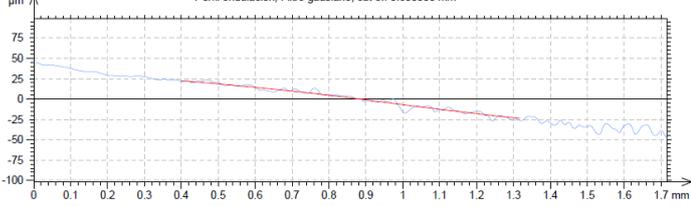
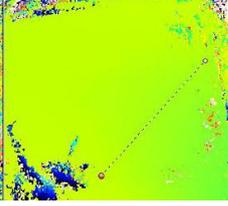
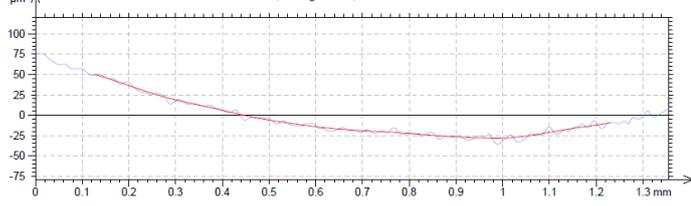
Tabla 4.32. Valores obtenidos para el desgaste de flanco del recubrimiento AlTiSiN -



**Figura 4.102.** Desgaste de flanco del recubrimiento AlTiSiN -: a) al de 100 agujeros; b) al de 1000 agujeros

#### 4.7.2.4. Daño en la superficie de desprendimiento

En la Tabla 4.33 se muestra la topografía de la superficie de desprendimiento de la broca analizada. En ella se han obtenido diferentes perfiles de rugosidad en direcciones diferentes de esta superficie.

	<p>Perfil ondulación, Filtro gaussiano, cut-off 0.250000 mm</p> 	<p><b>Ra</b> 3.04 <math>\mu\text{m}</math></p> <p><b>Rz</b> 15.58 <math>\mu\text{m}</math></p> <p><b>Rt</b> 22.56 <math>\mu\text{m}</math></p>
	<p>Perfil ondulación, Filtro gaussiano, cut-off 0.800000 mm</p> 	<p><b>Ra</b> 1.39 <math>\mu\text{m}</math></p> <p><b>Rz</b> 6.64 <math>\mu\text{m}</math></p> <p><b>Rt</b> 12.91 <math>\mu\text{m}</math></p>
	<p>Perfil ondulación, Filtro gaussiano, cut-off 0.250000 mm</p> 	<p><b>Ra</b> 1.75 <math>\mu\text{m}</math></p> <p><b>Rz</b> 8.51 <math>\mu\text{m}</math></p> <p><b>Rt</b> 12.65 <math>\mu\text{m}</math></p>

**Tabla 4.33.** Diferentes perfiles de rugosidad de la superficie de desprendimiento

### 4.7.3. Conclusiones Fase II

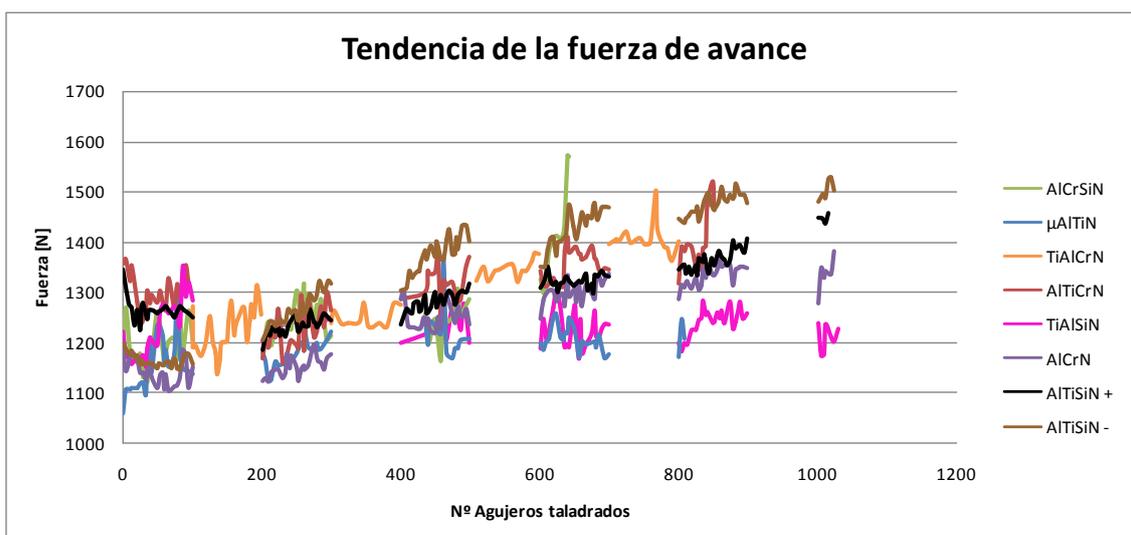
Una vez que se han obtenidos resultados experimentales de esta fase, se procede a compararlos con los obtenidos en la primera fase, para comprobar si se ha conseguido mejorar los resultados previos.

Las **tensiones residuales** de los recubrimientos ensayados en este estudio, se obtienen mediante las probetas diseñadas para este trabajo (ver Tabla 4.34).

Fase	Recubrimiento	$\sigma_1$ [GPa]	$\sigma_2$ [GPa]	$\sigma_3$ [GPa]	$\sigma_4$ [GPa]	$\sigma_{media}$ [GPa]
I	AlCrSiN	6.56	6.94	7.20	6.71	6.85
	$\mu$ AlTiN	2.83	2.96	3.50	3.10	3.09
	TiAlCrN	5.50	5.10	4.80	4.86	5.07
II	AlTiSiN +	4.89	5.02	4.97	4.87	4.94
	AlTiSiN -	4.39	4.89	5.32	4.57	4.79

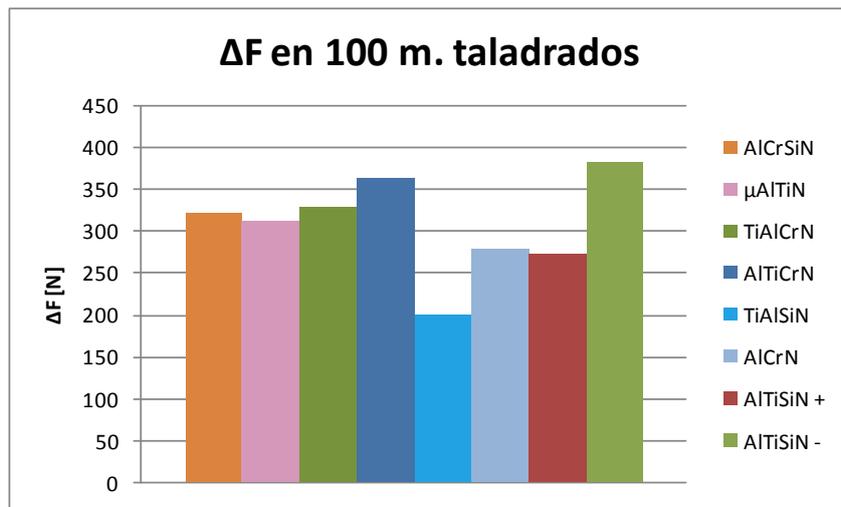
**Tabla 4.34.** Tensiones residuales de los recubrimientos ensayados en las Fases I y II

En cuanto a la **fuerza de avance**, se observa que los recubrimientos ensayados en esta fase, no mejoran los resultados obtenidos en la primera fase por los recubrimientos TiAlSiN, y  $\mu$ AlTiN, que son los recubrimientos con menor magnitud de esfuerzos y cuyo aumento es menos significativo (ver Figura 4.103).



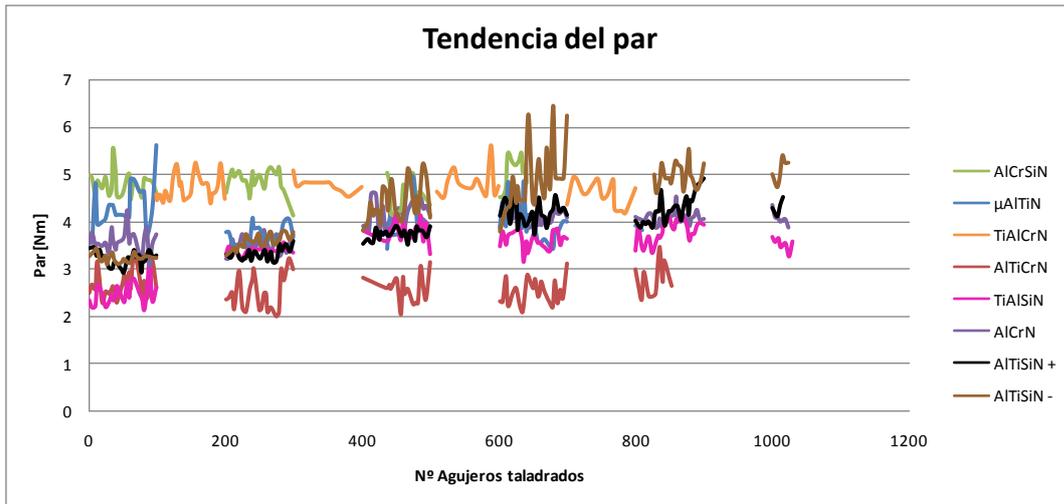
**Figura 4.103.** Gráfica comparativa de la fuerza de avance de los recubrimientos de la Fase I y II

En lo referente al aumento de la fuerza de avance, al realizar una longitud de 100 m en taladros (ver Figura 4.104), el que mejor comportamiento muestra sigue siendo el recubrimiento TiAlSiN. En lo referente a los recubrimientos tratados en esta segunda fase, el AlTiSiN +, muestra un menor aumento de la fuerza que el resto de los recubrimientos ensayados, exceptuando el TiAlSiN. El recubrimiento AlTiSiN -, si ya muestra un valor de fuerza de avance muy alto, el aumento de las fuerzas es también alto, siendo el que peor resultado muestra, de todos los recubrimientos ensayados, hasta esta fase.



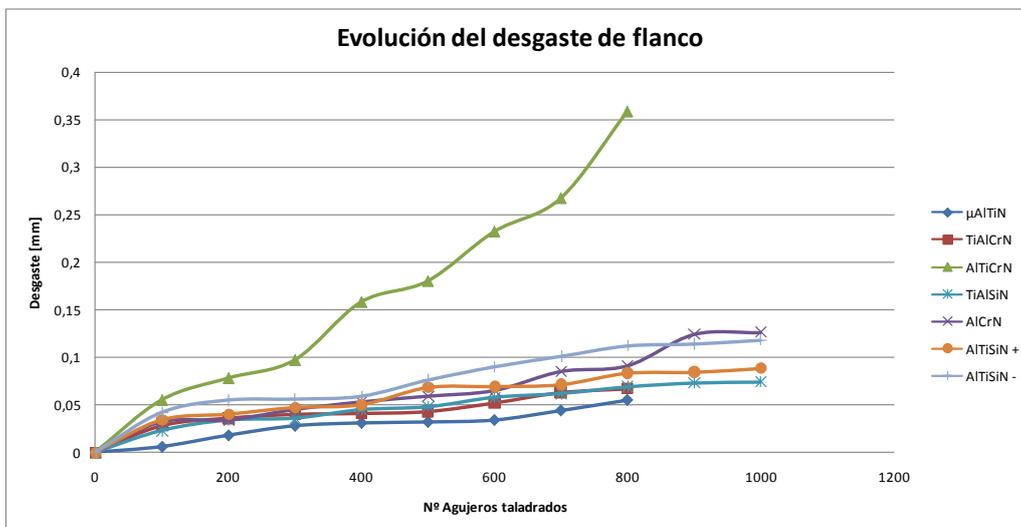
**Figura 4.104.** Gráfica comparativa del aumento de la fuerza de avance al realizar 100 m de taladrado

Se puede decir lo mismo de la tendencia del **par** durante el taladrado que de la fuerza de avance, y es que los nuevos recubrimientos ensayados no mejoran los mejores resultados obtenidos de la fase I.



**Figura 4.105.** Gráfica comparativa de la tendencia del par en el taladrado de los recubrimientos de la Fase I y II

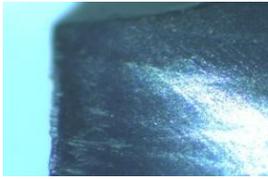
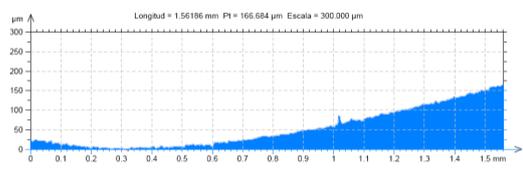
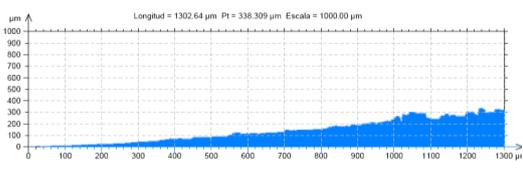
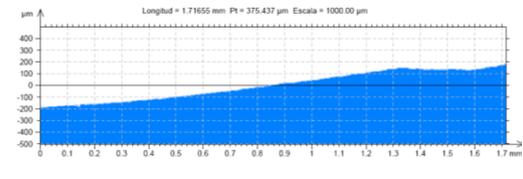
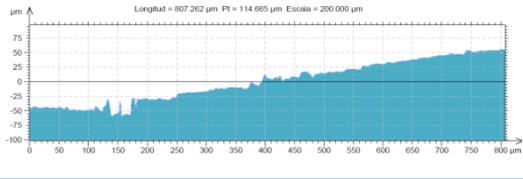
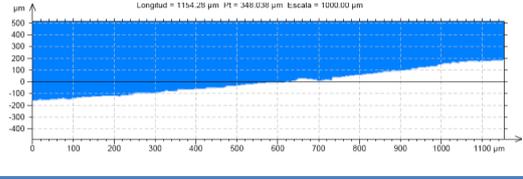
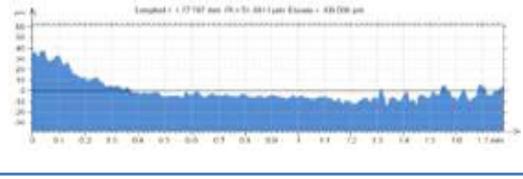
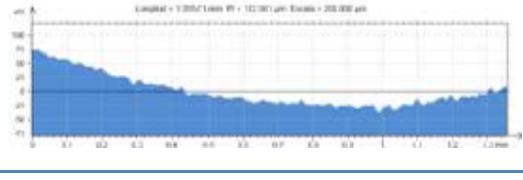
Los recubrimientos AlTiSiN+ y AlTiSiN- tienen una buena evolución del **desgaste de flanco** (ver Figura 4.106), pese a ello, los recubrimientos TiAlSiN y  $\mu$ AlTiN, siguen teniendo un mejor comportamiento respecto a todos los demás.



**Figura 4.106.** Gráfica comparativa del desgaste de flanco de las brocas recubiertas en la Fase I y II

En la Tabla 4.35 se muestra una comparación del **daño de la superficie de desprendimiento** de las distintas brocas recubiertas, mostrando los perfiles más significativos de la zona de desprendimiento, acompañados de una foto para una mejor orientación e inspección visual. En esta comparación se reafirma que el recubrimiento AlTiCrN sigue mostrando los peores resultados, seguidos de las dos

versiones del AlTiSiN ensayadas en esta segunda fase. Por lo tanto, los mejores resultados siguen siendo los recubrimientos TiAlSiN y  $\mu$ AlTiN, que apenas muestran daño, pudiendo seguir trabajando bajo las condiciones ensayadas.

FASE	RECUBRIMIENTO	HERRAMIENTA	PERFIL ZONA DE DESPRENDIMIENTO
I	$\mu$ AlTiN		
	TiAlCrN		
	AlTiCrN		
	TiAlSiN		
	AlCrN		
II	AlTiSiN +		
	AlTiSiN -		

**Tabla 4.35.** Comparación de la superficie de desprendimiento de los diferentes recubrimientos de la Fase I y II

Tras analizar todos los análisis realizados en esta Fase II, y comparándolos con los obtenidos en la Fase I, se puede concluir que en esta fase no se ha realizado ningún recubrimiento que mejore las características obtenidas en la primera fase por los recubrimientos  $\mu\text{AlTiN}$ , y  $\text{TiAlSiN}$ .

#### 4.8. Resultados experimentales y observaciones Fase III

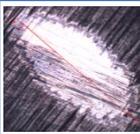
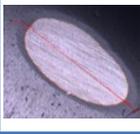
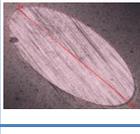
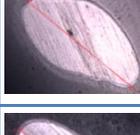
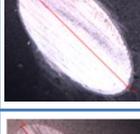
	Recubrimiento	Espesor ( $\mu\text{m}$ )	Microestructura	T <sup>a</sup> (°C)	Dureza (GPa)	Coef. Fric.	Imagen calotest	Post-tratamiento
Fase I	AlCrSiN	2.5	Nanoestructurado	1000	42	0.35		Drag grinding
	$\mu\text{AlTiN}$	3	Monocapa	900	38	0.3		Drag grinding
	TiAlCrN	2	Nanocapa	850	40	0.55		Drag grinding
	AlTiCrN	4	Nanocapa	850	34	-		Drag grinding
	TiAlSiN	3	Nanoestructurado y multicapa	1200	45	-		Drag grinding
	AlCrN	4	Monocapa	1100	33	-		Drag grinding
Fase II	AlTiSiN +	3	Nanoestructurado y monocapa	1200	45	0.45		Drag grinding
	AlTiSiN -	2	Nanoestructurado y monocapa	1200	45	0.45		Drag grinding
Fase III	AlTiSiN Mejorado	3	Nanoestructurado y multicapa	1200	45	0.45		Drag grinding

Tabla 4.36. Propiedades de los recubrimientos aplicados a la broca, en las Fases I, II y III

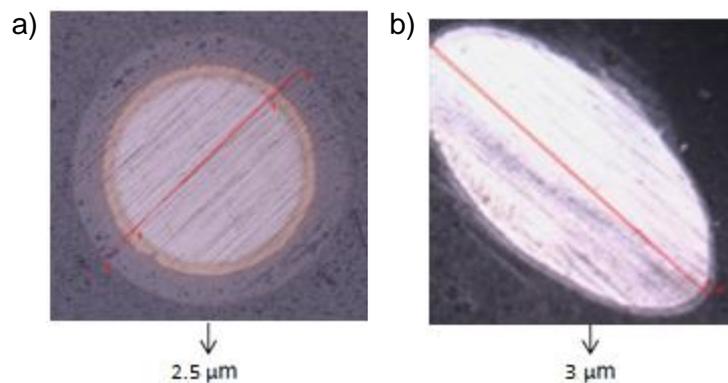
Dado que en la Fase II no se ha conseguido obtener un recubrimiento que mejore los resultados obtenidos por el  $\mu\text{AlTiN}$  y por el  $\text{TiAlSiN}$  con ninguna de las dos variaciones del  $\text{AlTiSiN}$  realizadas. Siguiendo en la misma línea de investigación del recubrimiento  $\text{AlTiSiN}$ , se decide obtener una mejor versión del que se realiza en Metal Estalki.

#### 4.8.1. $\text{AlTiSiN}$ Mejorado

El  $\text{AlTiSiN}$  Mejorado, continúa siendo un recubrimiento nanoestructurado, pero multicapa, con un diseño nuevo respecto a las dos versiones de la Fase II, tratando de evitar las fracturas y su posible propagación. Este nuevo diseño, consta de una primera capa de adhesión de titanio, una capa intermedia tenaz, y una capa exterior con una gran dureza y estabilidad térmica. Está realizado en el equipo  $\pi\text{-80}$ , con un post-tratamiento de diez minutos (Drag grinding).

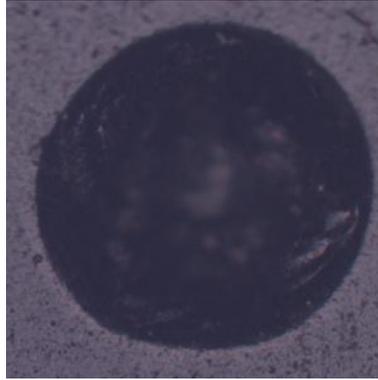
##### 4.8.1.1. Espesor, adhesión y rugosidad

Realizando el ensayo de calotest, se obtiene un espesor de  $2.5\ \mu\text{m}$  en la probeta, y un espesor de  $3\ \mu\text{m}$  al realizarlo sobre la broca (ver Figura 4.107).



**Figura 4.107.** Imagen del calotest del recubrimiento  $\text{AlTiSiN}$ -Mejorado

En la Figura 4.108 se observa la imagen obtenida al realizar el ensayo Rockwell C, en la que no se aprecia ninguna fisura, por lo que se concluye que la adhesión es idónea.

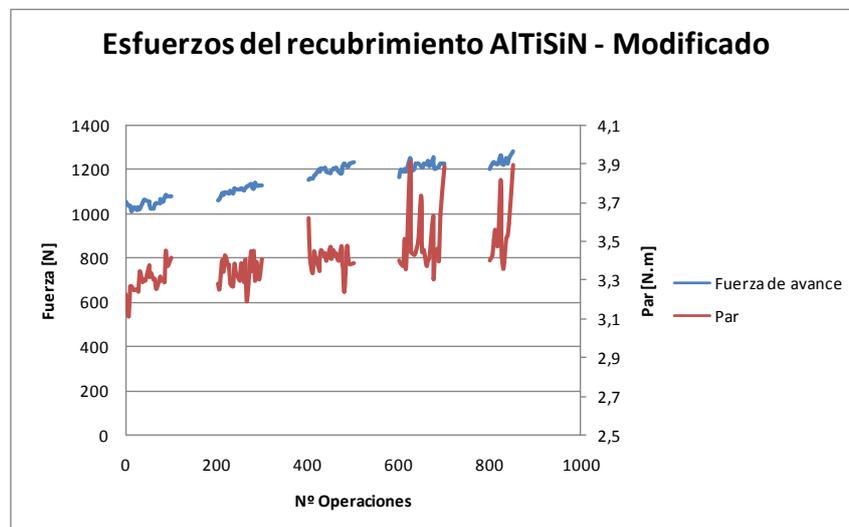


**Figura 4.108.** Imagen del ensayo Rockwell C del recubrimiento AlTiSiN-Mejorado

Por último se obtiene el valor de la rugosidad en la broca de  $0.06 \mu\text{m}$ .

#### 4.8.1.2. Esfuerzos

La fuerza de avance máxima que alcanza este recubrimiento es de 1200 N, con un aumento de la fuerza de 300N (ver Tabla 4.37 y Figura 4.109).



**Figura 4.109.** Evolución de los esfuerzos de la broca recubierta con AlTiSiN-Mejorado

Nº Agujero	F máx. (N)	Par (N-m)	Nº Agujero	F máx. (N)	Par (N-m)	Nº Agujero	F máx. (N)	Par (N-m)
1	1053.03	3.22	251	1111.13	3.32	601	1167.56	3.40
5	1036.36	3.11	255	1113.05	3.39	605	1198.45	3.39
10	1033.01	3.27	260	1106.56	3.29	610	1188.72	3.37
13	1013.96	3.27	263	1117.35	3.40	613	1199.58	3.51
20	1027.24	3.25	267	1124.08	3.19	617	1191.92	3.37
25	1019.92	3.25	275	1131.30	3.44	625	1250.19	3.91
26	1029.57	3.24	276	1125.95	3.35	626	1193.76	3.45
30	1021.19	3.34	280	1113.39	3.45	630	1195.25	3.44
35	1049.68	3.29	285	1137.86	3.30	635	1204.50	3.43
38	1062.33	3.30	288	1125.44	3.39	638	1224.35	3.45
42	1062.29	3.30	292	1125.47	3.31	642	1227.36	3.51
50	1051.01	3.37	300	1128.94	3.41	650	1214.20	3.73
51	1043.21	3.32	401	1151.33	3.62	651	1211.29	3.45
55	1023.99	3.34	405	1160.29	3.41	655	1225.28	3.45
60	1025.00	3.31	410	1160.92	3.34	660	1224.59	3.37
63	1041.47	3.31	413	1170.63	3.44	663	1238.05	3.40
67	1045.17	3.25	417	1179.65	3.42	667	1215.36	3.41
75	1050.77	3.32	425	1203.60	3.45	675	1254.08	3.63
76	1066.94	3.29	426	1187.62	3.41	676	1222.63	3.31
80	1055.28	3.31	430	1204.29	3.45	680	1203.82	3.42
85	1072.17	3.29	435	1203.73	4.43	685	1208.75	3.46
88	1085.26	3.45	438	1208.14	3.44	688	1214.28	3.40
92	1076.62	3.37	442	1190.56	3.40	692	1226.14	3.64
100	1080.65	3.41	450	1183.77	3.47	700	1227.50	3.89
201	1063.06	3.28	451	1187.62	3.41	801	1201.22	3.60
205	1067.28	3.25	455	1204.29	3.45	805	1226.29	3.43
210	1093.19	3.40	460	1203.73	3.43	810	1231.20	3.60
213	1086.21	3.35	463	1208.14	3.44	813	1226.56	3.56
217	1096.91	3.42	475	1190.56	3.40	817	1225.29	3.48
225	1089.57	3.36	476	1215.89	3.47	825	1265.48	3.81
226	1099.31	3.38	480	1223.78	3.24	826	1226.84	3.42
230	1103.04	3.28	485	1217.43	3.47	830	1223.48	3.36
235	1093.29	3.27	488	1216.86	3.40	835	1250.59	3.51
238	1115.26	3.38	492	1227.16	3.38	838	1228.16	3.53
242	1109.66	3.34	500	1232.89	3.39	842	1249.99	3.59
250	1112.02	3.29				850	1281.21	3.90

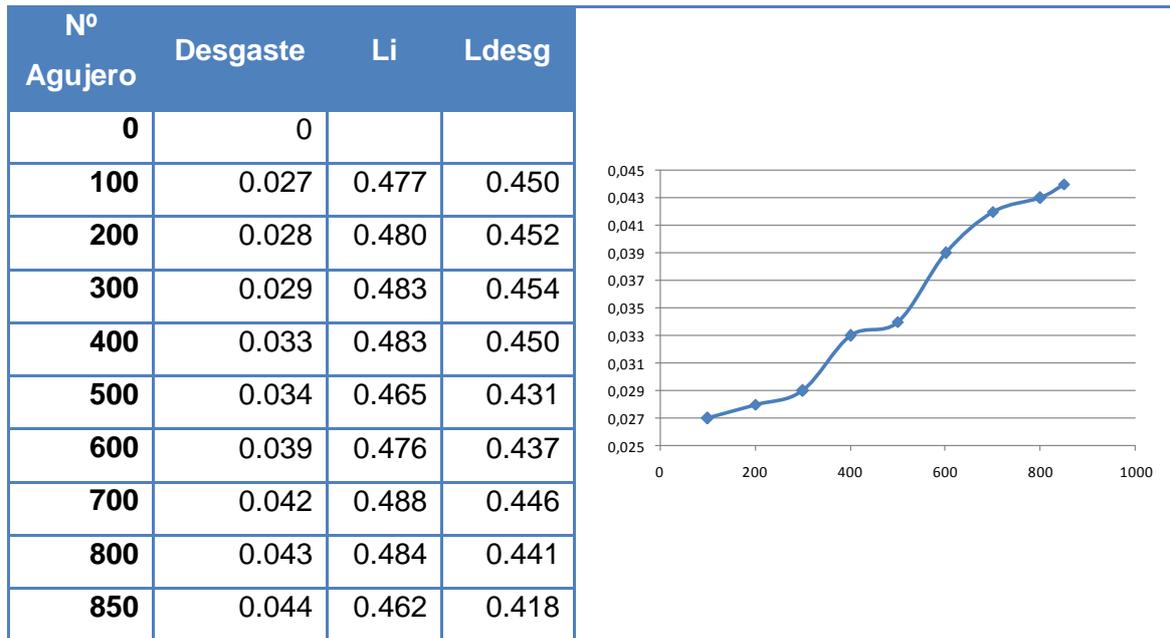
**Tabla 4.37.** Valores de la evolución de la fuerza máxima y par a medida que se realizan taladros con la broca recubierta con AlTiSiN-Mejorado

#### 4.8.1.3. Desgaste de flanco

En la Figura 4.110 se ve la sucesión del filo de la herramienta a medida que se realizan operaciones de taladrado (broca nueva, al de 400 agujeros, y al de 850 agujeros). En la Tabla 4.38, se muestra numéricamente y gráficamente la evolución del desgaste de flanco, hasta alcanzar un desgaste máximo de 0.044 mm.

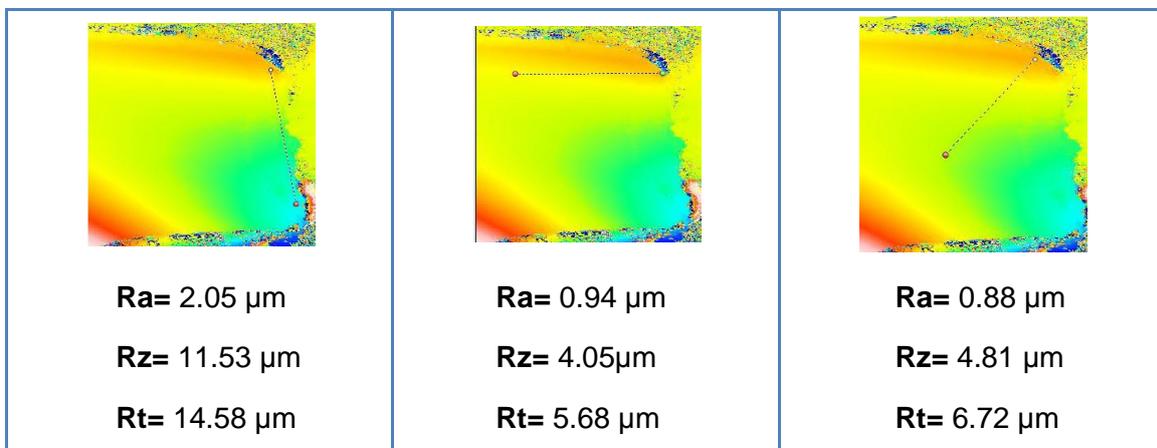


**Figura 4.110.** Evolución del desgaste de flanco en la herramienta, a medida que se taldran agujeros



**Tabla 4.38.** Valores obtenidos para el desgaste de flanco del recubrimiento AlTiSiN- Modificado

#### 4.8.1.4. Daño en la superficie de desprendimiento



**Tabla 4.39.** Rugosidad de la superficie de desprendimiento de la broca

En la Figura 4.111 se puede observar la superficie de desprendimiento de la broca al final de su vida útil (850 operaciones). En ella, no se aprecia ningún daño especial, ni cráter en la superficie de desprendimiento. En la Tabla 4.39 se muestran los valores de la rugosidad obtenidos en diferentes zonas de esta superficie.



**Figura 4.111.** Superficie de desprendimiento de la broca recubierta AlTiSiN-Mejorado tras 850 operaciones

#### 4.8.2. Conclusiones Fase III

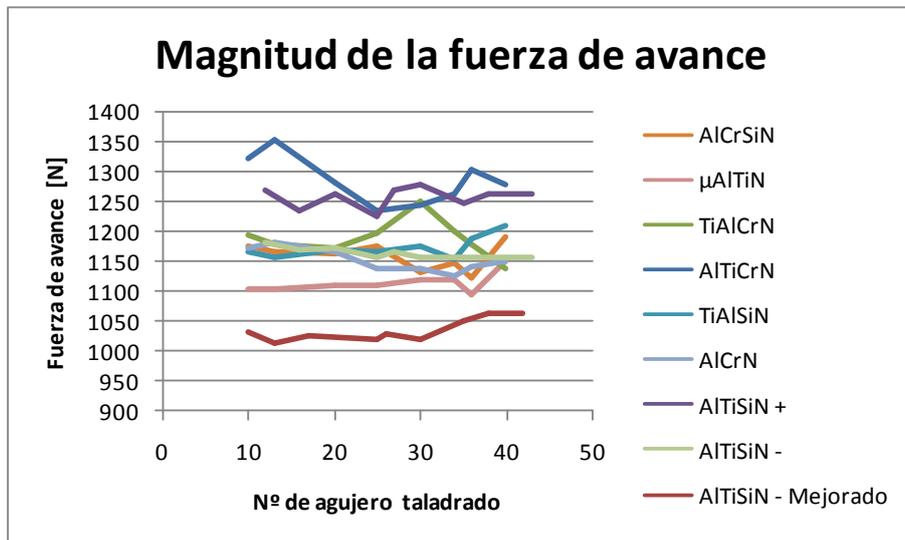
Una vez que se obtienen todos los parámetros de este último recubrimiento, se procede a compararlo con los anteriores, para ver si se ha mejorado los resultados.

Las **tensiones residuales** de los recubrimientos ensayados se muestran en la Tabla 4.40. El menor valor de la tensión residual sigue siendo para el recubrimiento  $\mu$ AlTiN. El valor de la tensión residual obtenida para el recubrimiento estudiado en esta Fase III, obtiene el segundo mejor resultado en cuanto a este parámetro se refiere.

Fase	Recubrimiento	$\sigma_1$ [GPa]	$\sigma_2$ [GPa]	$\sigma_3$ [GPa]	$\sigma_4$ [GPa]	$\sigma_{media}$ [GPa]
I	AlCrSiN	6.56	6.94	7.20	6.71	6.85
	$\mu$ AlTiN	2.83	2.96	3.50	3.10	3.09
	TiAlCrN	5.50	5.10	4.80	4.86	5.07
II	AlTiSiN +	4.89	5.02	4.97	4.87	4.94
	AlTiSiN -	4.39	4.89	5.32	4.57	4.79
III	AlTiSiN-Mejorado	3.90	4.05	4.60	3.57	4.06

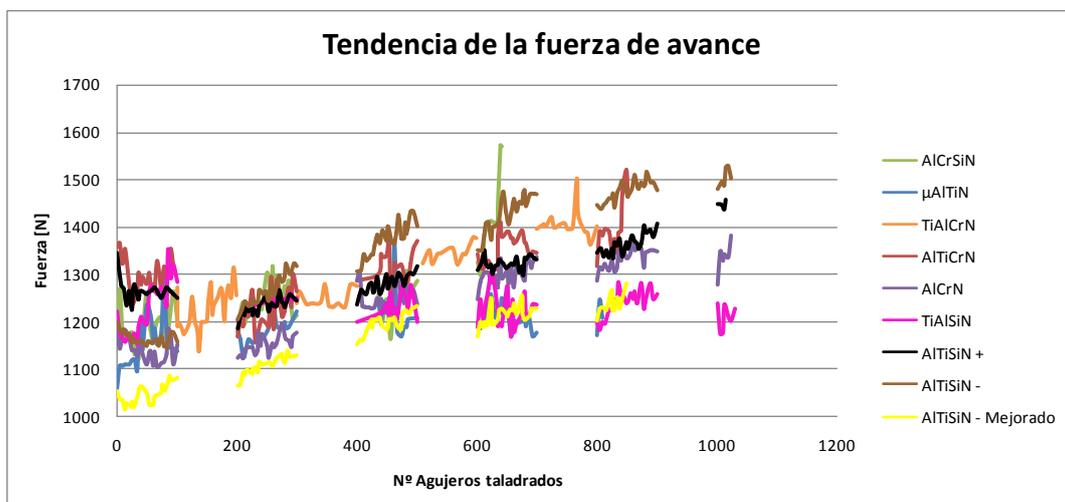
**Tabla 4.40.** Tensiones residuales de los recubrimientos ensayados

En cuanto a la **fuerza de avance**, en la Figura 4.112 se observa que la curva de este último recubrimiento ensayado tiene una fuerza apreciablemente menor, asegurando que la broca sufre menos durante la operación de taladrado.



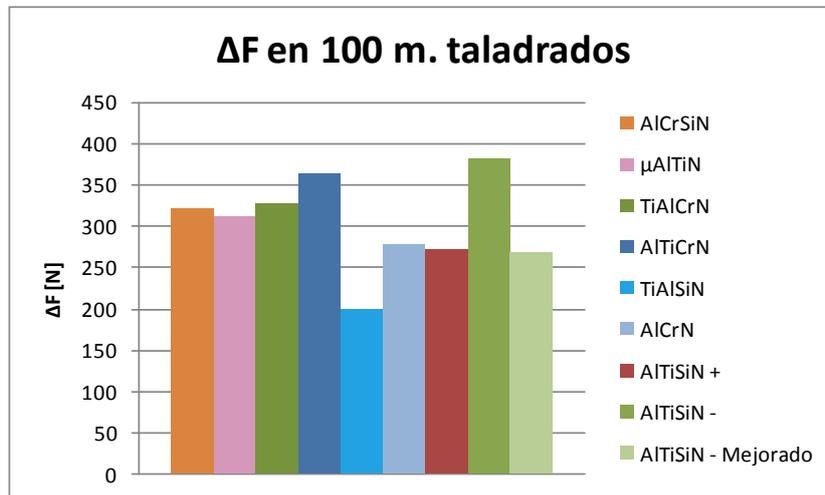
**Figura 4.112.** Gráfica comparativa de la magnitud de la fuerza de avance en las tres fases realizadas

Esta gráfica muestra la fuerza durante los primeros 40 agujeros realizados, en el que al final se ve como el AlTiSiN-Mejorado va sufriendo un aumento de la fuerza progresivo a medida que aumenta los agujeros realizados. En la Figura 4.113 se muestra la tendencia de la fuerza de avance hasta los 1000 agujeros taladrados, en los que se puede ver, que al final de la vida de la herramienta, su fuerza es mayor que con otros recubrimientos.



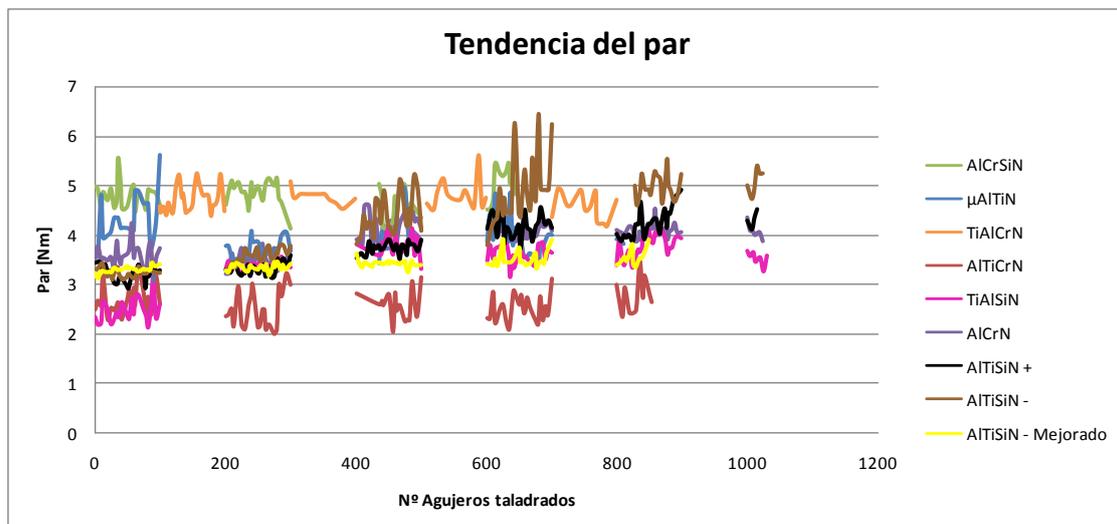
**Figura 4.113.** Gráfica comparativa de la tendencia de la fuerza de avance.

Estudiando el incremento de la fuerza de avance durante los primeros 100 metros taladrados de todos los recubrimientos ensayados, se observa que el recubrimiento que tiene una fuerza más estable es el TiAlSiN, ya que es el que menos incremento de fuerza tiene. El recubrimiento que se está analizando en esta tercera fase, es el segundo más estable.



**Figura 4.114.** Gráfica comparativa del incremento de fuerza durante los primeros 100 metros taladrados con las brocas recubiertas

Si se compara el **par máximo** sufrido durante el taladrado de los diferentes agujeros (ver Figura 4.115), se observa que este último recubrimiento estudiado en la Fase 3, tiene un par mayor que el TiAlSiN, al principio de su vida. El AlTiSiN-Mejorado tiene un comportamiento más uniforme, por lo que al final de las vidas de las brocas de estos dos recubrimientos, se intercambian las posiciones.



**Figura 4.115.** Gráfica comparativa del par máximo de los recubrimientos ensayados en las Fases I, II y III

En la Figura 4.116 se muestra la evolución del **desgaste de flanco**. Comparando este último recubrimiento con el  $\mu$ AlTiN, que es el que mejor resultado tiene hasta la Fase II, al principio el AlTiSiN tiene un comportamiento peor, sin embargo, el desgaste es más uniforme y gradual, por lo que al final de la vida de la herramienta, se obtiene un menor valor del desgaste de flanco, mejorando todos los recubrimientos ensayados en las dos fases anteriores. Tiene una magnitud y velocidad de desgaste muy baja respecto a los demás recubrimientos.

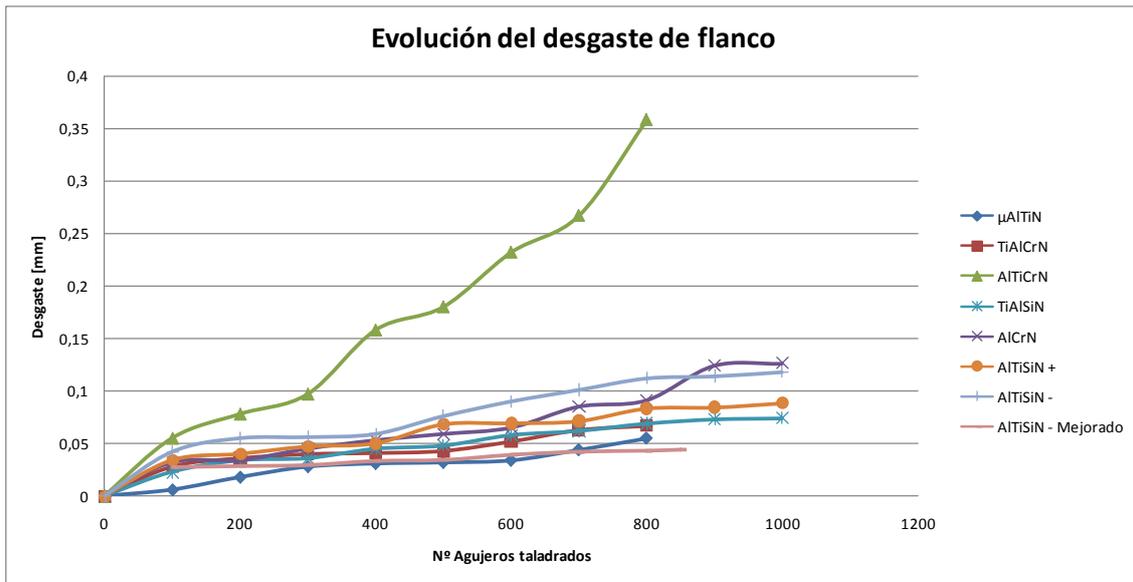


Figura 4.116. Gráfica comparativa de la evolución del desgaste de flanco

Por otra parte, se observa una rotura asimétrica del filo principal, ver Figura 4.117. Esto puede ser debido al choque contra la viruta, no debido al desgaste habitual de la broca.

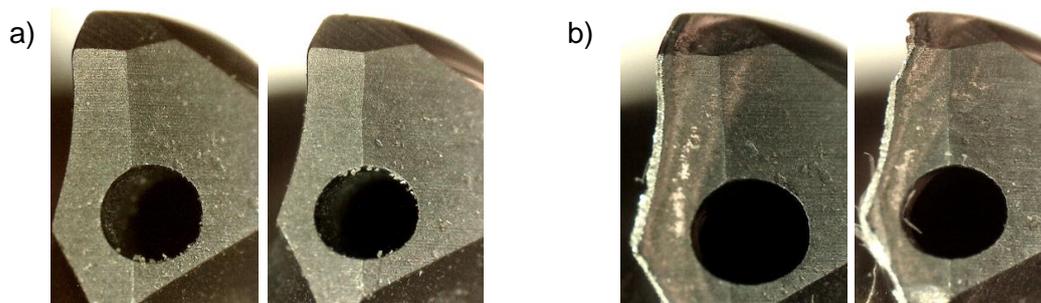
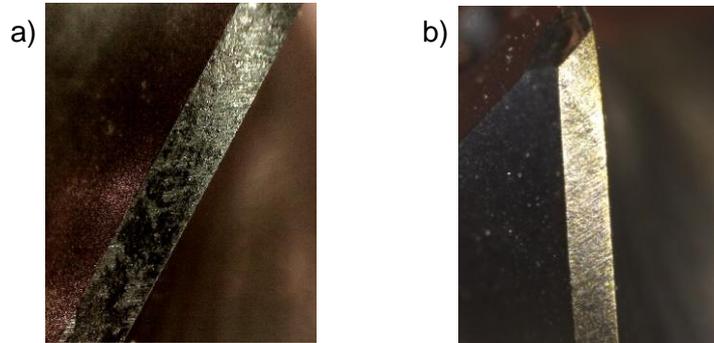


Figura 4.117. Imagen del filo principal de las dos brocas ensayadas: a) broca nueva; b) broca al finalizar el ensayo (850 operaciones)

En la Figura 4.118, se muestra el estado de los **filos secundarios o diametrales** al inicio y al final de la vida de la herramienta. Inicialmente tienen un peor acabado superficial que en otros recubrimientos. Tras 850 operaciones, es visible la capa de adhesión TiN en el filo, aunque no son perceptibles grandes saltos en la desaparición del recubrimiento.



**Figura 4.118.** Imagen del filo secundario de la broca recubierta con AlTiSiN-Mejorado: a) broca nueva; b) al final de su vida útil (850 operaciones)

En la Tabla 4.41 se muestra una comparación del daño de la superficie de desprendimiento de las brocas ensayadas en las tres fases. En esta comparación se observa que los mejores resultados son para el TiAlSiN,  $\mu$ AlTiN y AlTiSiN-Mejorado, que apenas muestran daño.

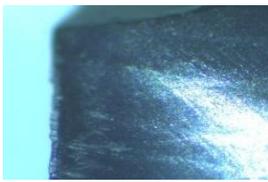
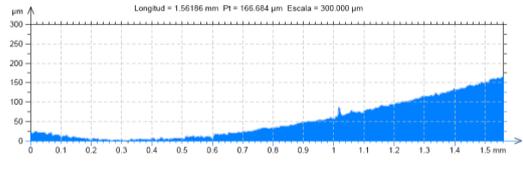
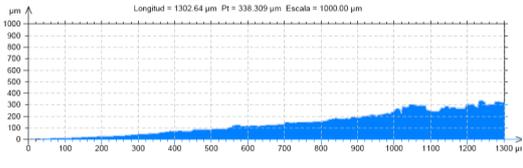
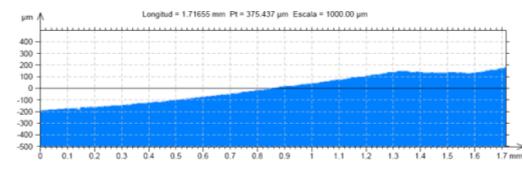
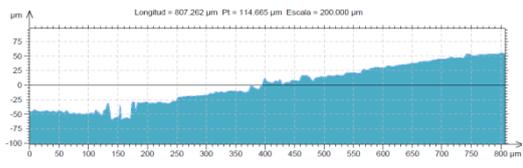
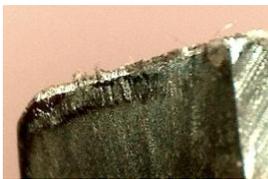
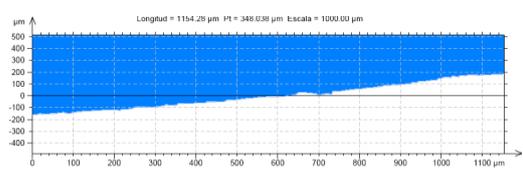
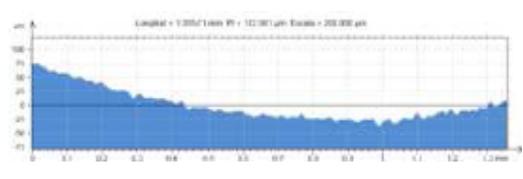
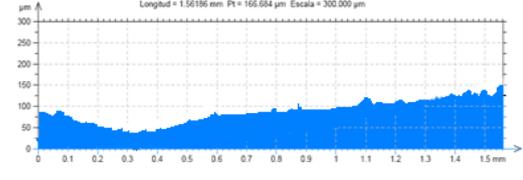
FASE	RECUBRIMIENTO	HERRAMIENTA	PERFIL ZONA DE DESPRENDIMIENTO
I	$\mu$ AlTiN		
	TiAlCrN		
	AlTiCrN		
	TiAlSiN		
	AlCrN		
II	AlTiSiN +		
	AlTiSiN -		
III	AlTiSiN-Mejorado		

Tabla 4.41. Comparación de la superficie de desprendimiento de los diferentes recubrimientos de la Fase I, II y III

Tras analizar los resultados obtenidos de las tres fases realizadas, se puede concluir, que para este ensayo experimental, los recubrimientos AlTiSiN-Mejorado, TiAlSiN y  $\mu$ AlTiN, son los que muestran mejores rendimientos en el taladrado de aceros de bajo o medio contenido en carbono. La principal razón de este comportamiento, es la resistencia térmica, ya que estos recubrimientos muestran una mayor dureza a altas temperaturas, oxidan a altas temperaturas, y no interaccionan químicamente con el material. Además, se forma una capa protectora en las herramientas que evita la craterización de las mismas.

En contra, el recubrimiento AlTiCrN, es el que muestra los peores resultados de todo el estudio. La alta afinidad química con el acero produce un excesivo desgaste de flanco, ya que el cromo de la capa de recubrimiento tiende a reaccionar con el acero a temperaturas medias, alterando de esta forma las propiedades del recubrimiento.

Además, se confirma que un control de los droplets, y de las tensiones del recubrimiento, son muy importantes a la hora de obtener recubrimientos que alarguen la vida de la herramienta, ya que son puntos débiles que hacen que falle el recubrimiento. Para ello, se ha confirmado que el proceso final "Drag Grinding" es adecuado para eliminar los droplets de recubrimientos duros, consiguiendo superficies de filo de corte más suaves; y que es fundamental un diseño de la estructura del recubrimiento adecuado a las características buscadas, como se ha constatado al cambiar el AlTiSiN nanoestructurado y monocapa por el AlTiSiN-mejorado, nanoestructurado y multicapa.



# **CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES GENERALES**

## 5. Conclusiones generales

En este trabajo se trata de definir un método para optimizar los procesos de recubrimiento en herramientas de corte, así como los conocimientos de partida para dicha optimización. La validación del método se ha realizado a través de ensayos de taladrado de aceros de baja aleación en condiciones de alto rendimiento, donde se ha realizado un desarrollo a partir de una evaluación comparativa de los resultados de los ensayos, buscando la optimización (prueba-error).

En los ensayos experimentales de taladrado realizados, la aplicación del método para la optimización de los procesos de recubrimiento, se ha llevado a cabo en tres fases, extrayéndose las siguientes conclusiones:

- Se ha establecido que los conocimientos de partida para la optimización de herramientas de corte recubiertas son el tipo de trabajo, material y condiciones de trabajo, y el sustrato-herramienta: en su diseño (geometría y materiales) y en su acondicionamiento (microgeometría del filo y estado superficial).
- Se ha demostrado que un análisis de las causas del fallo, a través del conocimiento de los mecanismos de desgaste, es fundamental en la evaluación comparativa de los resultados de los ensayos. Su identificación proporciona la información necesaria para mejorar y desarrollar nuevos procesos y recubrimientos, tal y como se muestra en las conclusiones de los ensayos experimentales realizados en el presente trabajo, en las fases I, II y III.
- Se ha desarrollado un método para optimizar los procesos de recubrimiento a partir del análisis de fallo que nos proporciona información de las características deseadas y como conseguirlas desde un punto de vista de proceso de recubrimiento: composición, estructura, pre-tratamientos y post-tratamientos. Es un método de optimización a fallo: prueba-error.
- Se ha demostrado la importancia en el rendimiento, en el caso concreto del taladrado de los pre y post-tratamientos. En este caso, con el proceso final

“Drag Grinding” se consiguen superficies de filo de corte más suaves, libres de droplets.

- Se ha demostrado que un control de las tensiones del recubrimiento, en el caso concreto del taladrado, así como de su estructura y composición, tienen influencia directa en el rendimiento de la herramienta.



# **CAPÍTULO 6: LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO**

## 6. Líneas futuras de trabajo

El trabajo presentado abre distintas líneas de investigación para el futuro:

- Caracterizar otras aplicaciones o tipos de trabajo en condiciones de alto rendimiento con este método desarrollado para la optimización de los procesos de recubrimiento. De esta forma, se podrían establecer conclusiones sobre cuales son los procesos de recubrimiento más adecuados, así como desarrollar procesos y recubrimientos específicos para esas aplicaciones.
- Estudiar y desarrollar nuevos procesos para los pre y post-tratamientos de herramientas que mejoren sus características, adaptándolas al tipo de trabajo concreto, al material y a las condiciones de trabajo.
- Analizar las características que se buscan con los recubrimientos, acabado superficial y material de las herramientas, que refuerzan la integridad superficial de las mismas, mejorando su rendimiento. Conociendo las características deseadas, se pueden desarrollar y estudiar procesos de recubrimiento enfocados hacia los parámetros que refuercen dichas características deseadas.

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- [1] E. P. De Gamo, J.T. Black, R. Kohser, "Material and processes in manufacturing", Eds. Collier-Mc Millan New York, 1989, p. 547.
- [2] V.P. Astakhov, "Tribology of metal cutting", Tribology and interface engineering series, 2006, Nº 52 London: B. J. Briscoe. Elsevier.
- [3] B. North, "Six issues for hard coating community", surf. Coat. Technol. 106 (1998) 129-134.
- [4] J. P. Davim, "Machining: fundamentals and recent advances", 2008, Londres: Springer.
- [5] T. Cselle, "Coating for tooling- Quo vadis 2005?", Proc. Conference "Coatings and layers", October 2004.
- [6] T. Cselle, "Nanostructured coatings for high performance tools", Werkzeug Technik, Nº 77, Mar. 2003.
- [7] J. Musil, "Hard and superhard nanocomposite coatings", Surf. Coat. Technol. 125 (2000) 322-330.
- [8] F. Klocke, T. Krieg, "Coated tools for metal cutting- features and applications", CIRP annals-manufacturing technology, (1999) 48 (2):515-525.
- [9] M. H. Attia, A. Cameron, L. Kops, "Distortion in thermal f around inserted thermocouples in experimental interfacial studies. Part 4: End Effect", Journal of manufacturing science and engineering, (2002) 124 (1): 135-145.
- [10] M. A. Davies, T. Ueda, R. M'Saoubi, B. Mullany, A. L. Cooke, "On the measurement of temperature in material removal processes", Annals of the CIRP, (2007) 56 (2): 581- 604.
- [11] F. Klocke, N. Michailidis, K.-D. Bouzakis, M. Witty, S. Gevardis, E. Lili, M. Pappa, "Investigation of coated tools, cutting performance in milling Ti6Al4V and its correlation to the temperature dependent impact resistance of the film", Production Engineering, (2010) 4 (5): 509 - 514.
- [12] J. Rech, J. Battaglia, A. Moisan, "Thermal influence of cutting tool coatings", Journal of materials processing technology, (2005) 159 (1): 119 - 124.
- [13] K.-D. Bouzakis, N. Michailidis, G. Skordaris, E. Bouzakis, D. Biermann, R. M'Saoubi, "Cutting with coated tools: coating technologies, characterization methods and performance optimization", CIRP Annals – Manufacturing technology 61 (2012) 703 - 723.
- [14] H. K. Tönshoff, C. Blawit, K. T. Rie, A. Gebauer, "Effects of surface properties on coating adhesion and wear behavior of PACVD-coated

- cermets in interrupted cutting”, Surface and coating technology, (1997) 97 (1 - 3): 224 - 231.
- [15] K. Holmberg, A. Matthews, “Coating tribology: properties, techniques and applications in surface engineering”, tribology series, 28 editor: D. Dowson, Elsevier (1994).
- [16] S. Zhang, W. Zhu, “TiN coating of tool steels: a review”, Journal of material processing technology, 1993.39 (1-2): p. 165-177.
- [17] <http://www.platit.com/>
- [18] D. M. Mattox, “Handbook of physical Vapor Deposition (PVD) processing”, 1998, Park Ridge, USA: Noyes publications.
- [19] “Surface treatments and coatings for friction and wear control”, in ASM Handbook: Friction, lubrication and wear technology, 1992, ASM International. P. 829- 878.
- [20] D. M. Mattox, “The historical development of controlled Ion-assisted and plasma-assisted PVD process”, in Proceeding of the 40th annual technical conference of vacuum coaters, 1997, p. 109.
- [21] G. K. Wehner, “Sputtering of metal single crystals by ion bombardment”, Journal of applied physics, 1955.26 (8): p. 1056-1057.
- [22] L. I. Maissel, P. M. Schaible, “Thin films deposited by bias sputtering”, Journal of applied physics, 1965. 36 (1): p. 237-238.
- [23] S. Berg, I. V. Katardjiev, “Modeling of bias sputter-deposition processes”, surface & coatings technology, 1994. 68: p. 325- 331.
- [24] “Materials”, in Handbook of thin film process technology. 1995, institute of physics.
- [25] E. I. Paradis, “Fabrication of thin wall cylindrical-shells by sputtering”, thin solid films, 1980. 72 (2): p 327- 333.
- [26] H. Randhawa, P. C. Johnson, “A review of cathodic arc plasma deposition processes and their applications”, surface & coatings technology, 1987. 21 (4): p. 303 -18.
- [27] H. Curtins, “PLATIT: a new industrial approach to cathodic arc coating technology”, surface and coatings technology, 1995. 76 - 77 (Part 2): p. 632- 639.
- [28] P. A. Lindfors, W. M. Mularie, “Cathodic arc deposition technology”, surface & coating technology, 1986. 29 (4): p. 275- 290.
- [29] D. M. Sanders, “Review of ion – based coating processes from the cathodic arc”, Journal of vacuum science & technology a-Vacuum surfaces and films, 1989. 7 (3): p. 2339- 2345.
- [30] J. Vyskocil, J. Musil, “Cathodic arc evaporation in thin-film technology”, Journal of vacuum science & technology a-Vacuum surfaces and films, 1992. 10 (4): p. 1740-1748.

- [31] J. Vetter, A. J. Perry, "Advances in cathodic arc technology using electrons extracted from the vacuum-arc", *Surface & coatings technology*, 1993. 61 (1- 3): p. 305- 309.
- [32] S. Paldey, S. C. Deevi, T. L. Alford, "Cathodic arc deposited thin film coatings base don TiAl intermetallics", *intermetallics*, 2004. 12 (7-9): p. 985-991.
- [33] D. B. Boercker, S. Falabella, D. M. Sanders, "Plasma transport in a new cathodic arc ion-source-theory and experiment", *surface & coatings technology*, 1992. 53 (3): p. 239- 242.
- [34] E. E. Salagean, et al. "Combined steeved arc-unbalanced magnetron grown niobium coatings for decorative and corrosion resistance applications", *surface & coatings technology*, 1996. 82 (1-2): p. 278-280.
- [35] D. M. Poivier, P. A. Lindfors, "Nomisotropic deposition from a 304 strainless-steel cathodic arc source", *journal of vacuum science & technology a-vacuum surfaces and films*, 1991. 9 (2): p. 278-280.
- [36] W. D. Sproul, et al., "Reactive sputtering in the Abs (Tm) system", *surface & coatings technology*, 1993. 56 (2): p. 179-182.
- [37] E. Lugscheider, et al. "comparison of the structure of PVD-thin films deposited with different deposition energies", *Surface and coatings technology*, 1996. 86-87 (Part 1): p. 177-183.
- [38] A. Horling, et al., "Thermal stability of arc evaporated hight aluminum-content Ti 1-x Alx N thin films", *Journal of vacuum science & technology a-Vacuum surfaces and films*, 2002. 20 (5): p. 1815-1823.
- [39] E. Bemporad, et al., "High thickness Ti/TiN multilayer thin coatings for wear resistant applications", *surface and coatings technology*, 2006. 201 (6): p. 2155-2165.
- [40] L. A. Dobrzanski, et al., "Tribological properties of the PVD and CVD coatings deposited onto the nitride tool ceramics", *Journal of materials processing technology. Achievements in mechanical & materials engineering*, 2006. 175 (1-3): p. 179-185.
- [41] S. J. Sureshu, et al., "Processing, microstructure and hardness of TiN/(Ti,Al)N multilayer coatings". *Materials science and engineering: A*, 2006. 429 (1-2): p. 252-260.
- [42] J. Vetter, E. Lugscheider, S. S. Guerreiro "(Cr:Al)N coating deposited by the cathodic vacuum arc evaporation", *surface and coatings technology*, 1998. 98 (1-3): p. 1233-1239.
- [43] L. Karlsson, et al. "Growth, microstructure, and mechanical properties of arc evaporated TiCxN1-x (0≤x≤1) films", *surface & coatings technology*, 2000. 126 (1): p. 1-14.
- [44] K.-D. Bouzakis, N. Michailidis, S. Gerardis, G. Katirtzoglon, E. Lili, M. Pappa, M. Brizuela, L. A. Garcia, R. Cremer, "Correlation of the impact resistance of variously doped CrAlCN PVD coatings with their cutting

- performance in milling aerospace alloys”, surface and coatings technology, (2008). 203 (5-7): 781-85.
- [45] L. N. Lopez de Lacalle, A. Lamikiz, J. Fernandez, I. Azkona, “Cutting tools for hard machining”, in Davin P, (Ed. Book hard machining, (2010) Springer Verlag.
- [46] J. P. Bars, E. Etchessakar, J. Debuigne, “Kinetics, Diffusion and morphology of titanium nitriding using high-temperature nitrogen-mechanical and structural-properties of solid Ti-Alpha-Nitrogen solutions”, Journal of less-common metals, 1977. 52 (1): p. 51-76.
- [47] S. Paldey, S. C. Deevi, “Single layer and multilayer wear resistant coatings of (Ti, Al)N: a review”, Material science and engineering a, 2003. 342 (1-): p. 58-79.
- [48] S. Veprek, S. Reiprich, “A concept for the design of novel superhard coatings”, Thin solid films, 1995. 268 (1-2): p. 64-71.
- [49] S. Paldey, S. C. Deevi, “Properties of single layer and gradient (Ti, Al)N coatings”, Materials science and engineering A, 2003. 361 (1-2): p. 1-8.
- [50] J. Stanislaw, J. Sikac, M. Cermak, “Properties of magnetron-deposited polycrystalline TiN layers”, Thin solid films, 1990. 191 (2): p. 255-273.
- [51] M. E. Ohern, R. H. Parrish, W. C. Oliver, “Evaluation of mechanical-properties of TiN films by ultralow load indentation”, Thin solid films, 1989. 191: p. 357-363.
- [52] M. Y. Aljaroudi, et al., “Deposition of titanium nitride on surface-hardened structural-steel by reactive magnetron sputtering”, Thin solid films, 1989. 182: p. 153-166.
- [53] K. T. Hyum, H. H. Joo, B. H. Hahn, “Three-dimensional grain size control for simultaneous improvement of hardness and impact adhesion in (Ti, Al)N films on high speed steel”, surface and coatings technology, 1989. 39-40: p. 409-419.
- [54] M. G. Tompkins, “Oxidation of titanium nitride in room air and in dry O<sub>2</sub>” Journal of applied physics, 1991. 70 (7): p. 3876-3880.
- [55] A. Horling, et al., “Mechanical properties and machining performance of Ti<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>N- coated cutting tools”, surface and coatings technology, 2005. 191 (2-3): p. 384 -392.
- [56] O. Knotek, M. Bohmer, T. Leyendecker, “On Structure and properties of sputtered Ti and Al based hard compound films”, Journal of vacuum science & technology a-vacuum surfaces and films, 1986. 4 (6): p. 2695-2700.
- [57] H. A. Jehn, et al, “Morphology and properties of sputtered (Ti,Al)N layers on high-speed steel substrates as a function of deposition temperature and sputtering atmosphere”, journal of vacuum science & technology a-Vacuum surfaces and films, 1986. 4 (6): p. 27010-2705.

- [58] A. Kimura, et al., "Metastable Ti<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>N films with different Al content", *Journal of materials science letters*, 2000. 19 (7): p.601-602.
- [59] T. Ikeda, H. Satoh, "Phase formation and characterization of hard coatings in the Ti-Al-N system prepared by the cathodic arc ion plating method", *Thin solid films*, 1991. 195 (1-2): p. 99-110.
- [60] J. C. Schuster, J. Bauer, "The ternary-System titanium aluminum nitrogen", *Journal of solid state chemistry*, 1984. 53 (2): p. 260-265.
- [61] B. J. Kim, et al., "High temperature oxidation of (Ti<sub>1-x</sub> Al<sub>x</sub>)N coatings made by plasma enhanced chemical vapor deposition", *Journal of Vacuum Science & technology a-Vacuum surfaces and films*, 1999. 17 (1): p. 133-137.
- [62] D. McIntyre, et al., "Oxidation of metastable single-phase polycrystalline Ti<sub>0.5</sub> Al<sub>0.5</sub> N films-kinetics and mechanism", *Journal of applied physics*, 1990. 67 (3): p. 1542-1553.
- [63] H. Holleck, "Metastable coatings-prediction of composition and structure", *surface & coatings technology*, 1988. 36 (1-2): p.151-159.
- [64] Q. Xia, H. Xia, A. L. Ruoff, "Pressure-induced rock-salt phase of aluminum nitride-a metastable structure at ambient condition", *Journal of applied physics*, 1993. 73 (12): p. 8198-8200.
- [65] M. Zhou, et al., "Phase transition and properties of Ti-Al-N thin films prepared by rf-plasma assisted magnetron sputtering", *Thin solid films*, 1999. 339 (1-2): p. 203-208.
- [66] C. Meunier, S. Vives, and G. Bertrand, "X-ray diffractometry analysis of r.f.-magnetron-sputtered chromium/chromium nitride coatings", *Surface and Coatings Technology*, 1998. 107 (2-3): p.149-158.
- [67] J.C.A. Batista, et al., "An approach to elucidate the different response of PVD coatings in different tribological tests", *Surface and Coatings Technology Proceedings of the Eight International Conference on Plasma Surface Engineering*, 2003. 174-175: p. 891-898.
- [68] J.-N. Tu, J.-G. Duh, and S.-Y. Tsai, "Morphology, mechanical properties, and oxidation behavior of reactively sputtered Cr-N films", *Surface and Coatings Technology*, 2000. 133-134: p. 181-185.
- [69] O. Piot, C. Gautier, and J. Machet, "Comparative study of CrN coatings deposited by ion plating and vacuum arc evaporation. Influence of the nature and the energy of the layer-forming species on the structural and the mechanical properties", *Surface & Coatings Technology*, 1997. 94-5(1-3): p. 409-415.
- [70] A. Kondo, et al., "Structure and properties of cathodic arc ion plated CrN coatings for copper machining cutting tools", *Surface and Coatings Technology Proceedings of the 30th International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films*, 2004. 177-178: p. 238-244.

- [71] M. Orden, et al., "Microstructure and mechanical behavior of arc-evaporated Cr-N coatings", *Surface & Coatings Technology*, 1999. 114 (1): p. 39-51.
- [72] C. Gautier, J. Machet, "Study of the growth mechanisms of chromium nitride films deposited by vacuum ARC evaporation", *Thin Solid Films*, 1997. 295 (1-2): p.43-52.
- [73] A. Ehrlich, et al., "Complex characterization of vacuum arc-deposited chromium nitride thin films", *Surface & Coatings Technology*, 1995. 76 (1-3): p.280-286.
- [74] Y. Chiba, T. Omura, and H. Ichimura, "Wear-Resistance of Arc Ion-Plated Chromium Nitride Coatings", *Journal of Materials Research*, 1993. 8 (5): p. 1109-1115.
- [75] Y.L. Su, S.H. Yao, and C.T. Wu, "Comparisons of characterizations and tribological performance of TiN and CrN deposited by cathodic arc plasma deposition process", *Wear*, 1996. 199 (1): p.132-141.
- [76] J. Vetter, "Vacuum arc coatings for tools: Potential and application", *Surface & Coatings Technology*, 1995. 77 (1-3): p. 719-724.
- [77] J. Vetter, et al., "Hard coatings for lubrication reduction in metal forming", *Surface & Coatings Technology*, 1996. 86-7 (1-3): p. 739-746.
- [78] O. Knotek, F. Löffler, and H.J. Scholl, "Properties of Arc-evaporated CrN and (Cr,Al)N Coatings", *Surface & Coatings technology*, 1991. 45 (1-3): p.53-58.
- [79] R.J. Rodriguez, et al. "Tribological behaviour of hard coatings deposited by arc-evaporation PVD", *Vacuum*, 2002. 67 (3-4): p. 559-566.
- [80] Y.L. Su, and S.H. Yao, "On the performance and application of CrN coating", *Wear*, 1997. 205 (1-2): p. 112-119.
- [81] T. Polcar, et al., "Comparison of tribological behavior of TiN, TiCN and CrN at elevated temperatures", *Surface & Coatings Technology*, 2005. 193 (1-3): p. 192-199.
- [82] E. Bozyazi, M. Urgan, and A. F. Cakir, "Comparison of reciprocating wear behavior of electrolytic hard chrome and arc-PVD CrN coatings", *Wear*, 2004. 256 (7-8): p. 832-839.
- [83] L. Cunha, et al., "Microstructure of CrN coatings produced by PVD techniques", *Thin Solid Films*, 1999. 356: p. 465-471.
- [84] B. Navinsek, P. Panjan, and I. Milosev, "Industrial applications of CrN (PVD) coatings, deposited at high and low temperatures", *Surface & Coatings Technology*, 1997. 97 (1-3): p. 182-191.
- [85] S.K. Pradhan, et al., "Deposition of CrN coatings by PVD methods for mechanical application", *Surface & Coatings Technology*, 2005. 200 (1-4): p. 141-145.

- [86] M. Brizuela, et al., "Magnetron sputtering of Cr(Al)N coatings: Mechanical and tribological study", *Surface & Coatings Technology*, 2005. 200 (1-4): p.192-197.
- [87] P.H. Mayrhofer, G. Tischler, and C. Mitterer, "Microstructure and mechanical/thermal properties of CrN coatings deposited by reactive unbalanced magnetron sputtering", *Surface & Coatings Technology*, 2001. 142: p. 78-84.
- [88] A.E. Reiter, V.H. Derflinger, B. Hanselmann, T. Bachmann, B. Sartory, "Investigation of the properties of Al<sub>1-x</sub>Cr<sub>x</sub>N Coatings prepared by cathodic arc evaporation", *Surface & Coatings Technology*, 200 (2005) 2114-2122.
- [89] H. Willmann, P.H. Mayrhofer, P.O. Persson, A.E. Reiter, L. Hultman, C. Mitterer, "Thermal stability of Al-Cr-N hard coatings", *Scripta Materialia*, 54 (2006) 1847-1851.
- [90] A. Sugishima, H. Kajioka, Y. Makino, "Phase transition of pseudobinary Cr-Al-N hard coatings", *Surface and Coatings Technology*, 97 (1997) 590-594.
- [91] Y. Makino and K. Nogi, "Synthesis of pseudobinary Cr-Al-N films B1 structure by rf-assisted magnetron sputtering method", *Surface and Coating Technology*, 98 (1998) 1008-1012.
- [92] G.S. Kim and S.Y. Lee, *Surface and Coatings Technology*, 201 (2006) 4361.
- [93] I.W. Park, D.S. Kang, J.J. Moore, S.C. Kwon, J.J. Rha, K.H. Kim, "Microstructures mechanical properties, and tribological behaviours of Cr-Al-N, Cr-Si-N and Cr-Al-Si-N coatings by a hybrid coating system", *Surface and Coating Technology*, 201 (2007) 5223-5227.
- [94] J.L. Endrino, G.S. Fox-Rabinovich, C. Gey, "Hard AlTiN, AlCrN PVD coatings for machining of austenitic stainless steel", *Surface and Coatings Technology*, 200 (2006) 6840-6845.
- [95] L. Settineri, M.G. Faga, G. Gautier, M.Perucca, "Evaluation of wear resistance of AlSiTiN and AlSiCrN nanocomposite coatings for cutting tools", *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 57 (2008) 575-578.
- [96] S.Veldhuis, G.Dosbaeva, K. Yamamoto, "Tribological compatibility and improvement of machining productivity and surface integrity", *Tribology International*, 42 (2009) 1004-1010.
- [97] W.Y. Liew, "Low-speed milling of stainless steel with TiAl single-layer and TiAlN/AlCrN nano-multilayer coated carbide tools under different lubrication conditions", *Wear*, 269 (2010) 617-631.
- [98] E. Martinez, J. Romero, A. Lousa, J. Esteve, "Wear behavior of nanometric CrN/Cr multilayers", *Surface Coating Technology*, (2003) 163-164, 571-577.
- [99] D. Li, F. Liu, M. Wang, J. Zhang, Q. Liu, "Structural and mechanical properties of multilayered gradient CrN/ZrN coatings", *Thin Solid Films*, (2006) 506-507, 202-206.

- [100] H.G. Prengel, P.C. Jindal, K.H. Wendt, A.T. Santhanam, P.L. Hegde, R.M. Penich, "A new class of high performance PVD coatings for carbide cutting tools", *Surface and Coatings Technology*, 139 (2001), p. 25-34.
- [101] E.M. Trent, "Metal Cutting", Butterworth Heinemann, ISBN 0-7506-1068-9, 1991.
- [102] J. Rech, Y.C. Yen, H. Handi, T. Altan, "Influence of cutting edge radius of coated tool on chip formation in orthogonal turning of alloy steel", International conference NUMIFORM, Columbus (USA), 13-17 jun 2004.
- [103] J. Rech, "Cutting Edge Preparation and Surface Issues", HSS Forum's International Conference "Smart solutions for metal cutting", Aachen, 2-3 February 2005.
- [104] Walter Tools Ibérica, "La nueva dimensión en el mecanizado de acero", *Revistatope*
- [105] V. Garcia Navas, O. Gonzalo, I. Bengoetxea, "Efecto de las características de la herramienta de corte a las tensiones residuales y la rugosidad superficial del acero 40NiCrMo7 torneado", *Interempresas*
- [106] <http://www.mitsubishicarbide.com/>
- [107] Sandvik Coromat Ibérica, "El torneado de piezas duras hecho fácil", *Revistatope*
- [108] <http://www.kyocera.es/>
- [109] <http://www.schneeberger.ch/>
- [110] A. Lümke, M. Beutner, M. Morstein, M. Köching, M. Wengler, T. Cselle, B. Karpuschewski, "A new generation of PVD coatings for high-performance gear hobbing", *Platit, The coating conference 2014*
- [111] J. Rech, Y.-C. Yen, M.J. Schaff, H. Hamdia, T. Altan, K.D. Bouzakis, "Influence of cutting edge radius on the wear resistance of PM-HSS milling inserts", *Wear* 259 (2005) 1168-1176
- [112] E.M. Merchant, "Mechanics of the metal cutting process: 2-orthogonal cutting and the type 2 chip", *Journal of applied physics*, 16 (1945), p. 267-275.
- [113] R.J. Schimmel, W.J. Endres, R. Stevenson, "Application of an internally consistent material model to determine the effect of tool edge geometry in orthogonal machining", *Transactions of the ASME*, 124 (2002), p. 536-543.
- [114] N. Fang, "Slip-live modeling of machining with a rounded-edge tool-part I: new model and theory", *Journal of the mechanics and physics of solids*, 51 (2003), p. 715-742.
- [115] W.R. Becker, E.R. Marschall, M.C. Shaw, "The size effect in metal cutting", *Transactions of ASME*, 74 (1952), p. 61-72.
- [116] E.G. Thomsen, J.T. Lapsley, R.C. Grassi, "Deformation work absorbed by the workpiece during metal cutting", *Transactions of the ASME*, 75 (1953), p.591-603.

- [117] P. Albrecht, "New developments in the theory of metal cuttings process: Part I- the ploughing process in metal cutting", Transactions of ASME, J. Eng. Ind., 82 (1960), p. 348-357.
- [118] K. Nakayama, K. Tamura, "Size effect in metal cutting force", Transactions of the ASME, J. Eng. Ind., 90 (1968), p. 119-126.
- [119] J.D. Thiele, S.N. Melkote, "Effect of cutting edge geometry and workpiece hardness on surface generation in the finish hard turning of AISI 52100 steel", J. Mat. Proc. Tech., 94 (1999), p. 216-226.
- [120] X.P. Li, M. Rahman, K. Liu, K.S. Neo, C.C. Chan, "Nano-precision measurement of diamond tool edge radius for water fabrication", J. Mat. Proc. Tech., 140 (2003), p.358-362.
- [121] Z. J. Yuan, M. Zhou, S. Dong, "Effect of diamond tool sharpness on minimum cutting thickness and cutting surface integrity in ultraprecision machining", J. Mat. Proc. Tech., 62 (1996), p.327-330.
- [122] F. Klocke, T. Krieg, "Coated tools for metal cutting-Features and applications", Annals of the CIRP, Vol. 48/2, 1999, p. 1-11.
- [123] K.-D. Bouzakis, N. Michailidis, G. Skordaris, S. Kombogianis, S. Hadjiyiannis, K. Efstathion, G. Erkens, S. Rambadt, I. Wirth, "Effect of the cutting edge radius and its manufacturing procedure, on the milling performance of PVD coated cemented carbide inserts, CIRP Annals-Manufacturing Technology, 51 (1), (2002), p. 61-64.
- [124] S.R. Badbarg, T. Huyanan, "Challenges facing surface engineering technologies in the cutting tool industry", Vacuum, 56 (2000), p. 173-177.
- [125] O. Knotek, F. Löffler, G. Krämer, Surface and Coatings Technology, 54/55 (1992), p. 476-481.
- [126] H.K. Tonshoff, C. Blawit, "Influence of surface integrity on performance of coated cutting tools", Thin Solid Films, 308-309 (1997), 345-350.
- [127] K.-D. Bouzakis, N. Michailidis, S. Hadjiyiannis, K. Efstathion, E. Pavlidon, G. Erkens, S. Rambadt, I. Wirth, "Improvement of PVD coated inserts cutting performance, through appropriate mechanical treatments of substrate and coating surface", Surface and coatings Technology, 146-147 (2001), p. 443-450.
- [128] R.M. Saoubi, H. Chandrasekaran, "Investigation of the effects of tool-microgeometry and coating on tool temperature during orthogonal turning of quenched and tempered steel", International Journal of Machine Tools & Manufacture, 44 (2004), p. 213-224.
- [129] K.-D. Bouzakis, G. Skordaris, N. Michailidis, A. Asimakopoulos, G. Erkens, "Effect on PVD Coated Cemented Carbide Inserts Cutting Performance of Micro-blasting and Lapping of Their Substrates", Surface and Coatings Technology, 2005, 200 (1-4): 128-132.
- [130] H.K. Tönshoff, H. Seegers, "X-Ray Diffraction Characterization of Pre-treated Cemented Carbides for Optimizing Adhesion Strength of Sputtered

- Hard Coatings”, Surface and Coatings Technology, 2001, 142-144: 1100-1104.
- [131] H. K. Tönshoff, B. Karpuschewski, A. Mohlfeld, H. Seegers, “Influence of Subsurface Properties on the Adhesion-Strength of Sputtered Hard Coatings”, Surface and Coatings Technology, 1999, 116-119: 524-529.
- [132] J. Gunnars, A. Alahelisten, “Thermal Stresses in Diamond Coatings and Their Influence on Coating Wear and Failure”, Surface and Coatings Technology, 1996, 80(3): 303-312.
- [133] E. Uhlmann, W. Reimers, F. Byrne, M. Klaus, “Analysis of Tool Wear and Residual Stress of CVD Diamond Coated Cemented Carbide Tools in the Machinig of Aluminium Silicon Alloys”, Production Engineering, 2010, 4(2): 203-209.
- [134] K.-D. Bouzakis, E. Bouzakis, G. Skordaris, S. Makrimalakis, A. Tsouknidas, G. Kartirtzoglou, S. Gerardis, “Effect of PVD films Wet Micro-blasting by Various Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Grain Sizes on the Wear Behavior of Coated Tools”, Surface and Coatings Technology, 2011, 205: 5128-5132.
- [135] K.-D. Bouzakis, F. Klocke, G. Skordaris, E. Bouzakis, S. Gerardis, G. Katirtzoglou, S. Makrimalakis, “Influence of Dry Micro-blasting Grain Quality on Wear Behavior of TiAlN Coated Tools”, Wear, 2011, 271 (5-6): 783-791
- [136] K.-D. Bouzakis, G. Skordaris, F. Klocke, E. Bouzakis, “A FEM-based Analytical-Experimental Method for Determining Strength Properties Gradation in Coatings After Micro-blasting”, Surface and Coatings Technology, 2009, 203(19): 2946-2953.
- [137] K.-D. Bouzakis, G. Skordaris, J. Mirisidis, S. Hadjiyiannis, J. Anastopoulos, N. Michailidis, G. Erkens, R. Cremer, “Determination of Coating Residual Stress Alterations Demonstrated in the Case of Annealed Films and Based on a FEM Supported Continuous Simulation of the nanoindentation”, Surface and Coatings Technology, 2003, 174-175: 487-492.
- [138] “Verein Deutscher Ingenieure Normen”, VDI-Verlag. 1991: Dusseldorf.
- [139] N. Vidakis, A. Antoniadis, and N. Bilalis, “The VDI 3198 indentation test evaluation of a reliable qualitative control for layered compounds”, Journal of Materials Processing Technology, 2003. 143-144: p. 481-485.
- [140] P. Hedenqvist, S. Högmark, “Experiences from scratch testing of tribological PVD coatings”, Tribology Internacional Vol. 30, N°7 (1997) 507-516
- [141] S.J. Bull, “Failure modes in scratch adhesion testing”, Surface and Coating Technology 50 (1991) 25-32
- [142] S.J. Bull, “Failure mode maps in the thin film scratch adhesion test”, Tribology International, 30 (1997) 491-498
- [143] P. Hedenqvist, M. Olsson, S. Jacobson, S. Soderberg, “Failure mode analysis of TiN-Coated high-speed steel-insitu scratch adhesion testing in

- the scanning electron-microscope”, *Surface and Coatings Technology* 41 (1990) 31-49
- [144] “Standard Test Method for Adhesion Strength and mechanical Failure Modes of Ceramic Coatings by Quantitative Single Point Scratch Testing”; ASTM C 1624-05. Junio 2005
- [145] <http://www.jeol.com/>
- [146] <http://www.feicompany.com/>
- [147] J. Lu, “Handbook of Measurement of Residual Stresses”, 1996, The Fairmont Press Inc.
- [148] I.C. Noyan, and J.B. Cohen, “Measurement by Diffraction and Interpretation in Residual Stress”, 1987, Materials Research and Engineering.
- [149] B.D. Cullity, “Elements of X-Ray Diffraction”, 2 ed. 1978: Addison-Wesley Publishing Company, Inc.
- [150] Philips X’Pert MRD, “Service Manual”, y “User guide”
- [151] M. Hempel and M. Harting, “X-ray stress determination in diamond hard coatings”, in *Ecrs 5: Proceedings of the Fifth European Conference on Residual Stresses*. 2000, p. 411-416.
- [152] A. Baczmanski and S.J. Skrzypek, “Application of non-linear  $\sin(2)\psi$  method for stress determination using X-ray diffraction”, in *Ecrs 6: Proceedings of the 6<sup>th</sup> European Conference on Residual Stresses*. 2002, p. 29-34.
- [153] G.G. Stoney, “The tension of metallic films deposited by electrolysis”, *Proc. R. Soc (London) A*, 82 (1909) 172-175
- [154] A. Horling, “Thermal stability and mechanical properties of arc evaporated (Ti,Al)N thin films”, in *Department of Physics and Measurement Technology*. 2002, Linköpings Universitet: Linköpings
- [155] M.R. Elizalde, “Efecto de la intercara de materiales compuestos de matriz cerámica y fibras continuas”, *Escuela Superior de Ingenieros Industriales*. 1997, Universidad de Navarra: San Sebastián
- [156] W.C. Oliver and G.M. Pharr, “An Improved Technique for Determining Hardness and Elastic-Modulus Using Load and Displacement Sensing Indentation Experiments”, *Journal of Materials Research*, 1992, 7(6): p. 1564-1583
- [157] I.N. Sneddon, “The relation between load and penetration in the axisymmetric boussinesq problem for a punch of arbitrary profile”, *International Journal of Engineering Science*, 1965, 3(1): p. 47-57
- [158] S. Bec, et al., “Improvements in the indentation method with a surface force apparatus”, *Philosophical Magazine a-Physics of Condensed Matter Structure Defects and Mechanical Properties*, 1996, 74(5): p. 1061-1072
- [159] Y.Y. Lom, M.M. Chaudhri, Y. Enomoto, “Accurate determination of the mechanical properties of thin aluminum films deposited on sapphire flats

- using nanoindentations”, *Journal of Materials Research*, 1999, 14(6): p. 2314-2327
- [160] J.M. Molina, “Processing and nanoindentation behavior of nitride multilayers”, in *Materials Science and Metallurgy*, 2002, University of Cambridge: Cambridge
- [161] A.M. Korsunsky et al., “On the hardness of coated systems”, *Surface and Coatings Technology*, 1998. 99 (1-2): p. 171-183.
- [162] K.-D. Bouzakis, I. Mirisidis, N. Michailidis, E. Lili, A. Saurpris, G. Erkens, R. Cremer, “Wear of Tools Coated with Various PVD Films: Correlation with Impact Test Results by Means of FEM Simulations”, *Plasma Processes and Polymers*, 2007, 4(3): 301-310
- [163] K.-D. Bouzakis, S. Gerardis, G. Katirtzoglou, S. Makrimalakis, N. Michailidis, E. Lili, “Increasing Tool Life by Adjusting the Milling Cutting Conditions According to PVD films Properties”, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2008, 57(1): 105-108
- [164] A. Höling, L. Hultman, M. Odén, J. Sjöln, L. Karlsson, “Mechanical Properties and Machining Performance of Ti1-xAlxN-Coated Cutting Tools”, *Surface and Coatings Technology*, 2005, 191 (2-3): 384-392
- [165] A. Knutsson, M.P. Johansson, L. Karlsson, M. Odén, “Machining Performance and Decomposition of TiAlN/TiN Multilayer Coated Metal Cutting Inserts”, *Surface and Coatings Technology*, 2011, 205 (16): 4005-4010
- [166] <http://www.kistler.com/>
- [167] <http://www.renishaw.es/>
- [168] D. Rodríguez Salgado, “Sistemas de monitorización del desgaste de la herramienta en los procesos de torneado”, *Interempresas*, 2005
- [169] D. Soler Mallol, A. Garay Araico, L. M<sup>a</sup>. Iriarte Gurutzeta, P.J. Arrazola Arriola, “Incertidumbre en la medición de temperatura en el corte ortogonal de aleaciones de Titanio”, *XIX Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica*
- [170] A. Fernández Valdivielso, A. Calleja Ochoa, A. Rodríguez Ezquerro, G. Ubian Pelayo, A. Álvarez Arregui, L.N. López de Lacalle, “La mejora en el día a día, clave para la cuenta de resultados en la producción de los componentes del motor”, *Interempresas*, 2015
- [171] A. Rodríguez, G. Urbikain, O. Pereira, R. Polvorosa, I. Cerrillo, L.N. López de Lacalle, “Mecanizar sin defectos, visión global”, *Interempresas*, 2015
- [172] <http://www.sariki.es/>
- [173] S. Hogmark, M. Olsson, “Wear mechanisms of HSS cutting tools”, *The Ångström Laboratory & Dalarna University, Sweden*
- [174] E.M. Trent, “*Metal Cutting*”, 3rd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1991
- [175] A. Alden Kendall, “Friction and wear of cutting tools and cutting tools materials”, *ASM Handbook*, Vol. 18, 1992, p: 609-620

- [176] K. Holmberg, A. Matthews, "Coatings tribology, Properties, Techniques and applications in Surface Engineering", Ed: D. Dowson, Elsevier 1994
- [177] B. Alvelid, H. Wisell, "Wear of HSS in orthogonal milling", Scand J. of Metallurgy, 9 (1980) 59-67
- [178] S.C. Lim, S.H. Lee, Y.B. Lin, K.H.W. Seat, "wear maps for uncoated high-speed steel cutting tools", Wear, 170 (1993), 137-144
- [179] C.Y.H. lim, S.C. Li, K.S. Lee, "The performance of TiN-coated high speed tool inserts in turning", Tribology International 32 (1999) 393-398
- [180] S. Söderberg, "Wear mechanisms and tool life of high speed steels related to microstructure", Ph Thesis of Uppsala University, Sweden, 1982
- [181] S. Söderberg, S. Jacobson, M. Olsson, "Wear Atlas of HSS Cutting Tools", Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Congress on Tribology (Eurotrib 89), Helsinki, Finland, Finnish Society for Tribology, 1989
- [182] S. Hogmark, S. Jacobson, M. Larsson, U. Wiklund, "Mechanical and tribological requirements and evaluation of coating composites", In Modern Tribology 2000, Ed. B. Buskan, Vol II, 931-959 CRC Press 2001
- [183] I. Le May, "Principels of mechanical metallurgy", Elsevier 1981
- [184] <http://sandvik.coromat.com/>
- [185] U. Wiklund, J. Gunnars, S. Hogmark, "Influence of residual stresses on fracture and delamination of hard coatings", Wear 232 (1999) 262-269