

E.T.S. de Ingeniería Industrial, Informática  
y de Telecomunicación

**“ESTUDIO PARA LA MEJORA DE LA  
ADHERENCIA Y PROPIEDADES TRIBOLÓGICAS  
DE RECUBRIMIENTOS TIALN-TIALSIN”**



**Máster Universitario**  
**Ingeniería de materiales y fabricación**

**Trabajo Fin de Máster**

Autor: Jesús José Randulfe Ceballos

TFM Dirigido por: Dr. José Antonio García Lorente

Pamplona, Noviembre del 2020

upna

Universidad Pública de Navarra  
Nafarroako Unibertsitate Publikoa

## Resumen:

El siguiente trabajo consiste en el estudio de las propiedades mecánicas y tribológicas de los recubrimientos superficiales TiAlN-TiAlSi, con el objetivo de lograr resultados óptimos, en la adherencia y otras propiedades tribológicas.

Se establece una comparación de dos procesos de aplicación diferentes, un tratamiento individual PVD y un tratamiento Dúplex, que se obtiene por la combinación de dos tratamientos superficiales secuenciales, con el fin de lograr propiedades en su combinación, que superan las propiedades alcanzadas por tratamientos individuales. En este caso formado por una nitruración gaseosa, seguida de un proceso PVD.

En este trabajo se realizan una serie de ensayos y se comparan sus resultados, con el objetivo de cuantificar las propiedades de adherencia y resistencia al desgaste, que aportan estos tratamientos, en el acero 1.2379 y en el acero Vanadis 4.

Con la nitruración, la difusión del nitrógeno forma una capa de nitruros, con un determinado espesor, con una dureza que va decreciendo de forma gradual a medida que nos alejamos de la superficie, lo que constituye una capa soporte a la capa dura aplicada por PVD, que le brinda una serie de mejoras en cuanto a las propiedades mecánicas y tribológicas. Los resultados obtenidos en los valores de adherencia Lc2 en el caso del tratamiento Dúplex, superan a los obtenidos en el tratamiento PVD, además se incrementa la dureza superficial, la resistencia al desgaste, la resistencia a las cargas externas y a la corrosión. Esta elevada adherencia alcanzada con el tratamiento Dúplex, es recomendada para la aplicación en útiles, herramientas y piezas, sometidas a elevadas presiones de trabajo, con el objetivo de aumentar su durabilidad, sin que ocurran fallas por delaminación.

**PALABRAS CLAVES:** NITRURACIÓN, PVD, DÚPLEX, TRIBOLOGÍA

## AGRADECIMIENTOS:

Agradezco a todas las personas que me apoyaron a cursar este Máster, que culmina con la presentación de este TFM. Al colectivo de profesores de la UPNA del Máster de “Ingeniería de Materiales y Fabricación”, que a pesar de las adversidades provocadas por el covid, se mantuvieron impartiendo docencia con excelentes resultados y elevada calidad, a mi familia que durante todo este tiempo ha estado sin mi presencia, a todas mis amistades que me motivaron, a la empresa TECNAFARM, que me abrió sus puertas para desarrollar las prácticas profesionales junto a sus especialistas, y agradezco de forma muy especial, a las personas que tuvieron que ver directamente con el desarrollo de este trabajo, ellos son:

Mi tutor, el Dr. José Antonio García Lorente, el Ing. Adrián Claver, al Dr Rafael Rodríguez Trías, y al Dr José Fernández Palacio, de la AIN

A todos muchas gracias

CONTENIDO:

1. OBJETIVOS.....	8
2. INTRODUCCIÓN .....	9
3. ESTADO DEL ARTE .....	10
3.1 MODOS DE FALLOS .....	10
3.2 TRIBOLOGÍA .....	11
3.3 ACEROS SELECCIONADOS.....	12
3.3.1 EFECTO DE LOS ELEMENTOS QUÍMICOS DE ALEACIÓN .....	14
3.4 NITRURACIÓN .....	16
3.4.1. ACEROS PARA NITRURAR .....	16
3.4.2. TIPOS DE NITRURACIÓN .....	17
3.4.3. VENTAJAS DE LA NITRURACIÓN .....	19
3.5 CAPAS FINAS .....	20
3.5.1 RECUBRIMIENTOS MÁS EMPLEADOS .....	21
3.5.2 RECUBRIMIENTOS PVD .....	23
3.5.3 PREPARACIÓN DE LA SUPERICIE ANTES DEL PVD .....	26
3.5.4 TENDENCIAS ACTUALES. TRATAMIENTO DÚPLEX.....	27
3.5.5 PRINCIPIOS DEL TRATAMIENTO DÚPLEX.....	28
4. EXPERIMENTAL .....	31
4.1 FABRICACIÓN DE PROBETAS .....	31
4.2 RECUBRIMIENTOS REALIZADOS .....	32
4.2.1 RECUBRIMIENTO PVD.....	32
4.3 ENSAYOS REALIZADOS .....	36
4.3.1 GD-OES (COMPOSICIÓN DE CAPAS) ,,.....	36
4.3.2 ENSAYO DE MICRODUREZA .....	39
4.3.3 SCRATCH TEST (ADHERENCIA).....	45
4.3.4 TRIBOLOGÍA.....	48
5. RESULTADOS .....	53
5.1 GD-OES .....	53
5.2 MICRODUREZA .....	56
5.3 SCRATCH TEST.....	62
5.4 TRIBOLOGÍA .....	70
6. EJEMPLOS DE APLICACIONES DE RECUBRIMIENTOS DÚPLEX.....	87
7. CONCLUSIONES .....	90
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	91
9. ANEXOS .....	94

## INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Fabricación de aceros pulvimetalúrgicos.....	13
Ilustración 2. Instalación para nitruración iónica .....	18
Ilustración 3. Probeta después del ensayo en el pin on disc.....	32
Ilustración 4. Aplicación de recubrimiento PVD .....	33
Ilustración 5. Equipo para realizar GD-OES. AIN .....	36
Ilustración 6. Cráter provocado en el proceso GD-OES .....	36
Ilustración 7. Diagrama equipo GD-OES.....	37
Ilustración 8. Principio de funcionamiento del GD-OES .....	37
Ilustración 9. Proceso de sputtering (Lámpara de emisión) .....	38
Ilustración 10. Vista de los detectores en posiciones determinadas. GD-OES .....	38
Ilustración 11. Imagen tomada a través de microscopio .....	40
Ilustración 12. Parámetros de dureza .....	40
Ilustración 13. Esquema de comportamiento elástico-plástico de material en un ensayo .....	41
Ilustración 14. Dureza universal. $HU = F / \text{Área indentador}$ .....	41
Ilustración 15. Fórmulas empleadas en la dureza universal .....	42
Ilustración 16. Dureza plástica. $HU = F/\text{Área proyectada indentador}$ .....	43
Ilustración 17. Fórmulas empleadas en la dureza plástica. ....	44
Ilustración 18. Esquema de instrumento de un ensayo de micro dureza.....	45
Ilustración 19. Representación de LC1, LC2 y LC3 .....	45
Ilustración 20. Funcionamiento ensayo scratch test .....	46
Ilustración 21. Equipo para realizar prueba scratch test .....	48
Ilustración 22. Bola de alúmina sobre la probeta .....	49
Ilustración 23. Equipo Pin- on- disc. Laboratorio UPNA .....	50
Ilustración 24. Equipo ultra micro durómetro. FISHERSCOPE H100 VP/X-Y. Lab. AIN .....	57
Ilustración 25. Huella del ensayo. Acero 1.2379 PVD.....	63
Ilustración 26. Huella del ensayo. Acero 1.2379 . PVD (RF02).....	65
Ilustración 27. Huella del ensayo. Acero 1.2379 Dúplex. ....	67
Ilustración 28. Huella del ensayo. Acero Vanadis 4. DV01 .....	68
Ilustración 29. Microscopía electrónica. Medición del ancho del surco. Laboratorio UPNA .....	73
Ilustración 30. Ancho de surco. Probeta 1.2379 R6-R8. Zona 1,2,3 .....	74
Ilustración 31. Ancho de surco. Probeta 1.2379 R10-R12. Zona 1,2,3 .....	74
Ilustración 32. Ancho de surco. Probeta 1.2379 PVD R6-R8. Zona 1,2,3.....	74
Ilustración 33. Ancho de surco. Probeta 1.2379 PVD R10-R12. Zona 1,2,3 .....	74
Ilustración 34. Ancho de surco. Probeta 1.2379 PVD R6-R8. Zona 1,2,3.....	75
Ilustración 35. Ancho de surco . Probeta 1.2379 PVD R10-R12. Zona 1,2,3 .....	75
Ilustración 36. Ancho de surco. Probeta 1.2379 Dúplex R6-R8. Zona 1,2,3.....	75
Ilustración 37. Ancho de surco. Probeta 1.2379 Dúplex R10-R12. Zona 1,2,3 .....	75

Ilustración 38. Ancho de surco. Probeta Vanadis 4 R6-R8. Zona 1,2,3 .....	76
Ilustración 39. Ancho de surco. Probeta Vanadis 4 R10-R12. Zona 1,2,3 .....	76
Ilustración 40. Zonas de medición en cada probeta .....	80
Ilustración 41. Confocal. Laboratorio UPNA. Medición del volumen perdido.....	81
Ilustración 42. Sensofar Probeta acero 1,2379 no tratada. NTF01 Radio 6 Zona 1.....	81
Ilustración 43. Ilustración Sensofar Probeta acero 1.2379 no tratada. Radio 6 Zona 2 .....	82
Ilustración 44. Ilustración Sensofar Probeta acero 1.2379 no tratada.Radio 6 Zona 3 .....	83
Ilustración 45. Ejemplo 1 de aplicaciones de tratamiento Dúplex. Útil .....	87
Ilustración 46. Ejemplo 2 de aplicaciones del tratamiento Dúplex.Útil .....	87
Ilustración 47. Ejemplo 3 de aplicaciones del tratamiento Dúplex. Útil .....	88
Ilustración 48. Ejemplo 4 de aplicaciones del tratamiento Dúplex. Horquilla. Acero 1.2379 .....	88
Ilustración 49. Ejemplo 5. de tratamiento Dúplex a útil. Acero Vanadis6 / Vanadis1 .....	89

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Dureza superficial contra profundidad de penetración en la Nitruración .....	20
Gráfico 2. Resultados de la pérdida de volumen. Ensayo Pin on disc .....	30
Gráfico 3. Curva de carga y descarga . Dureza universal .....	42
Gráfico 4. Curva de carga y descarga. Dureza plástica .....	43
Gráfico 5. Ejemplo de los resultados de un ensayo Scratch test .....	47
Gráfico 6. GD-OES % at vs profundidad. Acero 1.2379 no tratado .....	53
Gráfico 7. GD-OES % at vs profundidad. Acero 1.2379 con recubrimiento PVD .....	54
Gráfico 8. GD-OES % at vs profundidad. Acero 1.2379 con recubrimiento Dúplex .....	55
Gráfico 9. GD-OES % at vs profundidad. Acero Vanadis 4 recubrimiento Dúplex .....	55
Gráfico 10. Comparativa del % atómico de Nitrógeno .....	56
Gráfico 11. Curva de ultramicrodureza. Probeta NTF01.....	58
Gráfico 12. Curva de ultramicrodureza. Probeta RF01 .....	58
Gráfico 13. Curvas de dureza. Acero1.2379 PVD 1000 mN.....	59
Gráfico 14. Curvas de carga. Acero 1.2379 PVD 1000mN.....	60
Gráfico 15. Comparativa de ultra microdureza para 500 mN.....	60
Gráfico 16. Comparativa de ultra microdureza para 1000mN .....	61
Gráfico 17. Scratch test de 1.2379 PVD (RF01), Test 1 y su respectiva huella.....	62
Gráfico 18. Scratch test de 1.2379 PVD (RF01), Test 2 y su respectiva huella.....	63
Gráfico 19. Scratch test de 1.2379 PVD (RF02), Test 1 y su respectiva huella .....	64
Gráfico 20. Scratch test de 1.2379 PVD (RF02), Test 2 y su respectiva huella .....	66
Gráfico 21. Scratch test de 1.2379 Dúplex, Test y su respectiva huella .....	66
Gráfico 22. Scratch test de Vanadis 4, Test y su respectiva huella.....	67
Gráfico 23. Comparativa de los resultados de los ensayos scratch test .....	68
Gráfico 24. Acero 1.2379 no tratado. Radio 6 mm .....	70
Gráfico 25. Acero 1.2379 con recubrimiento PVD. Radio 10 mm .....	70
Gráfico 26. Acero 1.2379 con tratamiento Dúplex. Radio 10 mm.....	71
Gráfico 27. Acero Vanadis 4 Dúplex. Radio 10 mm .....	71
Gráfico 28. Comparativa de los coeficientes de rozamiento .....	72
Gráfico 29. Coeficientes de desgaste calculados por medición del ancho surco .....	79
Gráfico 30. Resultado de la medición en la sección .....	82
Gráfico 31. Resultado de la medición en la sección .....	82
Gráfico 32. Resultado de la medición en la sección .....	83
Gráfico 33. Comparativa de los coeficientes de desgaste .....	86

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tipología de fallos .....	10
Tabla 2. Composición química acero 1.2379 .....	13
Tabla 3. Composición química acero Vanadis 4.....	14
Tabla 4. Clasificación de los recubrimientos según el modo de deposición.....	21
Tabla 5. Comparativa de recubrimientos metálicos o cerámicos.....	22
Tabla 6. Probetas utilizadas en el estudio .....	31
Tabla 7. Características del recubrimiento PVD Hardlox .....	32
Tabla 8. Parámetros del ensayo pin on disc .....	52
Tabla 9. Ultra microdureza a 500 mN .....	57
Tabla 10. Ultra microdureza a 1000 mN .....	59
Tabla 11. Resultados de Scratch test del 1.2379 PVD. (RF01) .....	64
Tabla 12. Resultados de Scratch test del 1.2379 PVD. ( RF02) .....	66
Tabla 13. Resultados de Scratch test del 1.2379 Dúplex. ....	66
Tabla 14. Resultados de Scratch test del Vanadis 4 Dúplex.....	68
Tabla 15. Resultados de los coeficientes de rozamiento según ensayo. Pin on disc .....	72
Tabla 16. Coeficiente de desgaste probeta 1.2379 no tratado.....	77
Tabla 17. Coeficiente de desgaste probeta 1,2379. Recubrimiento PVD .....	77
Tabla 18. Coeficiente de desgaste probeta 1.2379. Tratamiento Dúplex .....	78
Tabla 19. Coeficiente de desgaste Acero Vanadis 4. Tratamiento Dúplex .....	78
Tabla 20. Valores de los coeficientes de desgaste según ancho surco .....	78
Tabla 21. Acero 1.2379 no tratada. Cálculo del coeficiente de desgaste .....	84
Tabla 22. Acero 1.2379 con recubrimiento PVD. Cálculo del coeficiente de desgaste .....	84
Tabla 23. Acero 1.2379 con recubrimiento Dúplex. Cálculo del coeficiente de desgaste .....	85
Tabla 24. Acero Vanadis 4 con recubrimiento Dúplex. Cálculo del coeficiente de desgaste ....	85
Tabla 25. Resultados del cálculo de los coeficientes de desgaste en $. m^3 / Nm$ .....	85

## 1. OBJETIVOS:

El objetivo principal de este trabajo es mejorar la adherencia del acero 1.2379 y Vanadis 4, con el recubrimiento TiAlN-TiAlSiN, a través de un tratamiento Dúplex. Para el desarrollo de este estudio, se realiza una comparación de los resultados de un grupo de ensayos a probetas de acero 1.2379, sin tratar, tratadas con PVD y con tratamiento Dúplex, y una muestra de acero Vanadis 4 con tratamiento Dúplex.

Para lograr este objetivo, se han definido una serie de objetivos secundarios:

- Selección de los aceros a emplear,  
Composición química y propiedades.
- Estudio de las propiedades del recubrimiento PVD
- Estudio de las propiedades del recubrimiento Dúplex.
- Caracterización de las combinaciones seleccionadas para el estudio. Se realizaron ensayos
  - GD-OES con el fin de determinar su composición,
  - Micro dureza.
  - Scratch test para determinar la adherencia de la capa dura
  - Ensayos tribológicos (Pin on Disc) el cálculo del coeficiente de desgaste.

## 2. INTRODUCCIÓN:

La industria moderna exige cada vez más, el empleo de materiales más resistentes y ligeros, con el fin de disminuir la masa de los elementos mecánicos y el coste (siempre que sea posible), sin que el producto deje de cumplir con las exigencias requeridas para su asignación de servicio.

El diseño, el uso de nuevos materiales y el empleo de tratamientos térmicos, son algunos de los elementos que se emplean para lograr estos objetivos, y los resultados obtenidos, son realmente novedosos, si lo comparamos con los métodos de fabricación de hace una década, sobre todo en el sector de las herramientas de cortes, fabricación de moldes y útiles de conformado, automoción y aeronáutica.

En este trabajo se realiza un estudio con una serie de ensayos a varias probetas, con el fin de validar las ventajas que aportan los tratamientos térmicos, los cuáles se han podido perfeccionar, gracias a la introducción de nuevas tecnologías y al desarrollo científico técnico, pues hay una serie de prestaciones que se logran en la modificación de las propiedades de los materiales, que solo se logran con tratamientos en alto vacío.

La dureza, la resistencia a la corrosión, la resistencia al desgaste y la adherencia, han dado un salto cualitativo y cuantitativo muy significativo con el uso de estas nuevas tecnologías.

Las investigaciones en este campo continúan, y una de ellas lo constituyen los tratamientos Dúplex, que no son más que dos o más tratamientos secuenciales, por ejemplo, un tratamiento termoquímico inicial que puede ser una nitruración, seguido de un recubrimiento PVD, con el objetivo de obtener las ventajas que aportan ambos en su combinación.

El tratamiento Dúplex, aumenta la dureza superficial y mejora la adherencia de la capa dura. Cuando el recubrimiento es del tipo tribológico, además de lograr estas ventajas, logra disminuir el coeficiente de fricción hasta en un 50%, lo que influye positivamente en la durabilidad de piezas con movimientos relativos entre sí, pues disminuye la fricción y el efecto negativo del desgaste.

En ambos casos ya sea un recubrimiento posterior al nitrurado, duro o tribológico, la pieza aumenta la capacidad de asimilar cargas externas, pues la capa de PVD se encuentra depositada sobre una superficie nitrurada, con un gradiente de dureza con una profundidad sobre los 50...80 micrómetros y constituye una capa soporte intermedia de mayor capacidad de asimilación a impactos, que si se hubiera realizado el recubrimiento PVD directamente sobre la superficie sin nitrurar, ya que una deformación plástica del sustrato, ocasiona una falla prematura en la pieza.

De ahí, que los recubrimientos Dúplex sean tan importantes, pues se obtienen resultados superiores, que por tratamientos individuales son imposibles de lograr.

### 3. ESTADO DEL ARTE.

#### 3.1 MODOS DE FALLOS

La industria mecánica es una de las ramas, que más se ha beneficiado con la introducción de los avances científico-técnicos en la modernización de sus tecnologías. Mucho ha tenido que ver el desarrollo acelerado de la electrónica, la informática, el surgimiento de nuevos materiales y el desarrollo de una nueva concepción del diseño de forma integral, para lograr finalmente un producto de óptima calidad. En todo diseño mecánico hay piezas estáticas y móviles, que están sometidas a diferentes estados tensionales, y debido a ello surgen fallos en pleno servicio.

Entre los más significativos podemos mencionar:

1. Deformación plástica
2. Rotura, ya sea por sobre carga o por fatiga
3. Corrosión.
4. Pérdida de la geometría original de la pieza, ocasionado fundamentalmente por la fricción y al desgaste que se provoca, que puede presentarse en cualquiera de sus variantes, adhesivo, abrasivo, erosivo, etc.

Si analizamos las fallas ocasionadas por el desgaste en el par de elementos en movimiento, vemos que pierde el ajuste de diseño aumentando la holgura entre ambos, lo que trae como consecuencias, ineficiencias o rotura en la película de lubricante, aumento de la temperatura, golpes, vibraciones, ruidos, pudieran aparecer microgrietas, se pierde la capacidad de estanco, en fin, baja la eficiencia y el consumo energético sobrepasa el valor calculado.

A modo de resumen podemos apreciarlo en la siguiente tabla.

<b>MODO DE FALLO</b>	<b>PROPIEDADES REQUERIDAS</b>	<b>LOCALIZACION DEL FALLO</b>	<b>ACTUAR SOBRE</b>
<b>DEFORMACION PLASTICA</b>	RESISTENCIA A LA COMPRESION	SUBSTRATO	ACERO TRATAMIENTO TERMICO
<b>ROTURA</b>	TENACIDAD	SUBSTRATO	ACERO TRATAMIENTO TERMICO
<b>ABRASION</b>	DUREZA	SUPERFICIE	ACERO TRATAMIENTO TERMICO RECUBRIMIENTO
<b>ADHESION</b>	BAJO COEFICIENTE DE FRICCION	SUPERFICIE	ACERO TRATAMIENTO TERMICO RECUBRIMIENTO

Tabla 1. Tipología de fallos [1]

### 3.2 TRIBOLOGÍA

Las fallas y la reducción de la vida útil de los elementos mecánicos debido al efecto negativo del desgaste fueron motivo de análisis por especialistas en diferentes momentos, pero no fue hasta la década del 1960 en que los ingleses comenzaron a analizar estas causas con un enfoque integral, surgiendo así el concepto de Tribología.

El origen de este término es relativamente reciente, fue propuesto en un Congreso en Inglaterra en 1966, por un Comité de expertos británicos, y surge producto de la necesidad de valorar integralmente una nueva propiedad tecnológica que relacione los fenómenos de las capas superficiales de los materiales con la acción de agentes internos y externos. Cuando se habla de valoración integral, se entiende que esta Ciencia Tribológica, incluye el estudio y análisis no solo de aspectos tan antiguos como el de la fricción y el desgaste; si no también el de la lubricación y todos ellos en forma conjunta y acompañados del análisis de la incidencia de todos aquellos factores que afectan todo proceso tribológico.

Cerca del 30% de la energía que se pierde en la industria mundial, se pierde por fricción. Las pérdidas energéticas por desgaste, en la automoción influyen directamente en el consumo de combustible y en el aumento de la contaminación ambiental. Con el desarrollo de la tribología y la introducción de los avances logrados en la industria, se ha podido incrementar las horas de vida útil de los elementos y reducir los efectos negativos que antes mencionamos.

Las pérdidas por desgaste afectan también la productividad de una nación. Esto puede tener su efecto de diversas formas. La primera es referida a la diferencia en calidad por la vida útil de los productos nacionales referida a los importados. La segunda está referida a los cuantiosos costos de mantenimiento que se necesitarían ante productos de severo desgaste y poca vida útil. Sin embargo, no debe dejarse de mencionar la consecuencia más dramática de un fallo por problemas tribológicos, lo cual es la posible pérdida de vidas humanas debido a accidentes fatales. [2]

A partir de este Congreso, comenzaron a elaborarse planes de trabajo basado en el estudio de la fricción y en la búsqueda de acciones para reducir el desgaste y el consumo de energía en las máquinas, especialmente en el sector automotriz por ser el de mayor incidencia sobre un alto por ciento de la población.

Señalaban el carácter multidisciplinario de esta ciencia, en la que, entre otras, participaban la física, la química, la metalurgia, la economía, la ciencia de los materiales, la matemática y la comunicación, desarrollándose posteriormente la ingeniería de superficie, que ha dado respuesta a una serie de fallos presentados.

Para bien de esta ciencia, el desarrollo científico técnico aplicado a los tratamientos térmicos, ha jugado un papel determinante, pues procesos como, tratamientos termoquímicos, DLC, PVD,

entre otros, han aumentado significativamente la resistencia al desgaste y han incrementado las horas de servicio de las piezas sometidas a fricción, al igual que un desarrollo constante en la obtención de lubricantes con mejores prestaciones.

### 3.3 ACEROS SELECCIONADOS

Para la realización de este trabajo se han seleccionado dos tipos de aceros.

El acero F521, aunque actualmente es más utilizada la denominación (1.2379 o D2) de producción convencional y el acero Vanadis4 obtenido por pulvimetalurgia.

Aceros de producción convencional 1.2379

Los aceros de producción convencional tienen un menor rendimiento en comparación con los obtenidos por pulvimetalurgia, se pueden mencionar que presentan:

- Distribución desigual de los carburos
- Cierta grado de segregaciones
- Bajo nivel de homogeneidad
- Bandas de carburos marcadas, sobre todo en el núcleo de piezas grandes
- Cierta variedad en el tamaño desigual en sentidos longitudinal y transversal.

El acero 1.2379 es de los aceros especiales manipulables que pertenece al grupo de aceros aleados para herramientas. Es un acero muy duro, de mínima variación dimensional, que más concretamente forma parte del subconjunto de los aceros indeformables al 12% de Cromo, el cuál templado llega hasta los 62 HRC.

Destinado para herramientas de corte de gran rendimiento, es un acero ledeburítico Dúplex de alta tenacidad, que se suele producir bien en pletinas de diferentes formatos, o bien en barras de diferentes grosores. Especialmente apto para el temple al aire. Al ser un acero de alta resistencia al revenido, incluso templado a altas temperaturas, también se puede nitrurar adicionalmente como acero para trabajo en frío sin disminuir su temple.

Diferentes usos del acero 1.2379:

- El acero 1.2379 tiene múltiples utilidades:  
Matrices y cortantes de formas complicadas, elevada dureza y gran resistencia al desgaste
- Trabajos en grandes series, pero no sometidas a esfuerzos de flexión
- Cuchillas circulares y de cizalla, machos, peines de roscar, escariadores, matrices de acuñación, calibrado a prensa en frío, moldes para plásticos.
- Este acero también se utiliza en troquelería y en diferentes industrias como la farmacéutica y cerámica [3]

Composición química en %

Calidad	C	Mn	Si	Cr	V	Mo	Recocido	Templado	Templado y revenido
1.2379	1,55	0,40	0,25	12	0,95	0,80	200/230 HB	62/65 HRC	60/63 HRC

Tabla 2. Composición química 1.2379

Es un acero adecuado para corte y conformado de chapa de acero de alta resistencia, UHSS, estos materiales exigen grandes requisitos al acero para utillajes, tanto en resistencia al desgaste abrasivo, como ductilidad [4].

#### **Aceros pulvimetalúrgicos Vanadis4**

Estos serían los mejores, fabricados para las máximas exigencias.

- Óptima distribución de carburos
- Máxima pureza metalúrgica
- Acero libre de segregaciones
- Propiedades isotrópicas
- Máxima resistencia al desgaste y gran tenacidad
- Alta dureza
- Muy buena estabilidad dimensional
- Elevada resistencia a la presión.



Ilustración 1. Fabricación de aceros pulvimetalúrgicos.

### Aplicación:

Acero pulvimetalúrgico para trabajar en frío, de alta resistencia al desgaste y alta tenacidad, muy adecuado para el desgaste adhesivo en especial materiales blandos tipo inoxidable, aluminio, trabajos en materiales de chapa gruesa. Corte y conformado, corte fino, extrusión en frío, compactación de polvo, embutición profunda [5].

Calidad	C	Si	Mn	Cr	Mo	V
Vanadis4	1.4	0.4	0.4	4.7	3.5	3.7

Tabla 3. Composición química del acero Vanadis 4

### 3.3.1 EFECTO DE LOS ELEMENTOS QUÍMICOS DE ALEACIÓN EN LOS ACEROS:

#### SILICIO (Si)

- Se emplea como desoxidante en general
- Elemento de aleación en chapas eléctricas y magnéticas
- Mejora la resistencia a la oxidación
- Eleva la templabilidad de los aceros que no contienen elementos gratificantes
- Proporciona resistencia a los aceros de baja aleación
- Se emplea como complemento del manganeso para evitar poros y otros defectos internos en el acero
- Incrementa el límite elástico por ellos se utiliza en acero para muelles

#### MANGANESO (Mn):

Elimina la fragilidad en caliente originada por el S

- Aumenta la templabilidad
- En elevadas concentraciones y con altos contenidos de C proporciona gran resistencia al desgaste.
- Es fuertemente desoxidante, es de especial importancia tal propiedad en los aceros de fácil mecanización.
- Disminuye el agrietamiento en caliente. Aumenta el límite elástico y la resistencia a la tracción, contribuye notablemente a conferir resistencia y dureza del acero

### **CROMO (Cr):**

- Fuerte formador de carburos, gracias a los cuales elevan la resistencia, facilitan el corte y la resistencia al desgaste.
- Reduce la resiliencia, aumentando la profundidad de penetración al temple
- Hace que los aceros sean templables al aceite o bien especialmente para contenidos altos en cromo al aire.
- Favorece la resistencia en caliente
- Aumenta la resistencia a la corrosión y a la oxidación
- Aumenta la templabilidad
- Aumenta la resistencia a temperaturas elevada
- Con % de C elevado, proporciona resistencia al desgaste

### **MOLIBDENO (Mo)**

- Profundiza la acción del temple
- Eleva la temperatura de sobrecalentamiento de la austenita
- Aumenta la resistencia en caliente y a la afluencia
- Amplia el campo de utilización de los aceros inoxidable
- Forma partículas resistentes al desgaste
- Subsana notablemente la fragilidad de revenido
- Favorece la formación de estructuras de grano fino y la penetración de temple

### **VANADIO (V):**

- Eleva la temperatura de sobrecalentamiento de la austenita, afina el grano
- Estando disuelto aumenta la templabilidad
- Resiste el revenido y produce una dureza secundaria muy señalada [6]

### 3.4 NITRURACIÓN:

La nitruración pertenece al grupo de tratamientos termoquímicos juntamente con la cementación y carbonitruración. Con ellos además de los cambios en la estructura del acero, también se producen cambios en la composición química de la capa superficial, añadiendo diferentes productos químicos hasta una profundidad determinada. Estos tratamientos requieren el uso de calentamiento y enfriamiento controlados en atmósferas especiales.

Entre los objetivos más comunes de estos tratamientos están, aumentar la dureza superficial de las piezas dejando el núcleo más blando y tenaz, disminuir el rozamiento aumentando el poder lubricante, aumentar la resistencia al desgaste, aumentar la resistencia a fatiga y a la corrosión.

El proceso consiste en enriquecer la superficie de la pieza en nitrógeno calentándola en una atmósfera específica a temperatura comprendida entre 500 y 580 °C, formándose una capa de muy poca profundidad pero de dureza muy superior a la capa de cementado. Durante el proceso no hay deformaciones y obtenemos una mayor resistencia a la corrosión.

Si en un recinto, un horno de tratamiento térmico, se somete al amoníaco (NH<sub>3</sub>) a temperaturas de 500° C, se descompone en nitrógeno e hidrógeno. El hidrógeno, más ligero, se separa del nitrógeno por diferencia de densidad. El nitrógeno liberado por la descomposición del amoníaco forma la atmósfera en el interior del horno que, en contacto con la superficie de hierro y a esa temperatura, forma nitruros de hierro, un compuesto de gran dureza pero frágil. [7]

La duración de la capa superficial tratada por nitruración es aproximadamente 10 veces mayor que la de cementación, necesitando unas 20-50 horas para alcanzar una profundidad de 0.2-0.4 mm.

#### 3.4.1 ACEROS PARA NITRURAR.

Normalmente se emplean aceros entre 0,2 y 0,6 % C, aleados con Al, Cr, Mo y V. El contenido de C no influye en la dureza y levemente en la profundidad de capa, disminuyendo ésta con el % de C.

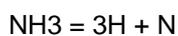
El Al es el elemento más importante para lograr las máximas durezas, pero debe ir siempre acompañado de otros aleantes para evitar capas nitruradas muy frágiles, el Mo aumenta la dureza de la capa, mejora la tenacidad del núcleo y evita la fragilidad de los aceros, el Cr y el V aumentan la profundidad de capa dura.

En los aceros al carbono, a igualdad de tiempo, se obtiene una mayor profundidad de capa, ya que los aleantes forman nitruros y disminuyen la difusión hacia el interior, pero los valores de dureza son sensiblemente inferiores.

Este tratamiento también se emplea en algunos aceros inoxidables, aceros al Cr-Ni y ciertas fundiciones al Aluminio o al Cromo. La dureza de la capa superficial es natural, es decir, se obtiene sin temple; por lo tanto, sirve para el trabajo a temperaturas relativamente altas (400-500°C).

### 3.4.2 TIPOS DE NITRURACIÓN:

1. **Nitrurado gaseoso:** El acero se calienta a una temperatura entre 495 a 565 °C y se mantiene por un período de tiempo, en contacto con gas amoníaco.



El nitrógeno del gas se introduce en el acero formando nitruros, los que se dispersan por toda la superficie del metal.

La nitruración gaseosa es un proceso de tratamiento termoquímico de baja distorsión y temperatura (típicamente 520°C / 970 °F), que se realiza para mejorar las propiedades superficiales de los componentes ferrosos acabados o casi acabados. Si se incorpora un gas carbónico, el proceso se denomina nitro carburación gaseosa. La capa consta normalmente de dos zonas: la capa de compuesto (capa blanca), que puede ser un nitruro cúbico o hexagonal, y una capa inferior de difusión, con nitrógeno disuelto y precipitaciones de nitruros duros. La capa de compuesto de la superficie de las piezas es la responsable principal de las grandes ventajas que supone la resistencia al desgaste, la fricción, la abrasión y el agarrotamiento. La capa de difusión aporta una mejor resistencia a la fatiga y funciona como un soporte para la capa sólida de compuesto. Mediante el control y el ajuste de la atmósfera del proceso, la constitución de la capa puede optimizarse con capas delgadas de compuestos, para mejorar la resistencia a la fatiga, y en el caso de la nitrocarburación gaseosa y posterior oxidación, con capas de compuesto gruesas y ricas en nitrógeno y carbono, si se desea obtener una buena resistencia al desgaste y la corrosión.

2. **Nitrurado líquido:** En este caso se utilizan las sales de cianuro fundidas, y la temperatura se mantiene por debajo de la zona de transformación. El nitrurado líquido aporta más nitrógeno y menos carbono, que el cianurado o la cementación de baños de cianuros. Se obtienen espesores entre (0.03 y 0.3) mm.

El nitrógeno tiene mayor capacidad de endurecimiento con ciertos elementos, y debido a esto, se han desarrollado aleaciones de acero especiales de nitrurado. El aluminio en cantidades entre 1 y 1.5% en el acero ha demostrado ser adecuado, pues se combina con el gas para formar un componente muy estable y duro.

3. **Nitruración iónica:** Las piezas de acero se colocan en un porta-muestra, adentro de una cámara sellada herméticamente. Con una bomba de vacío se extrae el aire y posteriormente se inyecta un flujo muy pequeño de una mezcla de gases de nitrógeno e hidrógeno. La pieza colocada en el porta-muestra se coloca al polo negativo de una fuente eléctrica de alto voltaje. El flujo de corriente eléctrica a través de la mezcla de gases enciende un plasma luminoso con alto contenido de iones positivos de nitrógeno que son atraídos hacia la pieza de acero conectada al polo negativo.

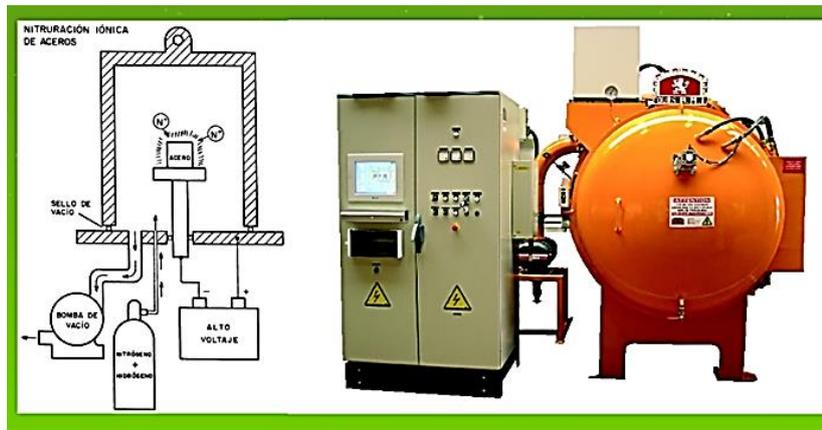


Ilustración 2. Instalación para nitruración iónica

La nitruración / nitro carburación iónica es un tratamiento termoquímico moderno que se lleva a cabo con una mezcla de nitrógeno, hidrógeno y un gas carbónico opcional. En este proceso de baja presión se aplica una diferencia de potencial entre la pieza y la pared del horno. Alrededor de las piezas se genera una descarga luminiscente con un alto nivel de ionización (plasma). En el área de la superficie directamente cargada por los iones, se forman y descomponen nitruros ricos en nitrógeno, liberando nitrógeno activo en la superficie. Debido a este mecanismo la protección se obtiene fácilmente, cubriendo las áreas implicadas con una máscara metálica. La nitruración iónica permite modificar la superficie según las propiedades que se desea obtener. La adaptación de la mezcla gaseosa permite obtener capas y perfiles de dureza a medida: desde una superficie libre de capa de compuesto con bajo contenido en nitrógeno y un espesor de hasta 20 micras, a una capa de compuesto con alto contenido en nitrógeno y una carga adicional de gas carbónico (nitro carburación iónica). La amplia gama de temperatura aplicable permite muchas aplicaciones, más allá de las posibilidades de los procesos gaseosos o de baño de sal.

### 3.4.3 VENTAJAS DE LA NITRURACIÓN:

En el Gráfico 1, podemos apreciar, como la nitruración alcanza una profundidad de penetración de unas 50  $\mu\text{m}$  con una dureza elevada en la superficie exterior y a medida que aumenta la profundidad va disminuyendo de forma gradual.

- Con el nitrurado se obtiene una alta dureza superficial, que oscila entre 900 y 1100 HV
- Ofrece un mayor efecto de soporte para el recubrimiento duro, 1000 HV debajo del revestimiento duro.
- Elevada resistencia a la corrosión, después del nitrurado, los aceros resisten mejor que los aceros ordinarios la acción corrosiva del agua dulce, agua salada y atmósferas húmedas. Por eso se suele utilizar el nitrurado en piezas que deben sufrir ciertos agentes corrosivos.
- Se conservan los acabados pulidos de alto brillo.
- La capacidad de soportar cargas de presión aumenta significativamente. Esto es particularmente una ventaja cuando se trabaja con láminas de metal de alta resistencia.
- Ausencia de deformaciones: como la temperatura de proceso es inferior a 500 °C y no es necesario enfriar rápidamente, se evitan inconvenientes por posibles deformaciones, por lo que las herramientas conservan su alta precisión dimensional.
- Nitrurado selectivo: se pueden tratar solamente las áreas de la pieza que sean necesarias.
- Retención de dureza a elevada temperatura: las capas nitruradas conservan la dureza hasta los 500° C, siempre que el período de calentamiento no sea muy prolongado. Esta retención de la dureza es superior a otros tratamientos térmicos como cementación, temple por inducción, etc. que, por tener estructura martensítica, la pierden muy rápidamente a partir de los 200° C.
- Incremento de resistencia a la fatiga: la distorsión de la red cristalina por la difusión del nitrógeno incrementa la resistencia a la fatiga y disminuye los efectos de entalla y corrosión. [8]

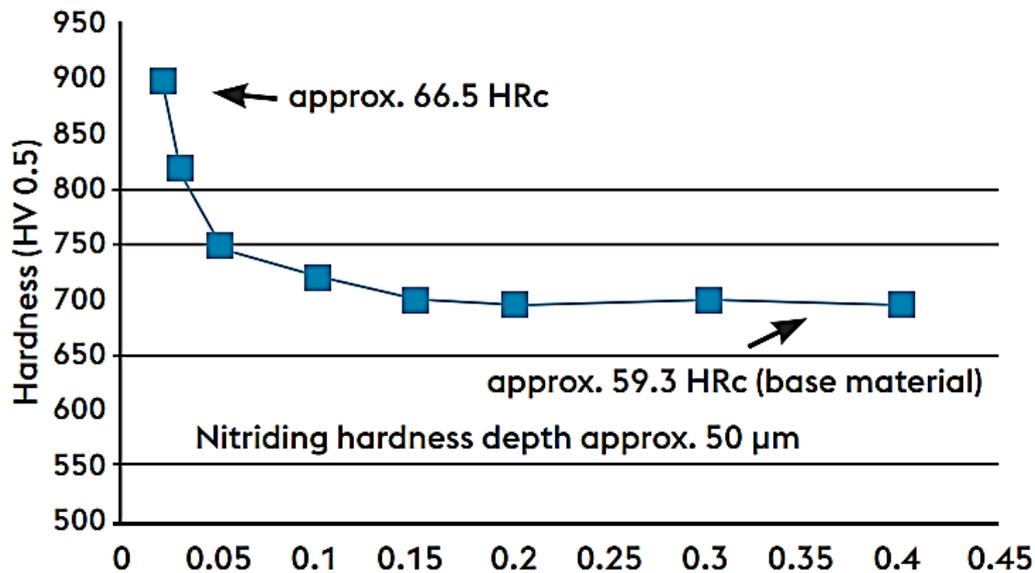


Gráfico 1. Dureza superficial contra profundidad de penetración de Nitruración [6]

### 3.5 CAPAS FINAS

La aplicación de capas duras comenzó en los años 70 con el proceso de CVD (Chemical Vapor Deposition) y en los años 80 surge el PVD (Physical Vapor Deposition) que permite mayor variabilidad en la composición, siendo el Nitruro de Titanio (TiN) el primero en ser comercializado.

Luego en los años 90 surge el Carbonitruro de Titanio (TiCN) y el Nitruro de Titanio Aluminio (TiAlN), de mejores características, más dureza, resistencia al desgaste y estabilidad térmica.

En los últimos años, la tecnología de recubrimientos y capas delgadas ha alcanzado un fuerte desarrollo debido a la gran variedad de aplicaciones, que van desde los recubrimientos protectores y decorativos utilizados en la industria mecánica y del automóvil hasta las capas selectivas empleadas en paneles arquitectónicos, filtros ópticos, incluyendo las películas semiconductoras, optoelectrónicas y magnéticas, etc. Todo este desarrollo ha sido posible gracias a los avances recientes, tanto en la tecnología de vacío como en las técnicas de deposición, de análisis de superficies y de caracterización eléctrica, mecánica y óptica. [9]

### 3.5.1 RECUBRIMIENTOS MÁS EMPLEADOS

Los recubrimientos se pueden clasificar siguiendo varios criterios, dada a la gran variedad que existen. Una clasificación es en dependencia de la deposición en el sustrato (15) y se pueden clasificar en tres grupos:

1. **Fase vapor:** El recubrimiento se produce a partir de una fase vapor que condensa.
2. **Disolución:** El recubrimiento se sintetiza a partir de una disolución que precipita.
3. **Fundido o semi-fundido:** 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 4. Clasificación de los recubrimientos según el modo de deposición.

Los procesos que se producen en fase vapor son el CVD y el PVD. 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 a los 1000 °C. 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
Los más conocidos. Se aplican desde hace décadas.	Usados desde los años 60-70.	Aparecen en el mercado de herramientas en los años 80.
Aplicaciones decorativas, componentes y algo en herramientas (deformación).	Se usan en diversidad de tipos de herramientas de corte, deformación, en materiales de acero o metal duro.	Herramientas de corte, deformación; materiales de acero o metal.
Durezas de hasta 1000 Vickers, mucho más pequeñas que las durezas de PVD o CVD.	Durezas hasta 4000 Vickers, parecidas a las de PVD, mucho mayores que las de cromoduro.	Durezas hasta 4500 Vickers, parecidas a las de CVD, mucho mayores que las de cromoduro.
Grado de adhesión mucho menor que la adhesión de recubrimientos de PVD o CVD.	Grado de adhesión mayor que la adhesión de recubrimientos PVD.	Adhesión PVD menor que la del CVD, pero mucho mayor que la del cromoduro.
Espesores aplicables (cientos de micras), mucho mayores que los espesores de PVD o CVD (en componentes o herramientas de precisión poco factible).	Espesores aplicables en CVD, mucho mayores que los de PVD, pero mucho menores que los de cromoduro.	Espesores de PVD menores que los de CVD, mucho menores que los de cromoduro (ideal en herramientas de precisión).
Procesos a Tª amb. en medios ácidos. Flexibilidad de aplicación a diferentes metales y diferentes geometrías.	Procesos CVD a alta Tª (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.	Procesos PVD a baja Tª (200-450°C); sin tratamientos térmicos posteriores; grados de acero y metales duros variados.
Enmascaramiento de algunas superficies de las piezas posibles.	Enmascaramiento de superficies complicado.	Enmascaramiento de superficies poco problemático.
Recubrimiento de superficies interiores sin problemas.	Recubrimiento de interiores sin problemas.	Superficies interiores depende del caso.

Tabla 5. Comparativa de recubrimientos metálicos o cerámicos.

### 3.5.2 RECUBRIMIENTOS PVD:

Es sabido que los recubrimientos cerámicos PVD mejoran la resistencia al desgaste, disminuyen los coeficientes de fricción, mejoran la resistencia a la corrosión y crean barreras químicas. Estos recubrimientos juegan un papel clave para facilitar el desmoldeo en moldes de inyección de plástico o deslizamiento en matrices de estampación. En el caso de la deformación metálica, se requieren recubrimientos de gran espesor, muy bien adheridos y, por tanto, con tensiones internas bajas. En el caso de los moldes de inyección de plástico con acabados especulares u ópticos, el recubrimiento PVD además debe tener una gran uniformidad y una rugosidad extremadamente baja. Plásticos reforzados con fibras, piezas inyectadas transparentes, aplicaciones ópticas, deformación de chapas gruesas o con alto límite elástico, chapas de aceros Inoxidables, deformación de metales no férreos, son algunas de las aplicaciones más exigentes.[10]

Las distintas técnicas de obtención de recubrimientos PVD se caracterizan por conseguir evaporar e ionizar el metal reactivo (a partir de metal puro) por medios físicos. Cada método emplea un sistema de evaporación distinto y lo emplea para unas ciertas aplicaciones. Los más extendidos en la industria son: ion-plating, evaporación por arco catódico, sputtering.

Los recubrimientos PVD se realizan en cámaras de alto vacío (10<sup>-5</sup> mbar) Durante la etapa de recubrimiento, el grado de vacío presenta valores de 10<sup>-3</sup> mbar. PECVD se realiza también en condiciones de vacío, sin embargo, la presión de los reactivos es superior a los procesos PVD. Dependiendo de los gases involucrados en el proceso las presiones oscilan entre 0.5-4 mbar. Los procesos CVD se realizan a presión atmosférica o, actualmente en condiciones de baja presión.

Los procesos PVD se realizan a temperaturas moderadas (480°C –550°C) cuando se trata de recubrimientos cerámicos de alta dureza. Recubrimientos tribológicos o de bajo coeficiente de fricción se pueden realizar a temperaturas inferiores. En el caso de recubrimientos decorativos, la temperatura no suele superar los 50°C-60°C.

Las técnicas más empleadas se pueden dividir en dos grandes grupos,

1. Técnicas de evaporación
  2. Técnicas de sputtering
- Si el sistema de evaporación se produce por calentamiento de un haz de electrones sobre un crisol conteniendo el metal, la técnica se denomina ion plating.
  - Si la evaporación se produce por efecto de un arco eléctrico que se desplaza sobre el metal (cátodo) se trata de evaporación por arco. Este es un proceso en el que varios metales se evaporan de un material de origen sólido dentro de una cámara de vacío, utilizando una soldadora de arco. Los metales evaporados, como el titanio, cromo,

circonio, aluminio y otras aleaciones, reaccionan con un gas (generalmente nitrógeno y/o un gas que contiene carbono) para formar un material de recubrimiento que se condensa en las partes a recubrir. El PVD de arco catódico produce altos niveles de ionización de metales (más del 95 por ciento), lo que ayuda a garantizar una alta adherencia del recubrimiento al material del sustrato. Generalmente, el proceso tiene amplias ventanas de operación, lo que permite depositar recubrimientos de calidad utilizando una variedad de parámetros del proceso. Otros procesos de recubrimiento, como la pulverización catódica o la deposición iónica, no son tan robustos y tienen ventanas de operación más pequeñas, lo que dificulta la producción de un recubrimiento de calidad de manera consistente. [9,10,11]

- Si la evaporación se produce por bombardeo sobre el metal o cerámico (en este caso el blanco o cátodo no tiene por qué ser metálico) mediante un haz de iones de un gas inerte (Ar) la técnica se denomina Sputtering o pulverización catódica. La ionización puede ser optimizada mediante campos magnéticos (magnetron) aplicados sobre el blanco. Generados los iones reactivos se introducen los gases a muy baja presión para formar los compuestos

El proceso de sputtering, los átomos que constituyen el recubrimiento se obtienen bombardeando unos blancos (metálicos o cerámicos) con iones de un gas inerte (Argon) a baja energía, (500 a 1000 eV). Estos átomos pulverizados viajan hasta las superficies próximas depositándose en ellas en proporciones similares a las del blanco de partida. Otras veces mediante la pulverización simultánea de dos o más materiales, es posible producir capas de recubrimientos binarios, ternarios, etc. Los procesos de sputtering tienen el inconveniente de ser más lentos, que los de evaporación; pero tienen la ventaja de ser más limpios, más versátiles, más controlables y no necesitan altas temperaturas.

Durante mucho tiempo los sistemas empleados se basaban en fuentes de iones de baja energía y una adecuada disposición geométrica de fuentes blancos y superficies a recubrir.

Recientemente el empleo de magnetrones desbalanceados permite prescindir de las fuentes de iones y alcanzar velocidades de recubrimientos próximas a las de los procesos de evaporación, de manera que los procesos de sputtering se han hecho comerciales [12]

### **PVD MAGNETRON SPUTTERING: CARACTERÍSTICAS, VENTAJAS E INCONVENIENTES**

La tecnología de evaporación por pulverización catódica (PVD MS, magnetron sputtering) se diferencia de las otras tecnologías PVD, esencialmente en la manera de evaporar un metal o compuesto cerámico. Ésta se produce mediante el bombardeo de iones de un gas inerte, como argón, sobre el blanco. Este bombardeo es amplificado y densificado mediante campos magnéticos estratégicamente diseñados. Así se consigue sublimar los átomos metálicos e ionizarlos sin pasar por el estado de fusión. Una vez obtenido el metal o compuesto ionizado, el

proceso de deposición es similar a todas las técnicas PVD y el espesor dependerá de las características de movimiento de las piezas en el reactor y del tiempo de recubrimiento.

#### **Ventajas**

- Obtención de capas muy homogéneas, de morfología y composición constante.
- Posibilidad de evaporación de materiales exóticos, cerámicos, no conductores.

#### **Desventajas.**

- Crecimiento de las capas inicialmente era muy lento, lo que lo hacía el proceso poco viable en aplicaciones industriales, aunque la variante HIPIMS ha permitido disminuir este tiempo y poder introducirlo en la industria,

Cada técnica PVD se ha especializado en determinadas aplicaciones y ha desarrollado compuestos específicos.

### **APORTACIÓN DE LA TECNOLOGÍA PVD MAGNETRON SPUTTERING A LOS MOLDES DE INYECCIÓN**

Los moldes de inyección de plástico requieren una ausencia de deformaciones durante los procesos de recubrimiento, aumento de la resistencia al desgaste y capacidad de pulido, facilidad de desmoldeo, mantenimiento de las propiedades anticorrosivas en aceros inoxidables y mejora de estas propiedades en aceros templados o pretratados. De todos los requisitos, quizás sea la absoluta reproducibilidad del acabado superficial original la más solicitada en inyección de plásticos, especialmente en figuras con pulido especular u óptico. Éste es el caso de piezas exteriores vistas, acabados decorativos con plásticos transparentes, piezas de plástico que deban ser recubiertas con capas finas o componentes para la iluminación de vehículos. Como se ha comentado anteriormente, la obtención de capas libres de defectos, independientemente del compuesto de la capa, permite reproducir la superficie incluso en acabados muy exigentes

Sólo la evaporación por cañón de electrones (electrón beam, e-beam) y magnetron sputtering (MS) lo consiguen. Si se trata de obtener compuestos de dos o más metales (AlTiN, AlCrN, AlTiCrN, TiSiN,) la técnica e-beam queda descartada por la dificultad de controlar la evaporación simultánea de varios metales mediante bombardeo con un haz de electrones. PVD MS consigue evaporar controladamente varios metales simultáneamente y depositarlos garantizando el pulido óptico.

Evaporación por arco eléctrico y por haz de electrones se han especializado en recubrimientos duros para resistencia al desgaste. Los compuestos más aplicados son TiN, TiCN, TiAlN, CrN.

Dependiendo de las características de trabajo, su obtención es en forma de monocapas, multicapas incluso nanocapas. Los recubrimientos de bajo coeficiente de fricción se desarrollan a partir de las propiedades de los lubricantes sólidos como el grafito, azufre o sulfuro de molibdeno. La obtención de estos compuestos como capa superficial permite bajar el coeficiente de fricción a valores inferiores a 0.1. Conocidos genéricamente como MeC: H se obtienen por técnicas de Sputtering y por evaporación por arco. Están basados en la incorporación de altos porcentajes de carbono con porcentajes muy bajos de metal (W, Mo, Ta) o la obtención de sulfuro de molibdeno (MoS<sub>2</sub>). En algunos casos se aplican como capa final sobre una capa dura.

Debido al color que presentan algunos compuestos (TiN es de color dorado) se han obtenido compuestos con finalidades decorativas. Evaporación por arco y Sputtering son las técnicas más empleadas para obtener nitruros, carbonitruros y óxidos decorativos. TiN, ZrN, ZrCN, óxidos de titanio son algunas posibilidades para embellecer griterías, vidrio, incluso plástico. La versatilidad de las instalaciones PVD permiten infinidad de posibilidades que día a día se van desarrollando.  
[11]

### 3.5.3 PREPARACIÓN DE LA SUPERICIE ANTES DEL PVD

El éxito de un recubrimiento PVD, se logra con la preparación inicial de la superficie, pues es un proceso muy exigente, para lograr una buena adherencia. Las superficies de las piezas deben estar libres de óxidos, restos de mecanizado por descarga eléctrica (EDM) y películas orgánicas, ya que dichos contaminantes pueden afectar negativamente la calidad del recubrimiento.

Para eliminar los contaminantes antes del recubrimiento, se usan técnicas como pulido, pulido por tambor, el grabado ácido y el blasting con arena y vidrio. Sin embargo, algunas de estas técnicas pueden alterar el acabado de la superficie de la pieza a recubrir, por lo que es muy importante la vinculación entre la empresa de recubrimientos y el cliente para desarrollar un proceso que cumpla con las expectativas en cuanto a la calidad del recubrimiento y su apariencia. [13]

### 3.5.4 TENDENCIAS ACTUALES. TRATAMIENTO DÚPLEX

El PVD es una tecnología avanzada para recubrimientos que debería sustituir a los tratamientos superficiales convencionales como el niquelado o el galvanizado. La fiabilidad, la seguridad, o el respeto al medio ambiente son algunas de las ventajas que avalan a esta técnica, cuyos avances también permiten aplicaciones decorativas trasladables a sectores como el metalmecánico.

El PVD es una técnica eficaz, rápida y fiable para la consecución de atractivos acabados decorativos e interesantes funcionalidades superficiales y múltiples aplicaciones. Además de la rapidez, esta técnica presenta mejoras relativas al medio ambiente

- no genera residuos acuosos y hace un uso óptimo de los materiales, por lo que es una técnica respetuosa con el entorno
- es muy segura, ya no requiere del uso de productos químicos peligrosos,

muy flexible, permite el tratamiento de un amplio rango de piezas con distintos recubrimientos.

En los últimos años ha surgido el desarrollo de recubrimientos nanoestructurados fundamentalmente para la aplicación de herramientas de corte, con elevada resistencia térmica y mayor dureza, destacando el TiAlN-TiSiN, de Hitachi, y el TiAlSiN con una estructura nano composite.

Las herramientas recubiertas tienen una estructura de material compuesto, que consiste en un sustrato cubierto por una capa dura anti-fricción, químicamente inerte y aislante térmicamente, de pocas micras de espesor. Estas herramientas tienen un mejor comportamiento ante 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 [14-15]

El tratamiento Dúplex o como se conocen en la ingeniería de superficie de segunda generación. Por ejemplo, recubrimientos delgados como PVD TiN pueden proporcionar una superficie con propiedades tribológicas mejoradas en términos de baja fricción y alta resistencia al desgaste, pero se producirá una falla prematura catastrófica si el sustrato se deforma plásticamente bajo una alta carga aplicada; por otro lado, las capas endurecidas profundas producidas por técnicas de modificación de superficies tales como la aleación de superficie de haz de energía pueden mantener altas tensiones de contacto, pero todavía exhiben mayores tasas de fricción y desgaste en comparación con la mayoría de los recubrimientos cerámicos.

El tratamiento Dúplex que analizamos en este trabajo, está formado por una nitruración, seguida de un proceso PVD. La nitruración logra las ventajas que comentamos anteriormente, pero lo más importante, es que forma una capa soporte sobre la cual se deposita la capa fina, y con ello aumenta las propiedades mecánicas del sustrato por lo que admite mayor capacidad de cargas

externas, sin deformaciones plásticas, y los resultados obtenidos en cuanto a la resistencia al desgaste son favorables.

. El desarrollo del tratamiento Dúplex ha sido satisfactorio comparado con otros tratamientos, Se espera que con el desarrollo de éste, se alcanzarán grandes beneficios técnicos y económicos disponibles a través de la aplicación de tecnologías de ingeniería de superficies Dúplex en muchos nuevos sectores del mercado.

La ingeniería de superficie se ha convertido en una tecnología, con gran impacto en los procesos tribológicos del funcionamiento de los conjuntos mecánicos. Ha tenido un impacto significativo, económico y medio ambiental en la ciencia y en la tecnología moderna a través de una reducción de inversión de capital, aumento en la rentabilidad, cambios en el diseño y en la innovación técnica.

### 3.5.5 PRINCIPIOS DEL TRATAMIENTO DÚPLEX.

Consiste en la aplicación secuencial de dos (o más) tecnologías de superficie establecidas para producir un compuesto de superficie con propiedades combinadas que son incontenibles a través de cualquier tecnología de superficie individual.

Podemos dividirla en dos grupos.

- **Tipo I:** Dos procesos individuales se comparan entre sí y los efectos combinados resultan de ambos procesos
- **Tipo II,** un proceso complementa y refuerza el otro, sirviendo, así como pre o postratamiento, y las propiedades resultantes están relacionadas principalmente con un proceso

Aunque las posibles combinaciones de tecnología de superficie son prácticamente ilimitadas y la lista de tecnologías de superficies Dúplex podría ser interminable, hasta la fecha sólo se ha desarrollado un número limitado de tratamientos Dúplex, y pocos de ellos todavía han encontrado aplicaciones reales.

Cabe señalar que los tratamientos Dúplex no se están mezclando simplemente dos tratamientos superficiales que pueden producir individualmente propiedades deseables. Esto se debe a que un componente tratado Dúplex es típico de un sistema multicapa y el rendimiento resultante de un sistema Dúplex depende más de los efectos combinados de los dos procesos individuales, en lugar del efecto esperado proporcionado por los procesos individuales, es decir, la sinergia de los procesos suele ocurrir.

Este tema es muy importante, pues no significa que el resultado será la sumatoria de lo mejor de cada proceso, por eso es vital identificar correctamente las reacciones metalúrgicas para que los efectos positivos del primer tratamiento, no se perjudiquen con el siguiente.

Basado en el análisis FEM, se ha encontrado que en la mayoría de los sistemas de recubrimiento la deformación plástica inicia en el sustrato cerca de la interfaz recubrimiento-sustrato cuando está sujeto a una carga de relativamente alta intensidad, y la deformación plástica no se inicia en el recubrimiento hasta que se ha desarrollado una gran zona de plástico en el sustrato.

Un proceso Dúplex típico implica la nitruración de plasma combinada y el tratamiento de recubrimiento cerámico PVD de aceros. La nitruración de plasma produce un sustrato relativamente grueso (500  $\mu\text{m}$ ) y duro (900-1000 HV), y al mismo tiempo se forma una fina capa compuesta de nitruro de hierro en la superficie más externa. El espesor de la capa compuesta es una función de la capacidad activa de nitrógeno del plasma y la temperatura y el tiempo de procesamiento.

Con este tratamiento se logra:

- Disminuir la fricción,
- Aumentar la resistencia al desgaste,
- Alta capacidad de carga,
- Alta resistencia a la fatiga
- Mayor adhesión del revestimiento al sustrato

En un estudio realizado y publicado, aparece el gráfico 2, donde se utiliza para el ensayo una carga de 20 N y  $L= 620$  m, se aprecia una comparación del volumen perdido en cuatro probetas con diferentes tratamientos. Es evidente que el tratamiento Dúplex es el de mejores resultados en cuanto al volumen perdido y resistencia al desgaste, mientras que el material no tratado, el de peor resistencia al desgaste debido a la deformación plástica del sustrato.

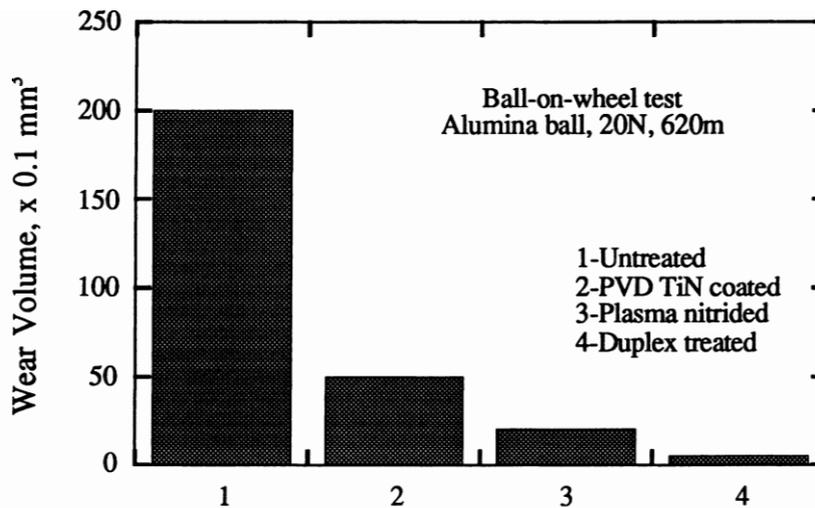


Gráfico 2. Resultados de la pérdida de volumen. Ensayo Pin on Disc

El diseño con ingeniería de superficies Dúplex requiere un conocimiento de la distribución de tensión en superficies estratificadas, que se ve afectada por las propiedades elásticas y plásticas de las capas y el sustrato, el coeficiente de fricción de la superficie, así como la distribución de tensión residual del rendimiento de los sistemas Dúplex [16-17-18]

Un ejemplo concreto de variantes del Dúplex es el recubrimiento denominado Variantic, que es un recubrimiento de alto rendimiento que consiste en un proceso de nitruración de plasma especialmente diseñado combinado con un revestimiento de PVD nano-capas de baja temperatura. Esta característica nano-capas reduce en gran medida el estrés y mejora la ductilidad, lo que aumenta la longevidad del recubrimiento al evitar microfisuras en la película. Se desarrolló para evitar las distorsiones y desventajas asociadas con los procesos de revestimiento a alta temperatura, todo el tiempo que proporciona resultados equivalentes. Este revestimiento permite que las herramientas se pelen fácilmente y se vuelvan a revestir varias veces para maximizar la vida útil de la herramienta sin dañar el sustrato. Este revestimiento es ideal para aplicaciones de alta presión en las que el desgaste adhesivo y abrasivo de la herramienta se reduce significativamente, lo que proporciona impresionantes mejoras de producción.

#### 4. EXPERIMENTAL

La mayoría de los conjuntos mecánicos, se encuentran cada vez más expuestos a condiciones de trabajo más severas y ésto requiere que sus partes y componentes mecánicos sean capaces de asimilar este régimen de explotación, sin que ocurran averías en el período de su vida útil. Las cargas se hacen más intensas, aumentan las velocidades y entornos más agresivos, con el fin de lograr una alta productividad, una alta eficiencia, con un mínimo de consumo de energía.

Para lograr estos objetivos, ha tenido que evolucionar la forma de conceptualización del diseño. En la actualidad existen paquetes de diseño en 3D, capaces de realizar los cálculos más complejos de las tensiones y deformaciones por medio de elementos finitos.

En cada diseño es necesario combinar un conjunto de propiedades mecánicas que serán luego las que garantizarán el funcionamiento correcto del ensamble, así como fiabilidad durante el tiempo de vida útil, entre ellas podemos mencionar, la resistencia al desgaste, la capacidad de asimilar cargas, la resistencia a la corrosión, la resistencia a fatiga y mucho tiene que ver en este resultado la selección de materiales y el tipo de tratamiento a emplear.

A continuación, se realiza un estudio y se comparan los resultados de tres probetas de acero 1.2379 en diferentes estados metalúrgicos, (a) sin tratamiento térmico, (b) con recubrimiento PVD y (c) con tratamiento Dúplex (nitruración seguida de un tratamiento PVD).

Además, se realizan los mismos ensayos y análisis a una probeta de acero Vanadis4 con tratamiento Dúplex, con el fin de establecer una comparación de este material con el F521.

A continuación, se detallan los ensayos realizados a las cinco probetas, (de ellas hay dos del mismo material y tratamiento térmico aplicado), que es Acero 1.2379 con un recubrimiento PVD Hardlox, por lo que se estudiarán cuatro casos a comparar.

##### 4.1 FABRICACIÓN DE PROBETAS.

Las probetas se fabricaron a partir de una barra de diámetro 32 mm de acero F521 y otra de acero Vanadis4. Se instalaron en un torno y se realizó un mecanizado de cilindrado exterior a dejarlas en diámetro 30 mm. Fueron tronzadas en discos de espesor 8.5 mm.

Luego se rectificaron por ambas caras, con el objetivo de garantizar paralelismo entre ambas y lograr buena adherencia con el loctite al disco giratorio en el ensayo pinc on disc. La superficie de análisis estaría sometida a procesos de pulido después del rectificado para lograr una superficie con acabado de espejo. Para ello se frota la superficie con papel de lija de diferentes granulometrías, comenzando con un grano grueso de desbaste y terminando con un papel de lija muy fino que es quien logra el acabado de espejo conjuntamente con pasta de esmeril.

Es muy importante la preparación de la muestra con respecto a la rugosidad superficial en la superficie a ensayar, debido a que luego en el proceso de recubrimiento PVD, la capa dura que

se adhiere sobre este substrato, que estará entre 3 y 5 micras, copiará exactamente la rugosidad que tenga, lo que influye posteriormente en el cálculo del coeficiente de rugosidad y desgaste en las pruebas tribológicas.



*Ilustración 3. Probeta después del ensayo en el pin on disc.*

## 4.2 RECUBRIMIENTOS REALIZADOS

Para el ensayo se tienen cinco probetas, de ellas dos de igual material y tratamiento, RF01 y RF02, y otras tres con las siguientes características.

Aceros	Denominación	Tratamiento
1.2379	NTF01	No tratada
1.2379	RF01	PVD
1.2379	RF02	PVD
1.2379	DF01	Dúplex. Nitruración + PVD
Vanadis4	DV01	Dúplex. Nitruración + PVD

*Tabla 6. Probetas utilizadas en el estudio*

### 4.2.1 RECUBRIMIENTO PVD

El recubrimiento PVD basado en capas múltiples de AlTiN- TiSiN obtenidas por la tecnología HIPIMS de alta ionización, crecimiento rápido y elevada densidad en el recubrimiento. El recubrimiento presenta dureza muy elevada combinada con la tenacidad que le confieren la estructura nano cristalina de nitruros extremadamente fina y homogénea. Está especialmente indicado para mecanizar aceros templados a durezas muy elevadas y para materiales muy abrasivos.



Ilustración 4. Aplicación de recubrimiento PVD

Beneficios que aporta el recubrimiento PVD

- Elevada dureza y resistencia al desgaste.
- Mantiene los contornos del filo de corte.
- Mecanizados de aceros para matricería y moldes con durezas superiores a 60 HRC.
- Elevada temperatura de oxidación

Dureza	40 Gpa (3800 Hv)
Coefficiente de fricción	0,3 -0,5
Adherencia	Excelente
Espesor de capa	2-3 $\mu\text{m}$
Color	Bronce
Temperatura de obtención	450°C-500°C
Temperatura de degradación (Oxidación)	1200°C

Tabla 7. Características del recubrimiento PVD [26]

#### Parámetros del proceso. PVD

**Vacío:** Bombas de paletas, roots y turbomoleculares

Inicio a 3 mPa

**Calentamiento:** 2 grupos de resistencias.

Fase 1 10000 W 1h

Fase 2 8000 W 0,5 h

T: 480°C.

Vacío mínimo 4mPa

**Etching:** (MF-Electrón Booster)

Heating: 3500W

1) Ar: 200 mln

- MF ; 240 KHz 1600 ns  
P: 350 mPa  
T: 30 min  
2) Electron Booster : 80V  
Ar: 240 mIn  
P: 350 mPa  
T: 30 min

**Bonding Layer Hipims :**

Heating 3500 W  
Hipims 1 Cátodo Cr. Potencia:2500 3500 W-V en rampa. frecuencia: 500 Hz  
Ar: 350 mPa  
Hipims Table: 1000V

**Sputter Cleaning. 5 min.**

Todos los targets con los shutters cerrados. 30 seg Hipims a 3000W.  
Convencionales: 9500W  
Ar: 600 mIn  
Heater 3500 W

**Coating:**

**Fase 1 TiAlN**

Heating 3500W (T piezas 480°C)  
P: 490 mPA  
N2 : 100 mIn  
Turbo a 66%  
Cátodo 1 5000W  
Catodo 3 5000W  
T: 10 seg  
DC table 90 V  
P N2: 580 mPa  
t: 10 seg

**Fase2 TiAlSiN**

Heating 3500 W (T piezas 480°C)  
Cátodos 1 y 3: 9500 W

Cátodos 2 y 4: 500 W

DC Table: 90 V

P N<sub>2</sub> :650 mPa (180 mln)

T: 2400 seg.

### **Fase 3 TiAlSiN**

Cátodos 1 y 3 de 9500W a 500 W a 30 W /seg

Cátodos 2 y 4 de 500W a 6000W a 20 W/seg

DC 110 V

P N<sub>2</sub> :650 mPa (180 mln)

t: 3000 seg

**Cooling** : hasta 180°C en vacío [27]

### 4.3 ENSAYOS REALIZADOS

A continuación, una breve descripción teórica de los ensayos realizados en este estudio, y posteriormente se analizarán sus resultados en los siguientes capítulos.

#### 4.3.1 GD-OES

Para el estudio de la composición en profundidad de los recubrimientos desarrollados se empleó la espectrometría de emisión óptica por descarga luminiscente (GD-OES). Los ensayos se llevaron a cabo en laboratorio de la AIN.



Ilustración 5. Equipo para realizar GD-OES. AIN

Es una técnica espectroscópica que permite analizar de forma rápida la composición química de un material, así como la realización de perfiles superficiales de composición.

Es una prueba necesaria para caracterizar las muestras de estudio, conocer su composición a lo largo del espesor de la capa y el sustrato. El GD-OES al remover gradualmente material de la superficie, va revelando la estructura haciendo un cráter en la probeta. Este cráter ha de tener un fondo plano. Que indica que todo el material ha participado en la descarga. Es capaz de realizar análisis entre 20 nm y 300  $\mu\text{m}$

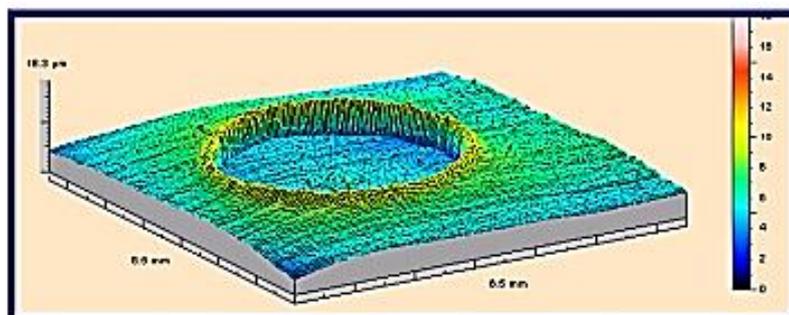


Ilustración 6. Cráter provocado en el proceso GD-OES

ESTUDIO PARA LA MEJORA DE LA ADHERENCIA Y PROPIEDADES TRIBOLÓGICAS DE RECUBRIMIENTOS TiAlN-TiAlSiN

Principio de funcionamiento: Se basa en analizar la luz que es emitida por átomos arrancados de la muestra, en un proceso que tiene tres fases:

- 1ª) Arranque (sputtering) del material (lámpara de emisión)
- 2ª) Separación de la luz emitida (óptica)
- 3ª) Detección de la luz emitida (óptica)

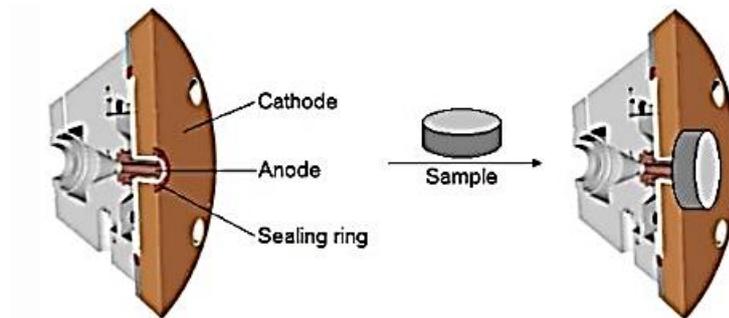


Ilustración 7. Diagrama equipo GD-OES

La probeta se coloca en la fuente de descarga luminiscente, en contacto directo con el cátodo.

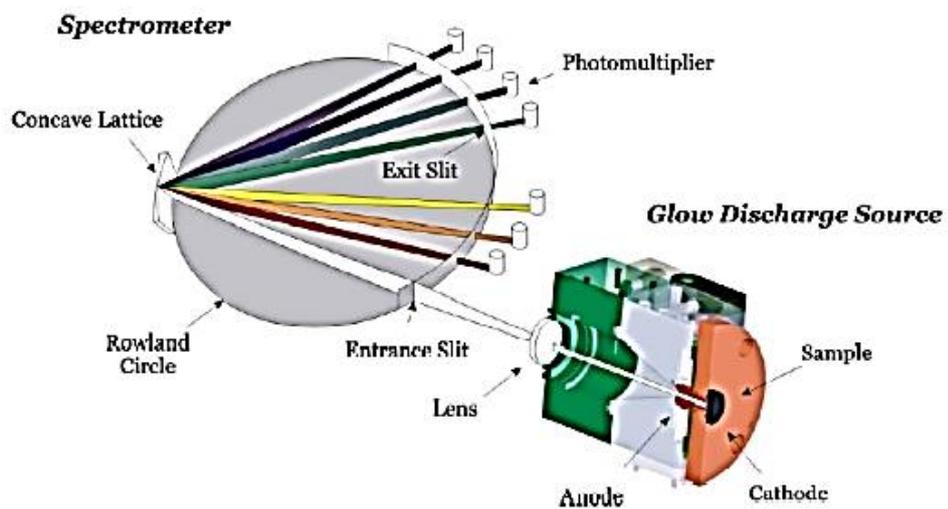


Ilustración 8. Principio de funcionamiento del GD-OES

La cámara de descarga está formada por un ánodo tubular de cobre rodeado de una cerámica aislante y todo ello montado en un bloque de acero inoxidable.

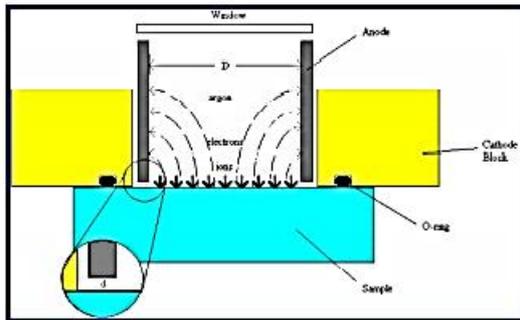


Ilustración 9. Proceso de sputtering (Lámpara de emisión)

La propia muestra para analizar es la que cierra la cámara de descarga, colocándose enfrentada al ánodo a una distancia de 0,1 mm de éste y cerrando el espacio a través de una junta tórica.

## ANÁLISIS DE LA LUZ- (ÓPTICA DEL EQUIPO)

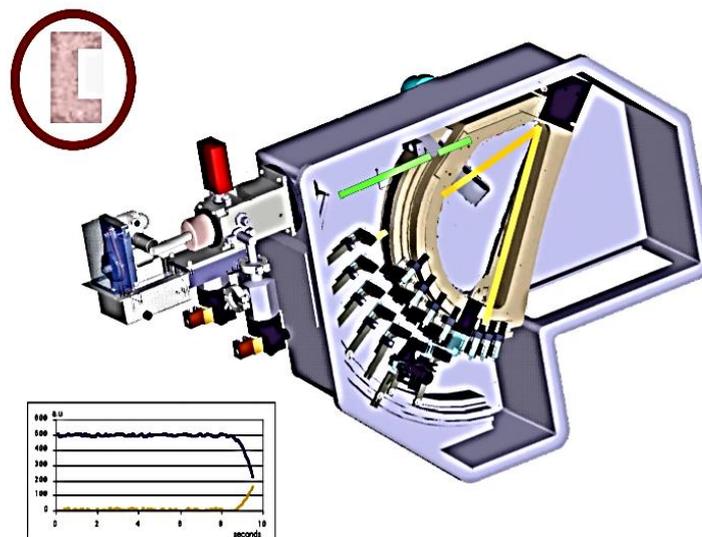


Ilustración 10. Vista de los detectores en posiciones determinadas. GD-OES

El ensayo GD-OES, nos informa:

- Qué elementos se encuentran en la muestra, pues en el momento que un detector recibe luz, sabemos que ese elemento está presente en la muestra.
- En qué proporción se encuentran. Se hace por medio de la calibración de cada línea de emisión, con unos patrones de composición conocida.
- A qué profundidad están: Por medio de la densidad, el equipo calcula el resultado en concentración, frente a profundidad. [28]

#### 4.3.2 ENSAYOS DE MICRODUREZA.

El estudio de la dureza de un material es muy utilizado en los campos de los controles de calidad y de seguridad de ciertos materiales que deben ser sometidos a una gran fuerza, ya sea constante e intermitente. Pero existe también un estudio más específico de dureza y es la micro dureza, el cual se realiza mediante un equipo que emite una fuerza menor y así evalúa huellas de penetración que son sólo visibles con microscopio.

El valor de la micro dureza se mide en mili newtons (mN) y se calcula a partir de la medición de las diagonales de la huella de penetración generada al aplicar fuerza sobre el material a estudiar y mediante cálculos trigonométricos a partir de la geometría de la punta piramidal de diamante.

Es así como los valores de dureza pueden obtenerse directamente mediante la medición de estas diagonales. Pero este cálculo es fidedigno únicamente si el ensayo se está realizando sobre una superficie no rugosa y deformable de manera plástica, lo que no sucede en la gran mayoría de los materiales a estudiar.

Se debe utilizar un micro durómetro, instrumento que permite evaluar la relación de elasticidad y plasticidad de los materiales a analizar y calcular también el módulo de penetración, la fluencia de penetración o convertir la dureza Martens HM a la escala Vickers (HV).

El micro durómetro también puede utilizarse en conjunto con otros equipos de precisión ópticos que facilitan la visualización de la huella de penetración, como un microscopio de fuerza atómica y una cámara digital, lo que será una ayuda para obtener resultados precisos, sobre todo en ensayos de muy baja carga que requieren de una imagen detallada para el cálculo exacto del valor de la micro dureza. [29]

La obtención de un valor de dureza no es una medición sino un ensayo ya que no obtenemos un valor absoluto sino una variable referida a: carga aplicada, geometría de la punta de diamante, tiempos de carga y descarga. Cuando se presenta un valor de micro dureza se deben exponer todas estas variables, de lo contrario es un valor sin sentido alguno. También en este punto cabe diferenciar, si estamos realizando un ensayo sobre un material compacto o bien sobre un material que está recubierto.

Conceptualmente el ensayo de dureza de un material y el ensayo de dureza de un recubrimiento son dos cosas diferentes. Todo recubrimiento se asienta sobre un substrato. Ambos materiales tendrán habitualmente durezas distintas. La norma UNE-EN ISO 14577 establece que para ensayar la dureza del recubrimiento, la profundidad de la penetración no debe superar el 10% del espesor del recubrimiento para evitar la influencia de la dureza del substrato.

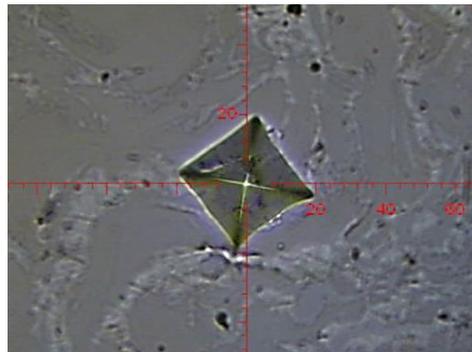


Ilustración 11. Imagen tomada a través de microscopio de una huella de penetración con punta Vickers.

Por consiguiente, para poder realizar ensayos de dureza de recubrimientos precisaremos de equipos que apliquen cargas muy bajas y con capacidad de evaluar huellas de penetración muy leves (sólo visibles con microscopio). En buena lógica no se puede emplear un 'durómetro' para ensayos de dureza de materiales blandos o bien para ensayos de dureza de recubrimientos ya que su excesiva carga traspasaría el material o el recubrimiento y no obtendríamos resultados válidos.

Es fácil diferenciar a ambos equipos, durómetro y micro durómetro, ya que el primero indica su rango de carga de trabajo en gramos (g) y el segundo el milinewtons (mN). La norma diferencia los equipos en macro-intervalo (carga de 2 N a 30 kN), micro-intervalo (carga de 0,2  $\mu$ N a 2 N) y nano-intervalo (carga inferior a 0,2  $\mu$ N)

En función de la tecnología que implemente el equipo de ensayo los valores se obtienen directamente o bien a partir de la medición de estas diagonales y el cálculo posterior.

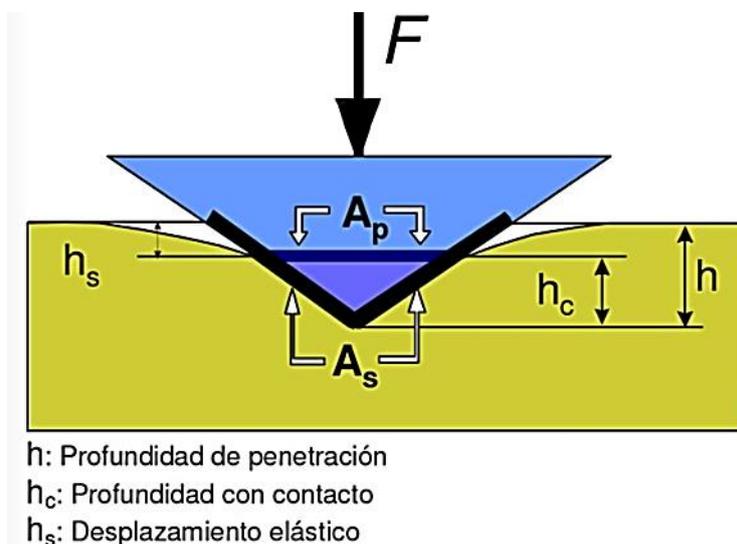


Ilustración 12. Parámetros de dureza

La superficie para ensayar puede ser rugosa y en estos casos será mejor pulirla previamente. Muchos de nuestros materiales no se comportarán de manera plástica al 100%. De hecho, el ensayo de micro dureza instrumentado nos permite evaluar la relación de elasticidad y plasticidad de los materiales a ensayar

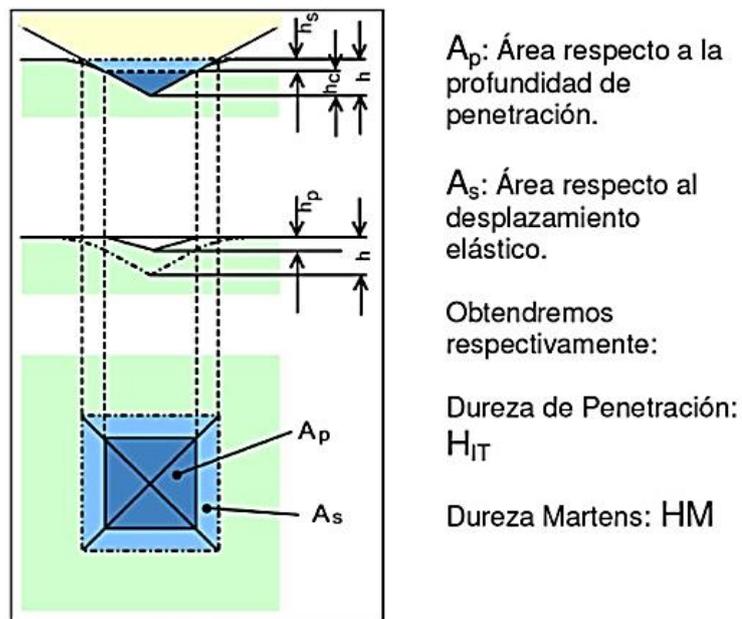


Ilustración 13. Esquema de comportamiento elástico-plástico de material en un ensayo

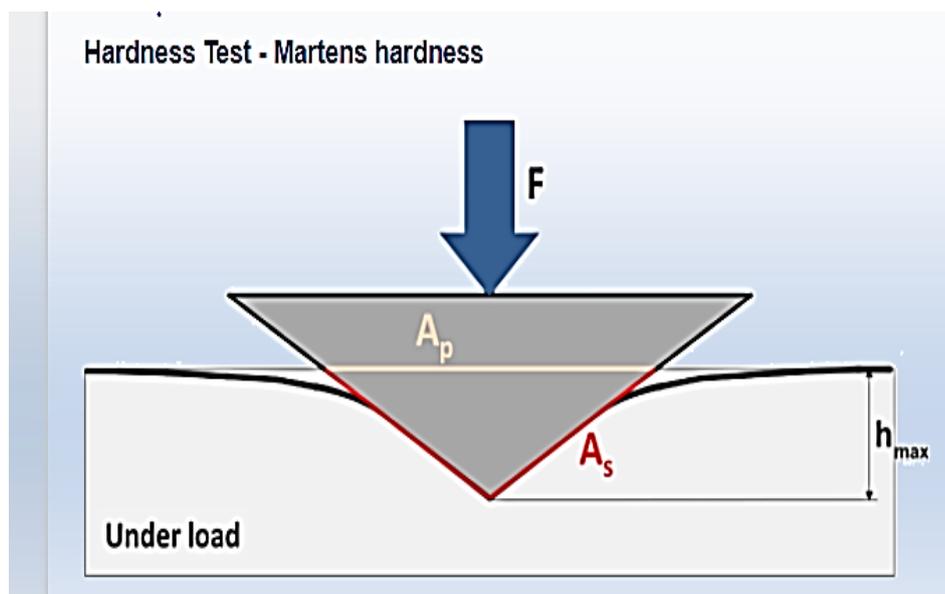


Ilustración 14. Dureza universal.  $HU = F / \text{área indenteador}$

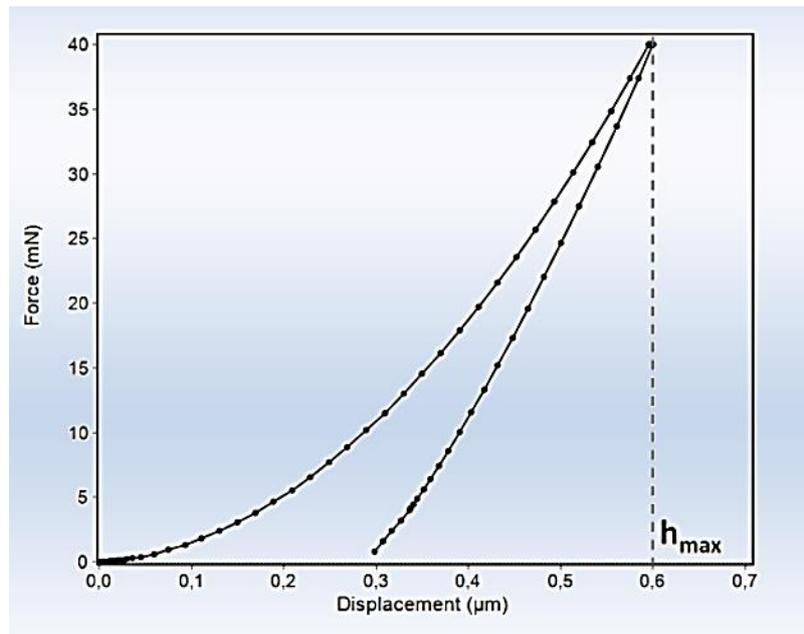


Gráfico 3. Curva de carga y descarga . Dureza universal.

#### Formulas

$HM = F / A_s(h)$  ... Martens hardness

$F_{max}$  ... Maximum applied test force

$h$  ... Indentation depth

$A_s(h)$  ... Surface area of the indenter for maximum indentation depth

$A_s = 26.43 \cdot h^2$  ... for an ideal Vickers indenter (without tip rounding)

$A_s = 26.98 \cdot h^2$  ... for an ideal modified Berkovich indenter (without tip rounding)

Differential Martens hardness

$$HM_{diff} = \frac{1}{\left(\frac{\partial h}{\partial \sqrt{F}}\right)^2 \frac{A_s}{h^2}}$$

Designation of Martens hardness HM

Ilustración 15. Fórmulas empleadas en la dureza universal

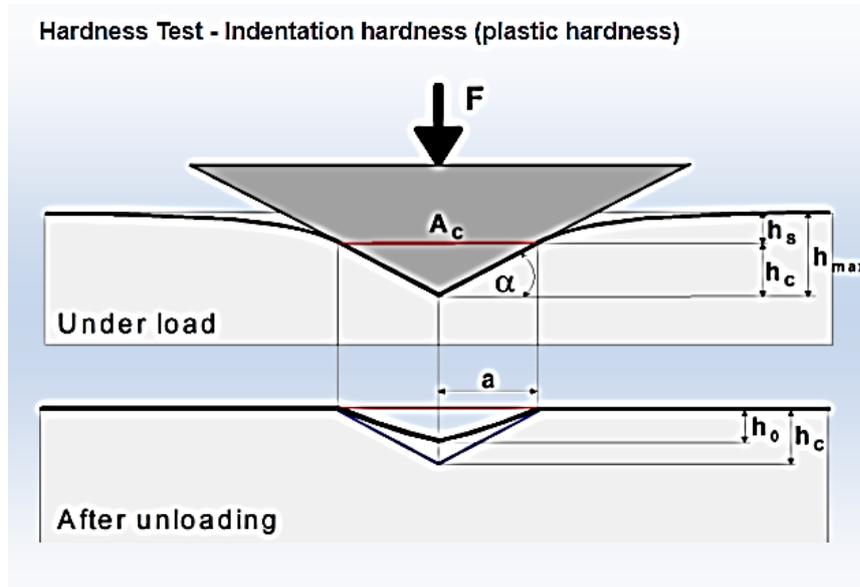


Ilustración 16. Dureza plástica.  $HU = F / \text{área proyectada indentador}$ . [30]

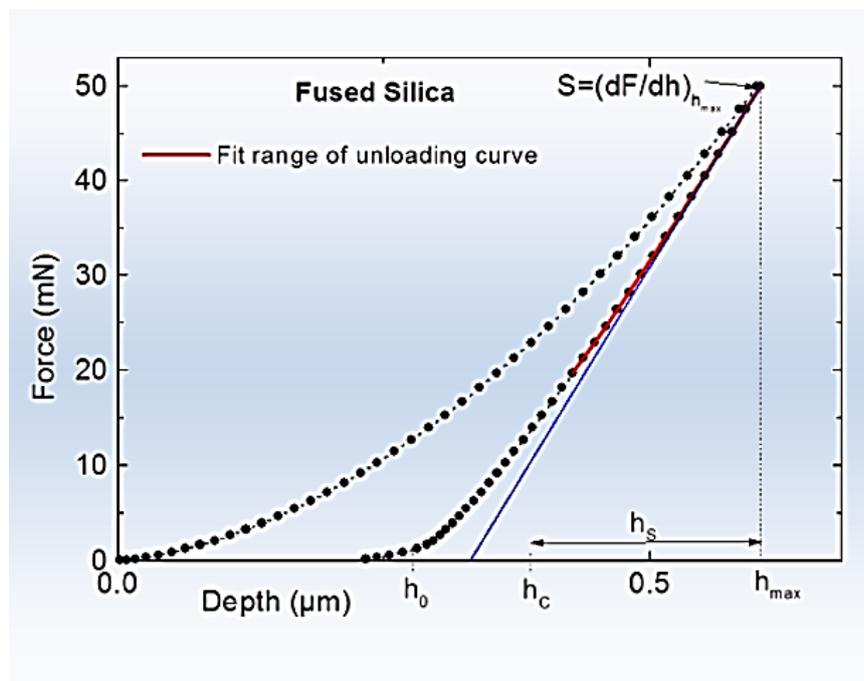


Gráfico 4. Curva de carga y descarga. Dureza plástica

### Formulas

$H_{IT} = F_{max} / A_p(h_c)$  ... Indentation hardness

$F_{max}$  ... Maximum applied test force

$A_p(h_c)$  ... Projected contact area between indenter and sample

$A_p = 24.5 \cdot h_c^2$  ... for an ideal Vickers indenter

$h_c$  ... Contact depth under test force, calculated according  $h_c = h_{max} - \epsilon \cdot F_{max}/S$

$S$  ... Contact stiffness

$\epsilon = m \cdot h_s / (h_{max} - h_r)$

$h_r$  - Intersection point of the tangent to the unloading curve with the indentation depth axis

$E_r = 0.5 \cdot \sqrt{\pi} \cdot S / \sqrt{A_p}$  ... reduced modulus

Ilustración 17. Fórmulas empleadas en la dureza plástica [31]

A partir de estos parámetros de ensayos básicos se pueden calcular otros parámetros que caracterizan las propiedades mecánicas del recubrimiento como el módulo de penetración  $E_{IT}$ , la fluencia de penetración  $C_{IT}$  o convertir la dureza Martens HM a la más popular escala Vickers (HV).

El esquema básico de un instrumento de ensayo de micro dureza consistirá en una punta guiada de penetración, un sistema de aplicación de carga regulado y controlado y un sistema de medición del desplazamiento realizado al aplicar la carga.

Las resoluciones y exactitudes vinculadas a estos dispositivos son las que proporcionarán valores de ensayo de mayor o menor precisión y parámetros calculados de mayor o menor validez.

El instrumento de ensayo de micro dureza se puede acompañar de dispositivos ópticos para visualizar la huella (microscopio, cámara digital, microscopio de fuerza atómica AFM) para ensayos de muy baja carga en que a partir de la imagen detallada del ensayo se pueda evaluar el material de manera más exhaustiva.

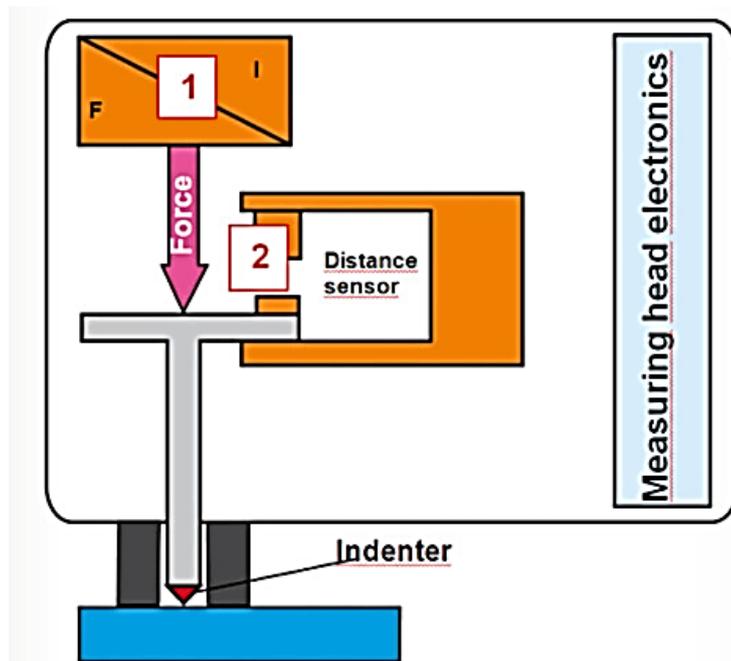


Ilustración 18. Esquema de instrumento de un ensayo de micro dureza. [32]

#### 4.3.3 SCRATCH TEST (ADHERENCIA)

El scratch test registra la fuerza de fricción y la emisión acústica producida al deslizarse el indentador con una carga creciente. Estos datos se combinan con las imágenes ópticas, pudiéndose así determinar a partir de que carga se ha producido la delaminación u otras alteraciones del recubrimiento.

La interpretación de las huellas de scratch test no es sencilla, ya que no siempre hay una delaminación limpia. De hecho, hay una gran dependencia de la ductilidad o fragilidad del recubrimiento, por lo que las posibles huellas pueden ser muy variadas. Los datos principales, a la hora de interpretar un ensayo de rayado son los modos de delaminación y las cargas críticas LC1, LC2 y LC3.

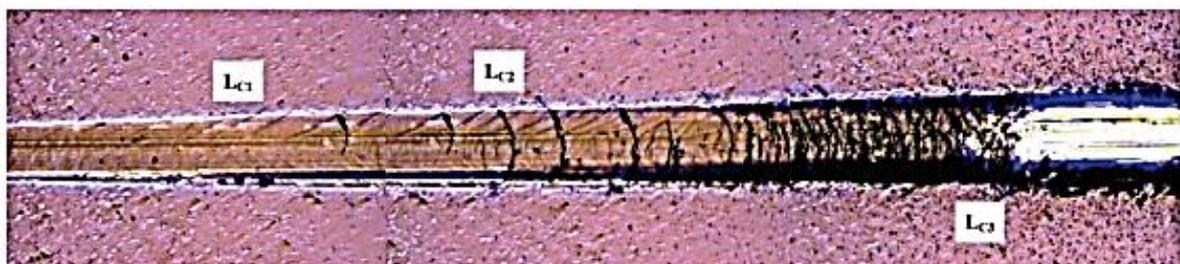


Ilustración 19. Representación de LC1, LC2 y LC3

- Lc1: Carga crítica para la aparición de un daño cohesivo
- Lc2: Carga crítica para la aparición del substrato
- Lc3: Carga crítica para la delaminación del recubrimiento mayor al 50 %.

A partir del análisis de las marcas dejadas por el indentador y de la fuerza aplicada es posible conocer la calidad de la adherencia del recubrimiento con el substrato entre otras cosas. En la imagen podemos observar gráficamente en que se basa el ensayo.

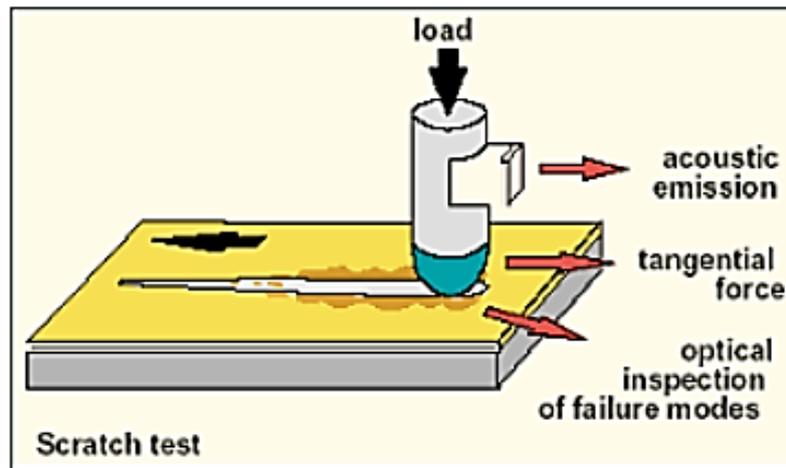


Ilustración 20. Funcionamiento ensayo Scratch test.

Un indentador de diamante se desliza con una carga creciente, midiéndose distintos parámetros. El scratch test registra la fuerza de fricción y la emisión acústica producida al deslizarse el indentador con una carga creciente. Estos datos se combinan con las imágenes ópticas, pudiéndose así determinar a partir de que carga se ha producido la delaminación u otras alteraciones del recubrimiento.

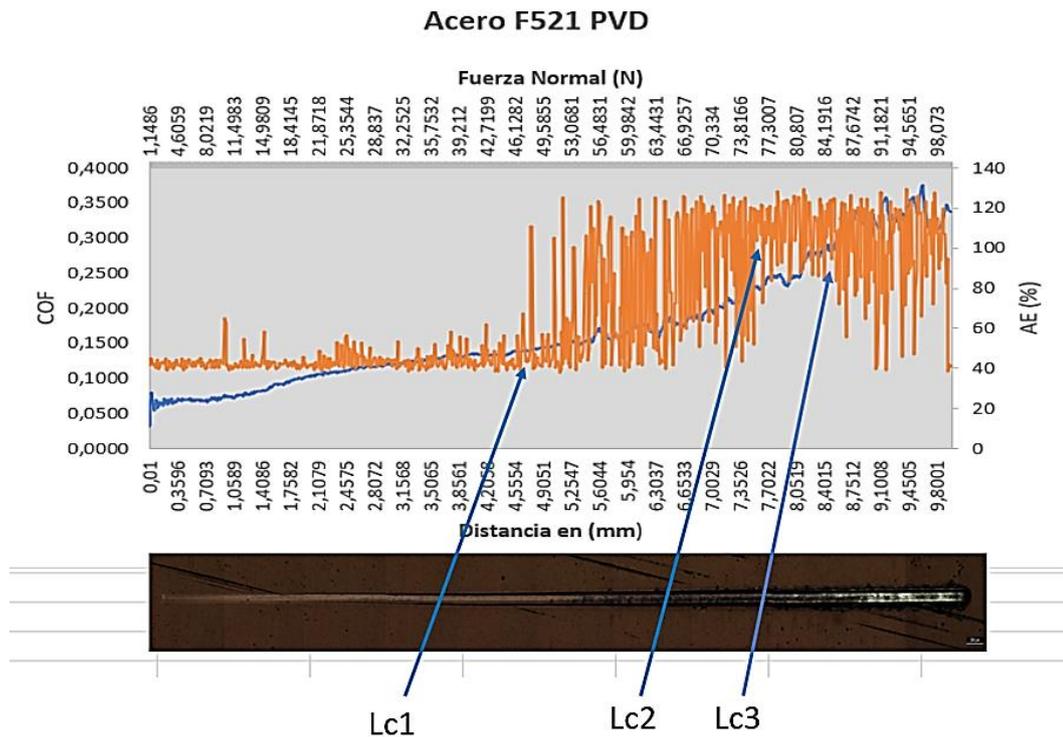


Gráfico 5. Ejemplo de los resultados de un ensayo Scratch test

En el gráfico 5. Se observa en el eje “Y” el coeficiente de fricción y en la “X” superior, la fuerza normal aplicada por el indentador a medida que va avanzando en el ensayo. Como se puede ver la carga aplicada no es constante, sino progresiva. La velocidad sí se mantiene constante. También se puede observar la huella que va dejando el indentador a medida que va avanzando y de cómo finalmente el substrato sale a la luz.

Los parámetros usualmente utilizados en este tipo de ensayo son:

- Carga inicial: 0 N
- Carga final: 100 N
- Velocidad de carga: 100N/min
- Velocidad del ensayo: 100 mm/min
- Longitud total del ensayo: 5 mm
- Tipo de Indentador: Rockwell



*Ilustración 21. Equipo para realizar prueba scratch test*

#### 4.3.4 TRIBOLOGÍA

Una particularidad de todos los procesos en movimiento es la presencia de una resistencia a éste, o sea, de una fuerza opuesta a ese movimiento, que es debida a la acción de la fricción. La Fricción surge como resultado de la interacción física y química entre cuerpos que se rozan o que están en contacto y movimiento relativo de uno con respecto al otro. El proceso de movimiento sufre la influencia perturbadora de la fricción y por ello, una parte de la energía invertida en el movimiento se gasta en vencerla, de aquí que el estudio y acciones con respecto a este problema, tenga una gran importancia en el ahorro energético. Por otro lado, si al menos uno de los elementos del sistema en movimiento es un cuerpo sólido, entonces el fenómeno de la fricción va acompañado del desgaste, esto es, la pérdida gradual de sustancia de la superficie de trabajo de un cuerpo, como resultado del rozamiento del otro. Si los dos elementos del sistema lo son cuerpos sólidos, el proceso de interacción de las superficies se hace aún más complejo y en general el desgaste debe incrementarse. Los efectos de la fricción y el desgaste son prácticamente inevitables y son procesos antagónicos al de la conservación y al menos debe trabajarse en su disminución. La maquinaria moderna se proyecta para trabajar a velocidades y tensiones cada vez mayores, lo cual obliga a una cuidadosa consideración de los fenómenos que se presentan en las superficies con movimiento relativo.

Los daños ocasionados en las maquinarias a consecuencia del desgaste, provoca averías en pleno proceso, desajustes en el funcionamiento, ruido, vibraciones, y requiere la acción de mantenimiento para la sustitución de las piezas dañadas. Por eso es tan importante el estudio

de la resistencia al desgaste, al estar vinculado directamente con la durabilidad del equipo funcionando correctamente.

A nivel de ensayo y experimental, existen diferentes equipos para cuantificar el comportamiento tribológico (fricción-desgaste) entre dos materiales.

Una de las formas más estandarizadas para la medición y evaluación del desgaste entre dos materiales, se establece a través de la norma ASTM G99:90, basado en un ensayo con el equipo pin on disc.

### ENSAYO PIN ON DISC

Para evaluar la tasa de desgaste de las muestras, se realizó el ensayo en un equipo de laboratorio conocido como pin on disc. Este equipo cuenta con un disco que gira, sobre el cual se coloca y se adhiere la muestra a ensayar. Posee un brazo y en su extremo cuenta con una esfera de alúmina que hace contacto con la superficie de la muestra al rotar.



*Ilustración 22. Bola de alúmina sobre la probeta*

Al rotar la probeta, la esfera de alúmina va describiendo un surco circunferencial, que posteriormente se mide su ancho y se calcula el volumen perdido.

$$V_{\text{perdido}} (\text{m}^3) = \frac{\pi(\text{radio circun.})x(\text{ancho surco})^3}{6x(\text{radio de la esfera del pin})}$$

*Ecuación 2. Cálculo del volumen perdido en ensayo Pin on disc*

Con el volumen perdido, se calcula el coeficiente de desgaste.

$$k = \frac{V \text{ perdido}}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot N \cdot P}$$

*Ecuación 3. Cálculo del coeficiente de desgaste.*

Donde:

K: coeficiente de desgaste

R: radio de la prueba

N: Número de ciclos

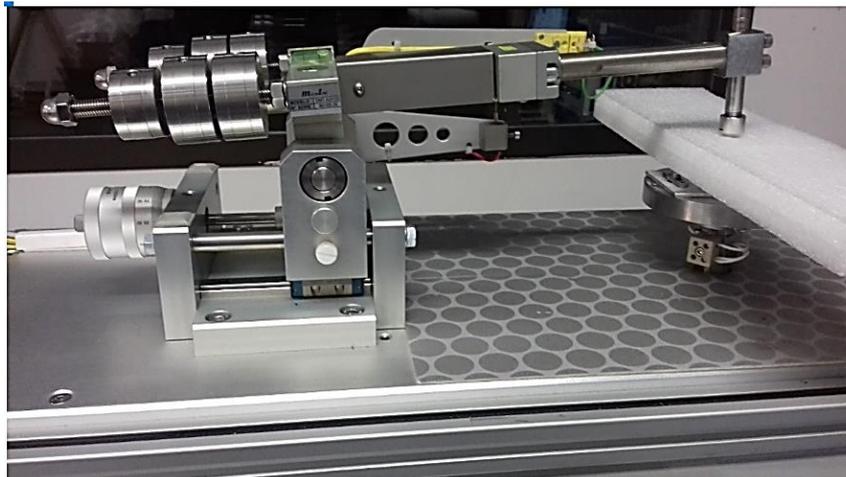
P: Carga aplicada

Para las probetas utilizadas en el ensayo, utilizamos bola de alúmina de diámetro 6 mm, que presenta una alta dureza y resistencia al desgaste, con capacidad de actuar como contraparte estática en contacto con las muestras.

### DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO PIN-ON-DISC

El ensayo a escala de laboratorio cuenta con un procedimiento en la Norma ASTM 99-90.

Como se explicó anteriormente, se pega la probeta sobre el disco rotatorio del equipo, y se pone a rotar a una velocidad controlada. Luego entra en contacto la bola de alúmina con la superficie plana superior de la probeta, a una distancia radial determinada. Al cabo de determinadas vueltas se observa que comienza a formarse una huella circunferencial que tendrá una profundidad y un ancho en dependencia de las características del material y las condiciones propias del ensayo.



*Ilustración 23. Equipo Pin- on- disc. Laboratorio UPNA*

El brazo del equipo tiene la posibilidad de incrementar la carga sobre la probeta, por medio de pesas calibradas, que irán aumentando la presión en la zona de contacto a medida que se incrementa el peso.

En resumen, las variables conocidas en este ensayo serán:

- la velocidad de rotación del disco. Se programan directamente las rpm desde el ordenador.
- la magnitud de la carga. Se selecciona y luego se colocan las pesas calibradas en el brazo.
- el número de ciclos que tendrá el ensayo. Se programa desde el ordenador
- el radio de contacto. Se posiciona el punto de contacto de la bola, por medio de un nonio con escala milimétrica sobre la superficie plana de la probeta.

Parámetro para medir: Ancho del surco o de la huella: se hace por microscopía confocal o microscopía electrónica.

Parámetro para calcular: Volumen perdido: Con el ancho de la huella y por una expresión matemática se calcula el volumen perdido.

Parámetro para determinar. Coeficiente de desgaste K. Con el volumen perdido, utilizando otra expresión matemática se logra calcular dicho coeficiente.

A medida que aumenta el número de ciclos, se va incrementando la profundidad del surco, que facilita la medición el mismo, aunque cuando las probetas presentan alta dureza superficial, aparecen vibraciones que provocan luego desviaciones significativas en la medición, pues el borde del surco, no queda bien definido.

#### **Pasos realizados en el ensayo:**

- Las probetas y la bola, se limpian frotando etanol con un paño y luego se colocan en un baño de ultrasonido.
- La bola se monta en el porta-bolas de forma tal que no rote durante el ensayo.
- Se fija la probeta al disco mediante un adhesivo que permita una unión segura durante todo el ensayo. En este caso utilizamos como adhesivo loctite.
- Las muestras por medir se deben colocar de manera tal que el giro sea concéntrico en el eje del porta-muestras y deben tener la altura adecuada para mantener el balancín del porta-bolas en posición horizontal.
- Posteriormente se seleccionan las revoluciones a que va a rotar, se verifica el cero del transductor de fuerza y se comprueba que el brazo que sostiene el contrapeso esté en equilibrio mecánico.

- Seguidamente entra al programa FRICCIO3.B, se introducen los parámetros de pruebas, se ubica la bola sobre la muestra y se carga con el peso adecuado. La bola debe apoyarse con suavidad para no producir una herida inicial en el recubrimiento, y desde el ordenador se ordena el inicio de la prueba.

Al terminar la prueba, se despega la probeta del disco y se procede a medir el ancho de los surcos por microscopía electrónica y con microscopía confocal, para posteriormente calcular el volumen perdido.

Los parámetros que se tuvieron en cuenta en los ensayos.

Parámetro	Valor
Material de la bola	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Diámetro de la bola	6 mm
Velocidad	150 rpm, 200 rpm
Carga	5 N, 10 N, 20 N, 40 N
Número de ciclos	6000, 20000
Temperatura	20 ± 2 °C

*Tabla 8. Parámetros del ensayo Pin-on-disc*

Para la determinación del volumen perdido, hay varios métodos que se emplean, entre ellos podemos citar pesar la muestra antes y después del ensayo en una micro balanza analítica, por ejemplo (Metler Toledo UMX5 comparador) Con esta diferencia se calcularía la masa perdida y luego se puede calcular el volumen.

En nuestro caso se realizó la medición del volumen perdido en laboratorio de metrología Sensofar S.L. por medio de técnica por microscopía confocal utilizando el software sensoview donde se mide el ancho de surco en 3 secciones y calcula la pérdida de volumen. Luego se promedia el resultado. Posteriormente se realizó la medición del ancho del surco por microscopía electrónica, con el objetivo de calcularlo según el procedimiento de la norma y poder comprobar los resultados.

## 5. RESULTADOS.

### 5.1 GD-OES

En este apartado veremos la composición de los recubrimientos que se analizan.

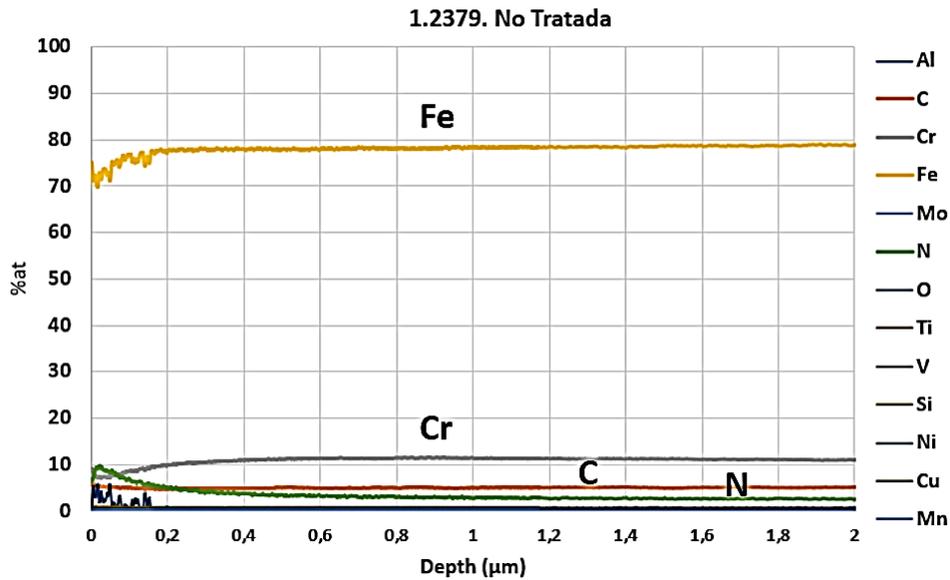


Gráfico 6. GD-OES % at vs profundidad. Acero 1.2379 no tratado.

En este caso, al no tener recubrimiento, lo que se observa es la composición química del acero en el substrato, hasta una profundidad de 2 micrómetros

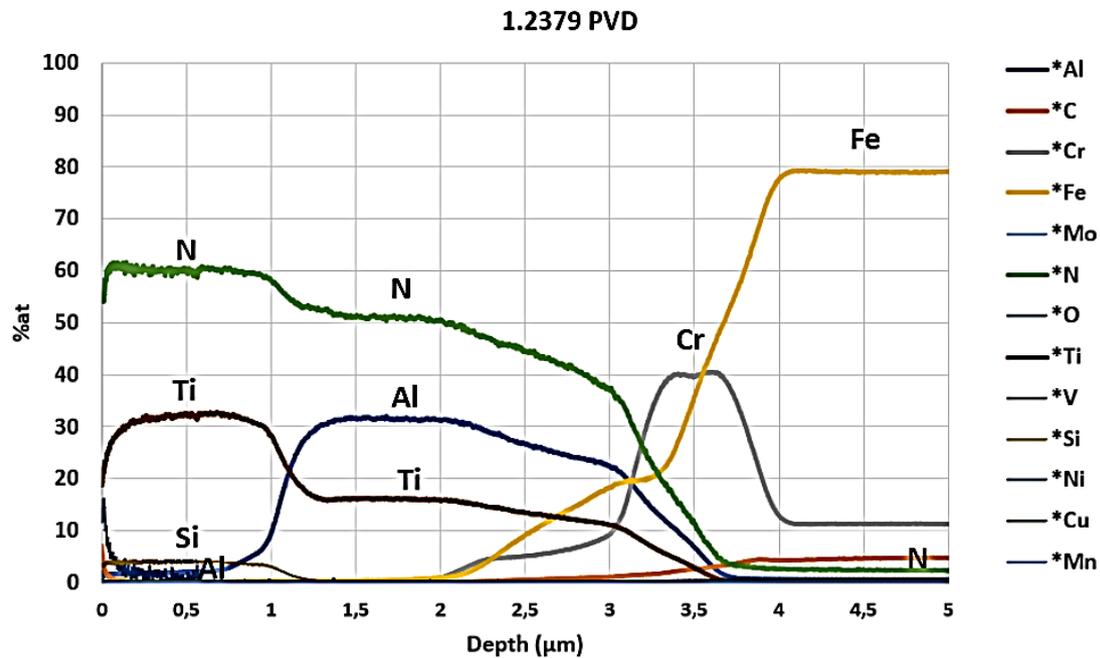


Gráfico 7. GD-OES % at vs profundidad. Acero 1.2379 con recubrimiento PVD.

Se analiza la probeta de acero 1.2379 con recubrimiento PVD y se observa un pico a 3.5 µm con un máximo de 40% de cromo, que es la capa de anclaje para lograr una buena adherencia, le siguen tres fases, la primera de AlTiN. Una segunda fase, que corresponde a AlTiSiN, y una tercera fase de SiTiAlN. Estas multicapas, son las que conforman el recubrimiento con un espesor final de alrededor de 3.5 µm. En el sustrato, el porcentaje atómico de nitrógeno es 2,3% por lo que disminuyen los nitruros considerablemente.

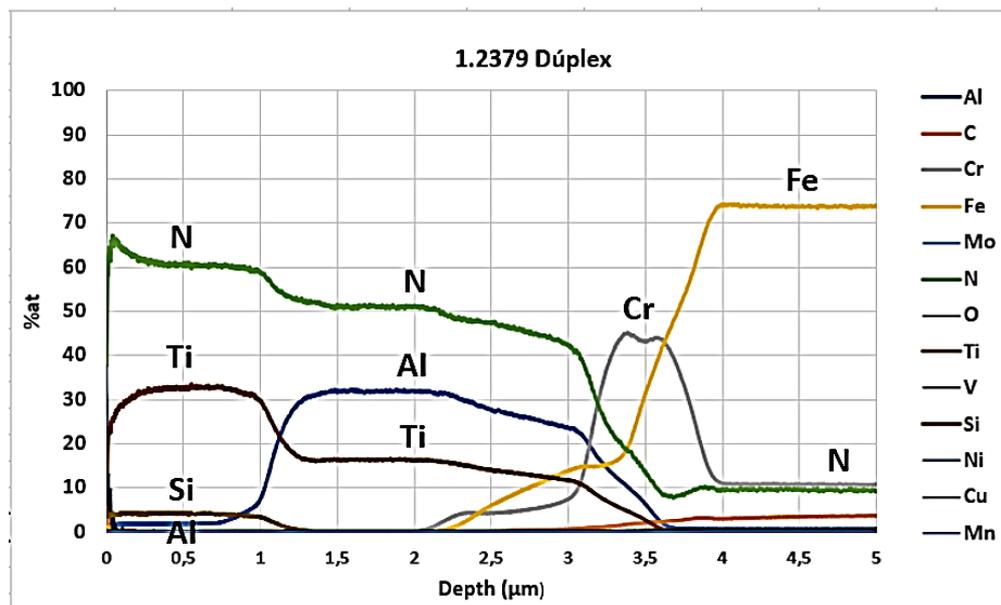


Gráfico 8. GD-OES % at vs profundidad. Acero 1.2379 con recubrimiento Dúplex.

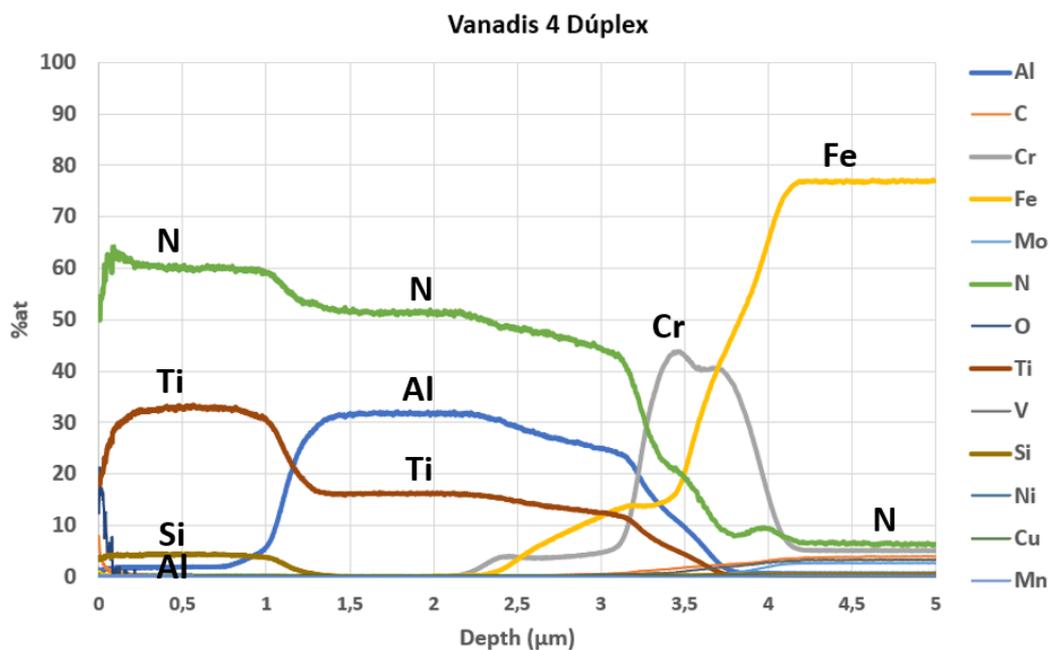


Gráfico 9. GD-OES % at vs profundidad. Acero Vanadis 4 con recubrimiento Dúplex

Si hacemos una comparativa del porcentaje atómico del nitrógeno en profundidad, en el recubrimiento Dúplex, como fue iniciado por un tratamiento de nitruración, el substrato presenta una capa formada por nitruros, por lo que su porcentaje atómico es mayor.

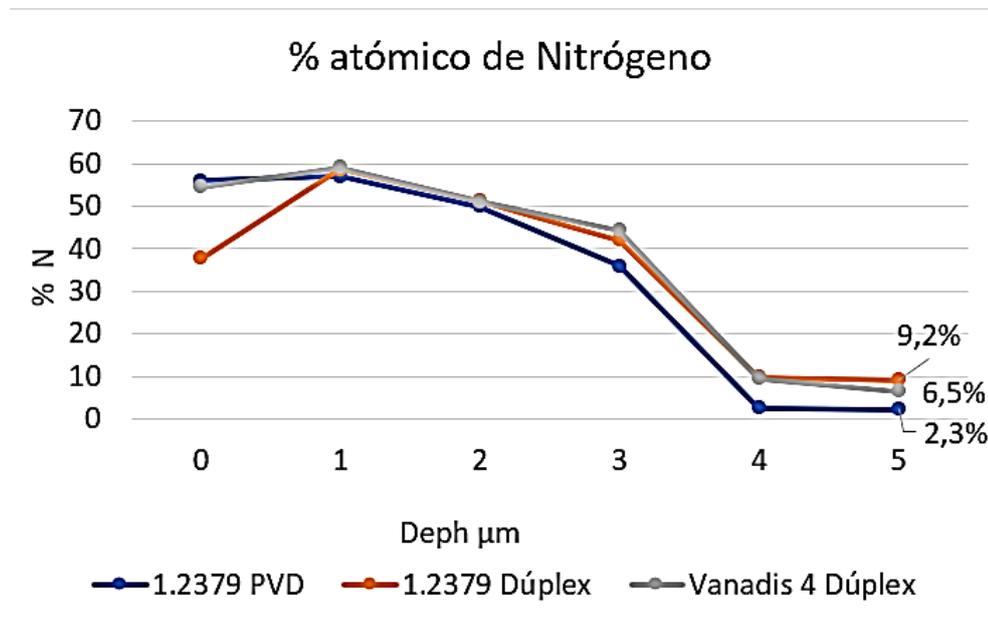


Gráfico 10. Comparativa del % atómico de Nitrógeno

Esta gráfica es la esencia de este estudio, pues los resultados obtenidos en los ensayos son consecuencia de la diferencia que hay en cuanto a composición química en el sustrato, causado por el nitrógeno difundido en el proceso de nitruración.

## 5.2 MICRODUREZA

El ensayo de micro dureza se desarrolló en laboratorios AIN, con un ultra micro durómetro / FISHERSCOPE H100 VP/X-Y

Este equipo entra dentro de la categoría de técnicas de indentación instrumentada, en la que una pirámide en diamante, de geometría conocida y controlada, se presiona contra la superficie de la muestra a analizar. Al mismo tiempo se monitoriza la posición del indentador y la carga aplicada para dibujar una curva que refleja la respuesta del material a la solicitud. Parámetros tales como dureza, elasticidad, fluencia, trabajo elástico o trabajo plástico de las zonas más superficiales de los materiales, pueden ser evaluados con este aparato.



Ilustración 24. Equipo ultra micro durómetro. FISHERSCOPE H100 VP/X-Y. Lab. AIN

Este dispositivo monta un indentador de geometría Vickers, y aplica cargas que van desde los 200  $\mu\text{N}$  hasta los 2 N. Con las cargas más altas y dada la geometría del indentador, la penetración para metales o cerámicas no va más allá que unas pocas micras.

De este modo, si lo que se estudia son las propiedades mecánicas de capas o la influencia de tratamientos superficiales en el comportamiento mecánico de las mismas, es importante conocer el espesor o el alcance de los tratamientos, ya que, si aplicamos cargas en la parte alta del rango, podemos estar penetrando mucho más profundo que la profundidad de la zona relevante y midiendo propiedades en donde la influencia del substrato es significativa.

ULTRA MICRODUREZA 500 mN				
Probetas	1.2379 No Tratada	1.2379 PVD	1.2379 Dúplex	Vanadis 4 Dúplex
HU (Gpa)	$6.4 \pm 0.3$	$9.3 \pm 0.4$	$9.7 \pm 0.4$	$10.3 \pm 0.3$
Er (GPa)	$230 \pm 3$	$300 \pm 3$	$310 \pm 3$	$328 \pm 4$
% We	31 %	37 %	39 %	40 %
Dureza plástica	$9.8 \pm 0.05$	$16.3 \pm 0.1$	$17.4 \pm 0.1$	$18.8 \pm 0.2$
Dureza máxima	$6.4 \pm 0.3$	$11.1 \pm 0.4$	$11.2 \pm 0.5$	$11.6 \pm 0.7$

Tabla 9. Resultados ultra microdureza a 500 mN

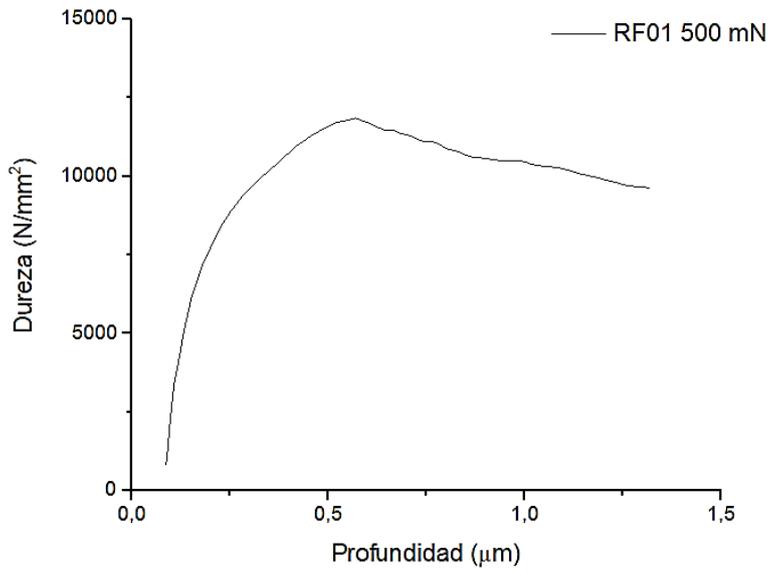


Gráfico 11. Curva de dureza. Acero 1.2379 PVD. 500 mN

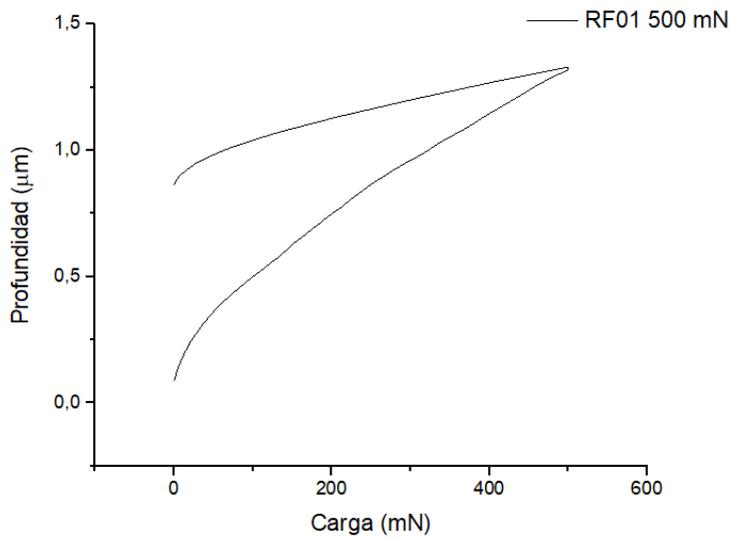


Gráfico 12. Curva de carga y descarga. Acero 1.2379 PVD. 500 mN

ULTRA MICRODUREZA 1000 mN				
Probetas	1.2379 No Tratada	1.2379 PVD	1.2379 Dúplex	Vanadis 4 Dúplex
HU (GPa)	6.5 ± 0.7	8.5 ± 0.4	8.9 ± 0.7	9.7 ± 0.2
Er (GPa)	248 ± 1	299 ± 1	308 ± 1	329 ± 1
% We	31 %	34 %	35 %	37 %
Dureza plástica	9.9 ± 0.06	13.9 ± 0.04	14.8 ± 0.06	16.7 ± 0.07
Dureza máxima	6.8 ± 0.5	11.2 ± 0.4	11.2 ± 0.6	11.8 ± 0.6

Table 10. Ultra microdureza a 1000 mN

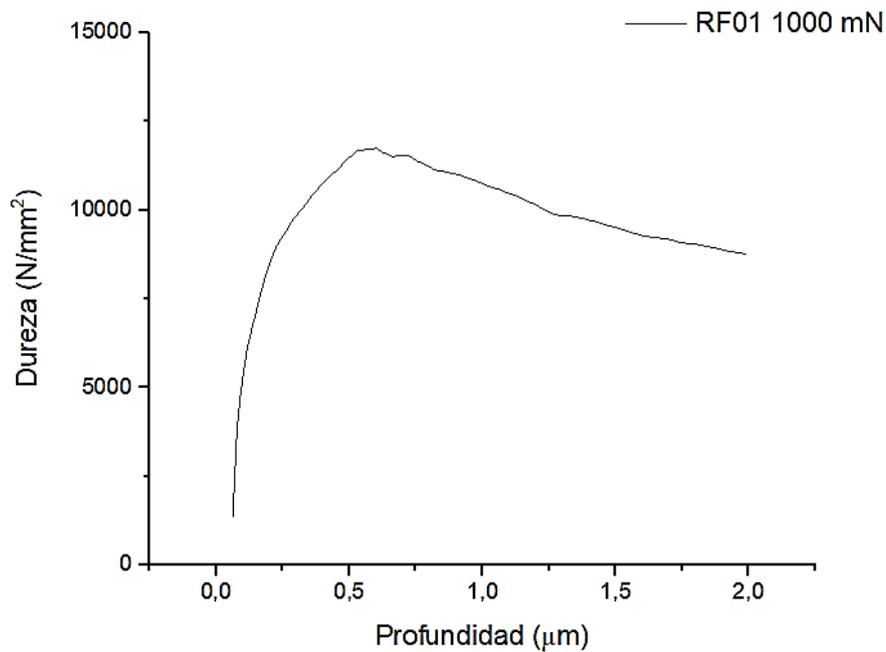


Gráfico 13. Curva de dureza. Acero 1.2379 PVD. 1000 mN

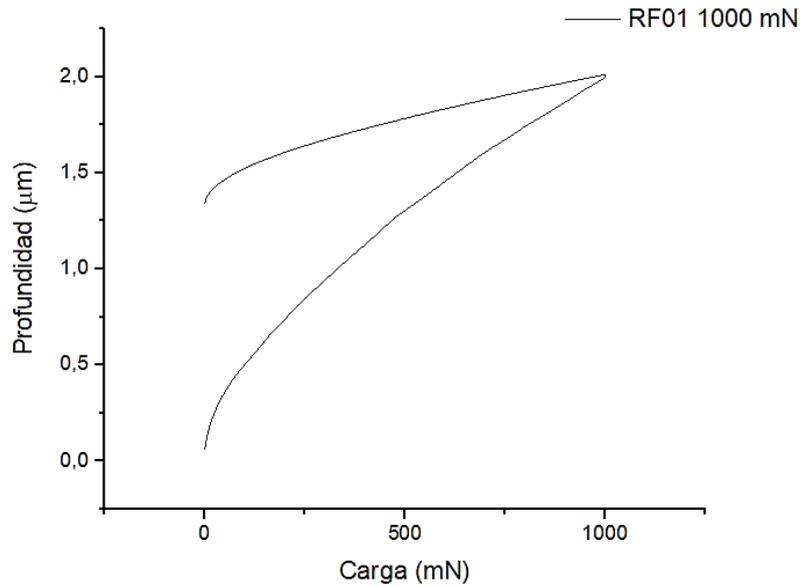


Gráfico 14. Curva de carga y descarga. Acero 1.2379 PVD. 1000 mN

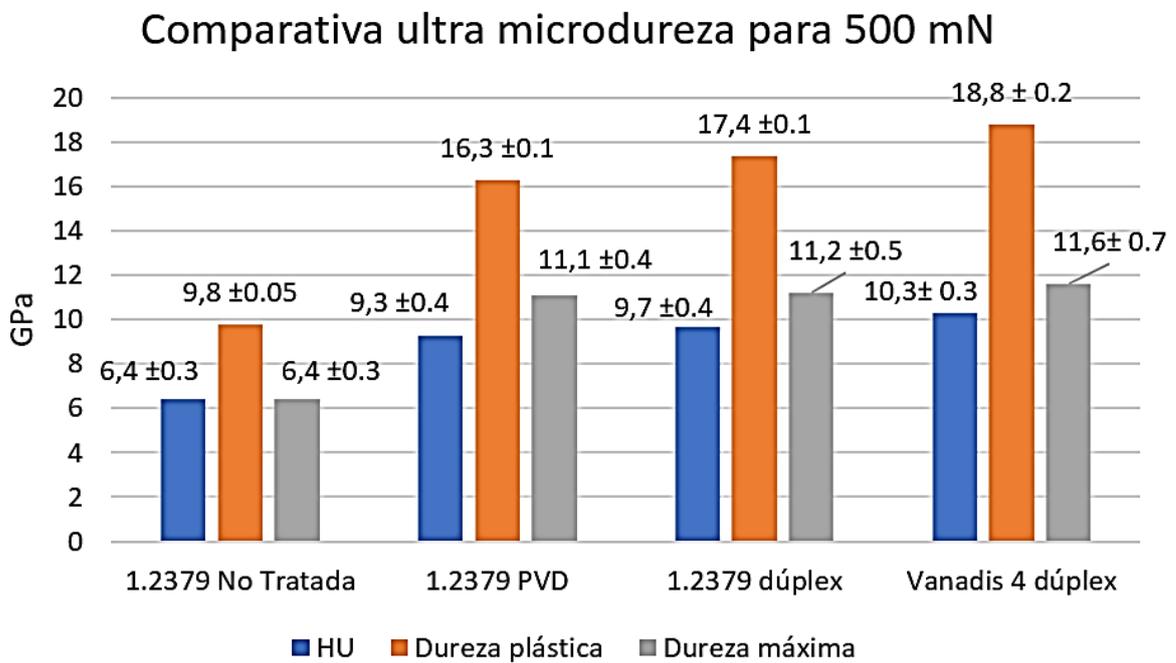


Gráfico 15. Comparativa de ultra microdureza para 500 mN .

### Comparativa de ultra microdureza para 1000 mN

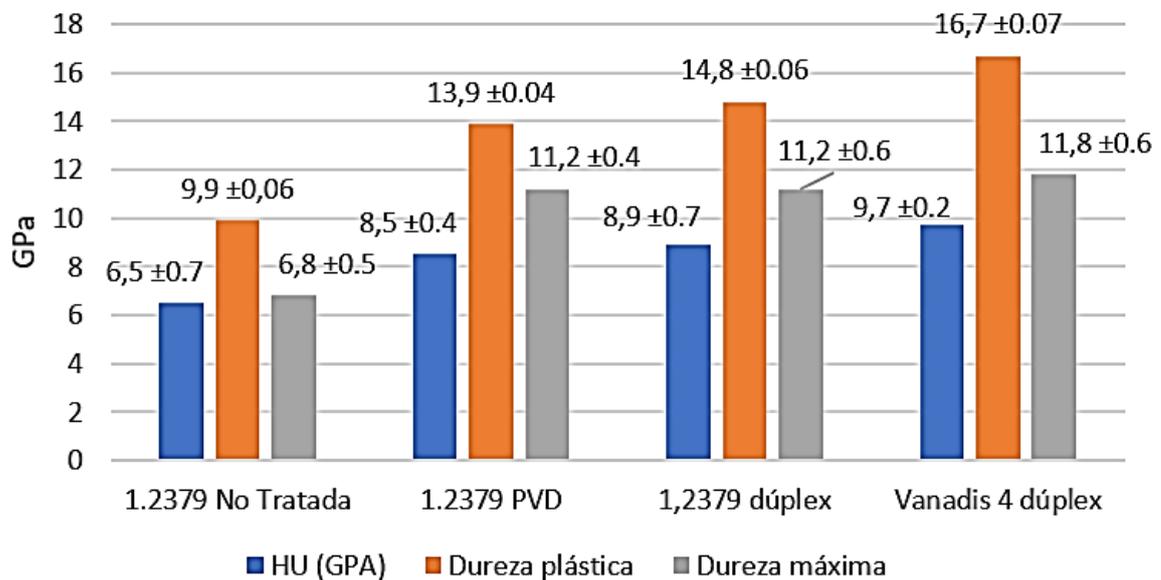


Gráfico 16. Comparativa de ultra microdureza para 1000 mN

De las gráficas obtenidas, se concluye que el recubrimiento Dúplex tiene una mayor dureza universal y dureza plástica que el recubrimiento PVD. En cuanto a la dureza máxima no hay variaciones en cuanto a la probeta de acero 1.2379 con PVD y Dúplex; pero comparando las dos probetas con tratamiento Dúplex, la de Vanadis 4 tiene mayor dureza que la de 1.2379. Las cargas aplicadas, en este caso sobrepasa el 10% del espesor de la capa dura, y en las muestras con tratamiento Dúplex, se registran valores de dureza del substrato nitrurado.

### 5.3 SCRATCH TEST.

Los resultados obtenidos en este ensayo fueron significativos en el caso de los recubrimientos Dúplex, comparados con el recubrimiento PVD.

La adherencia del recubrimiento PVD a una superficie nitrurada previamente con estas características, logran una combinación muy fiable a la resistencia a los efectos de cargas externas, sin que ocurra defecto por delaminación, ni deformaciones plásticas en el sustrato, por lo explicado en el apartado anterior

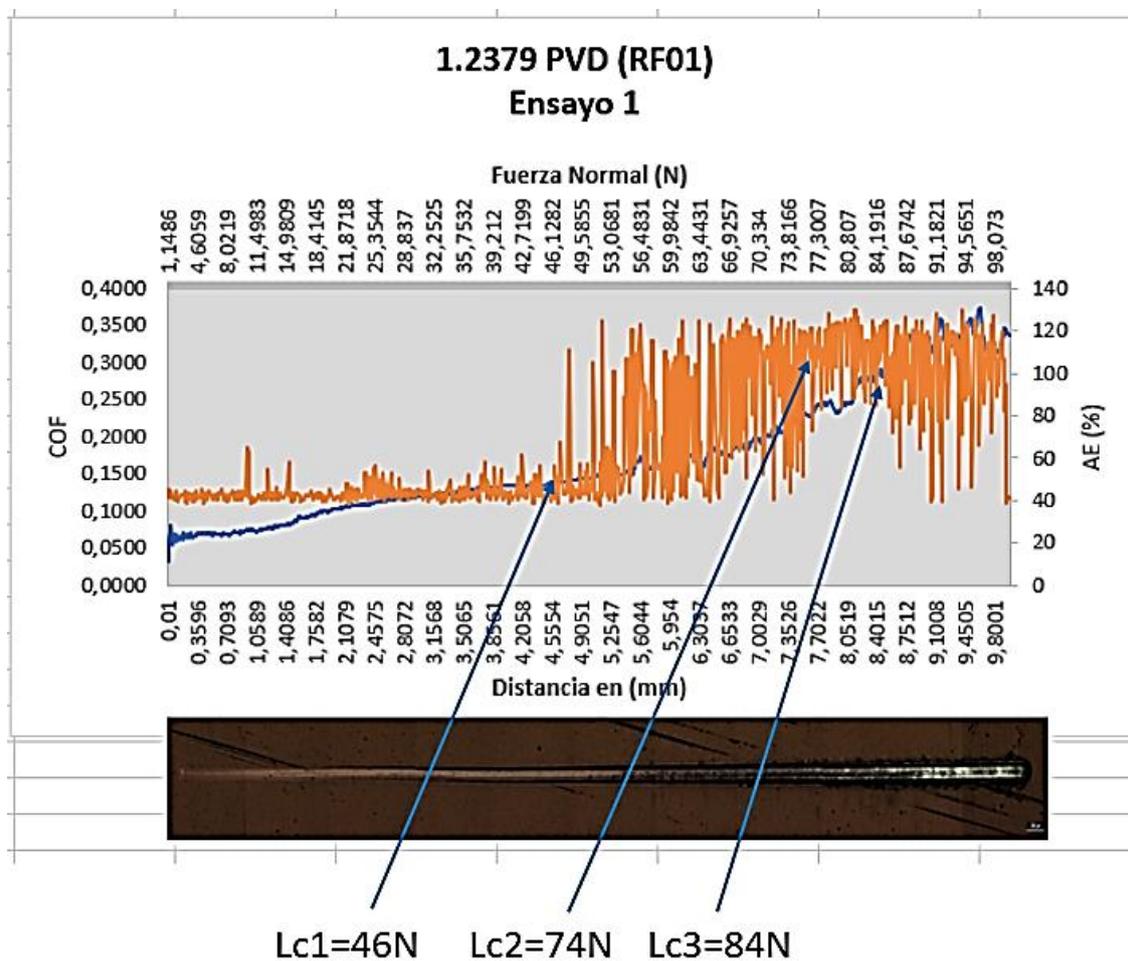


Gráfico 17. Scratch test de 1.2379 PVD. Ensayo 1 y su respectiva huella.

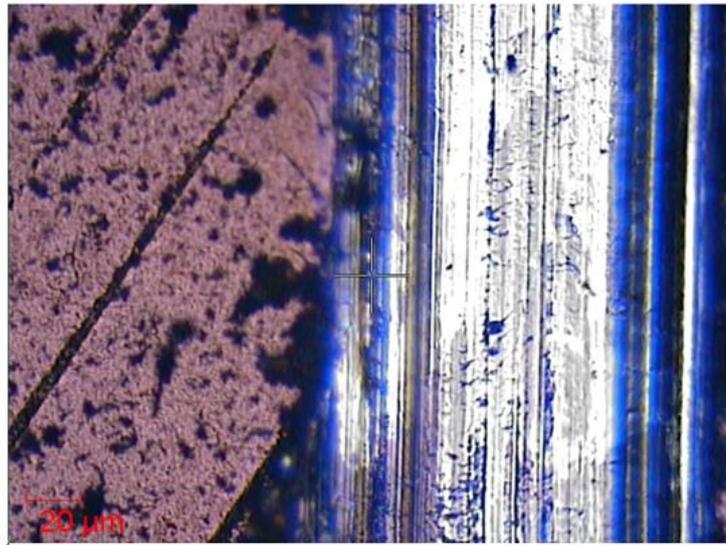


Ilustración 25. Huella del ensayo. Acero 1.2379 PVD

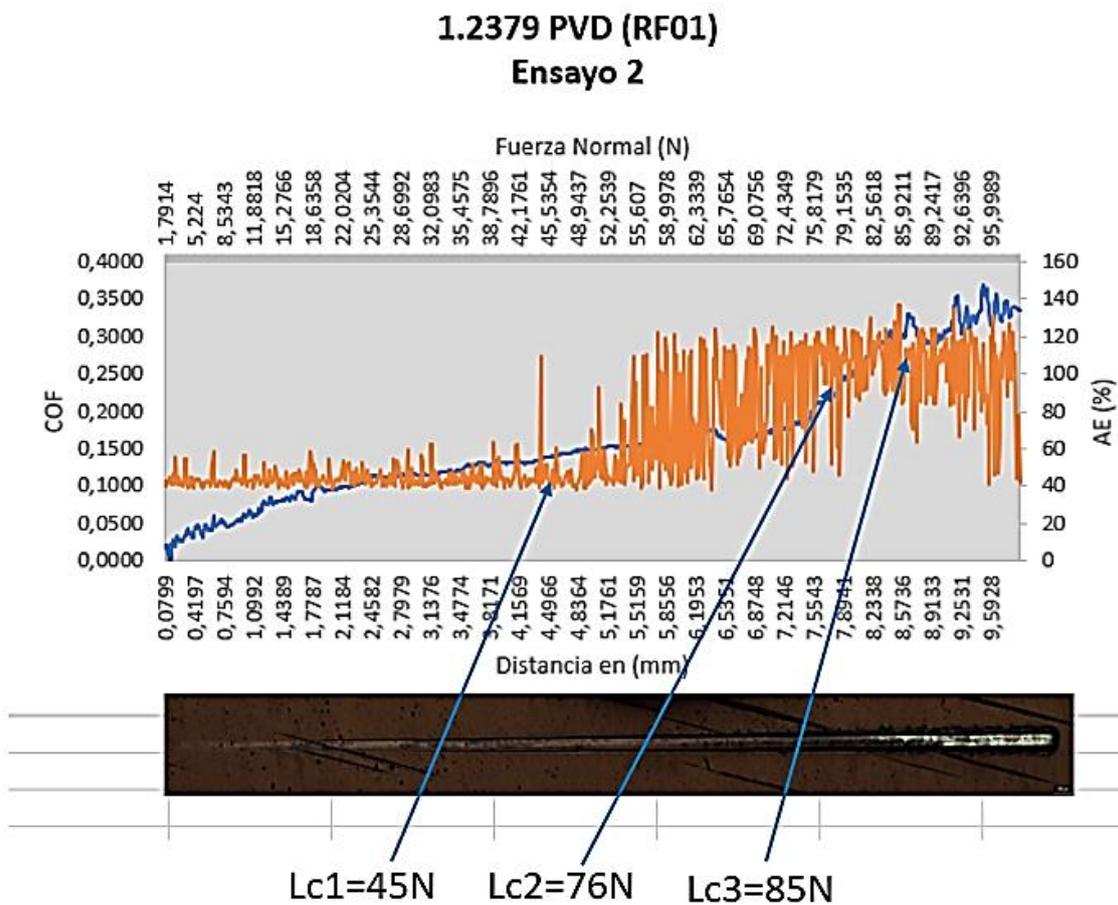


Gráfico 18. Scratch test de 1.2379 PVD. Ensayo 2 y su respectiva huella.

	LC1(N)	LC2)	LC3(N)
Scratch 1	46,12	73,81	84,19
Scracht 2	45,53	75,81	85,24
Promedio	45,83	74,81	84,72
D. Estandar	0,42	1,41	0,74

Tabla 11. Resultados de Scratch test del 1.2379 PVD. (RF01)

### 1.2379 PVD (RF02) Ensayo 1

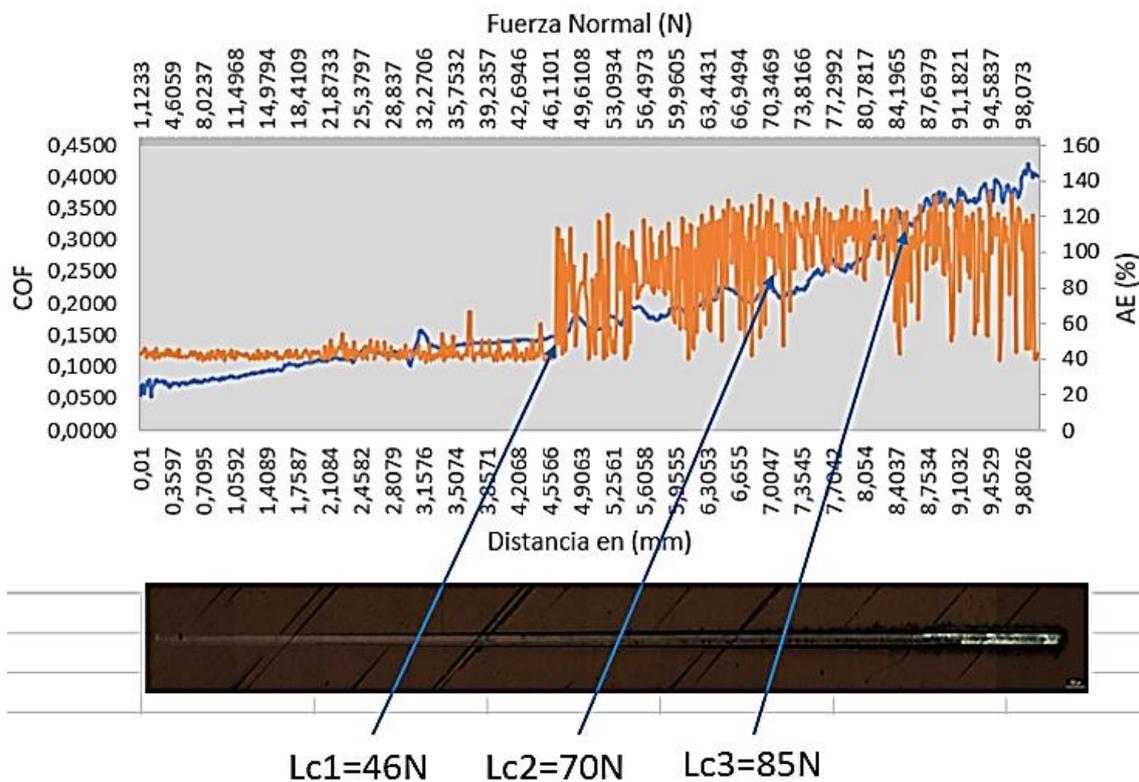


Gráfico 19. Scratch test de 1.2379 PVD (RF02), Ensayo 1 y su respectiva huella.

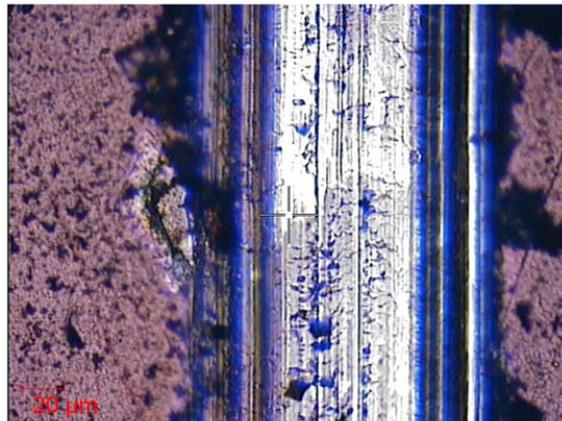


Ilustración 26. Huella del ensayo. Acero 1.2379 PVD. (RF02)

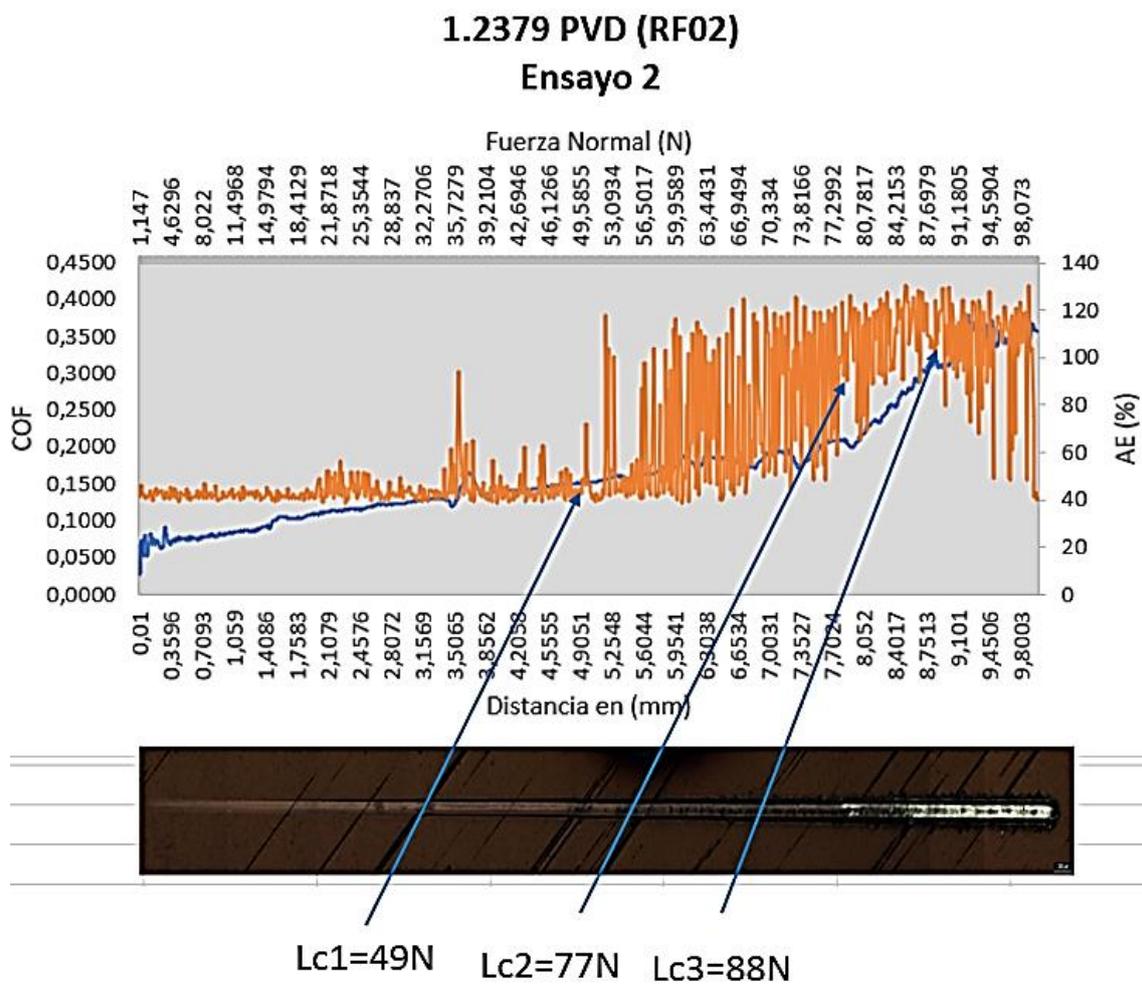


Gráfico 20. Scratch test de 1.2379. (RF02). Ensayo 2 y su respectiva huella.

ESTUDIO PARA LA MEJORA DE LA ADHERENCIA Y PROPIEDADES TRIBOLÓGICAS DE RECUBRIMIENTOS TiAIN-TiAISIN

	LC1(N)	LC(2)	LC3(N)
Scratch 1	46,11	70,34	84,19
Scratch 2	49,58	77,29	87,69
Promedio	47,85	73,82	85,94
D. Estandar	2,45	4,91	2,47

Tabla 12. Resultados de Scratch test del 1.2379 PVD. (RF02)

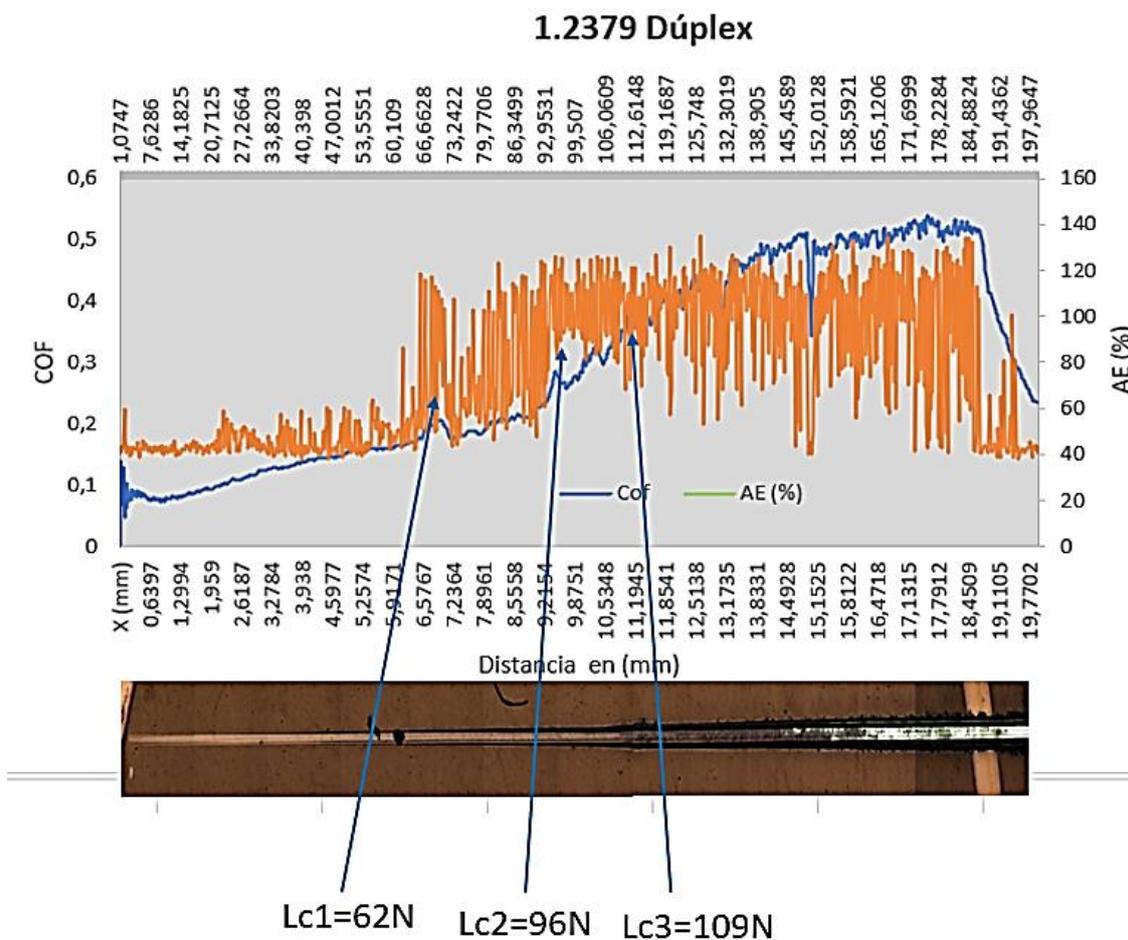


Gráfico 21. Scratch test de 1.2379 Dúplex . Ensayo y su respectiva huella.

	LC1(N)	LC(2)	LC3(N)
Scratch 1	61,89	95,71	109,26

Tabla 13. Resultados de Scratch test del 1.2379 Dúplex.

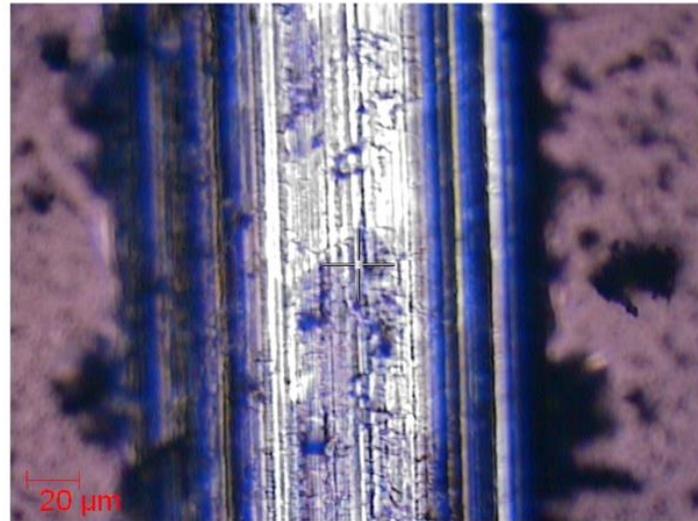


Ilustración 27. Huella del ensayo. Acero 1.2379 Dúplex.

### Acero Vanadis 4 Dúplex

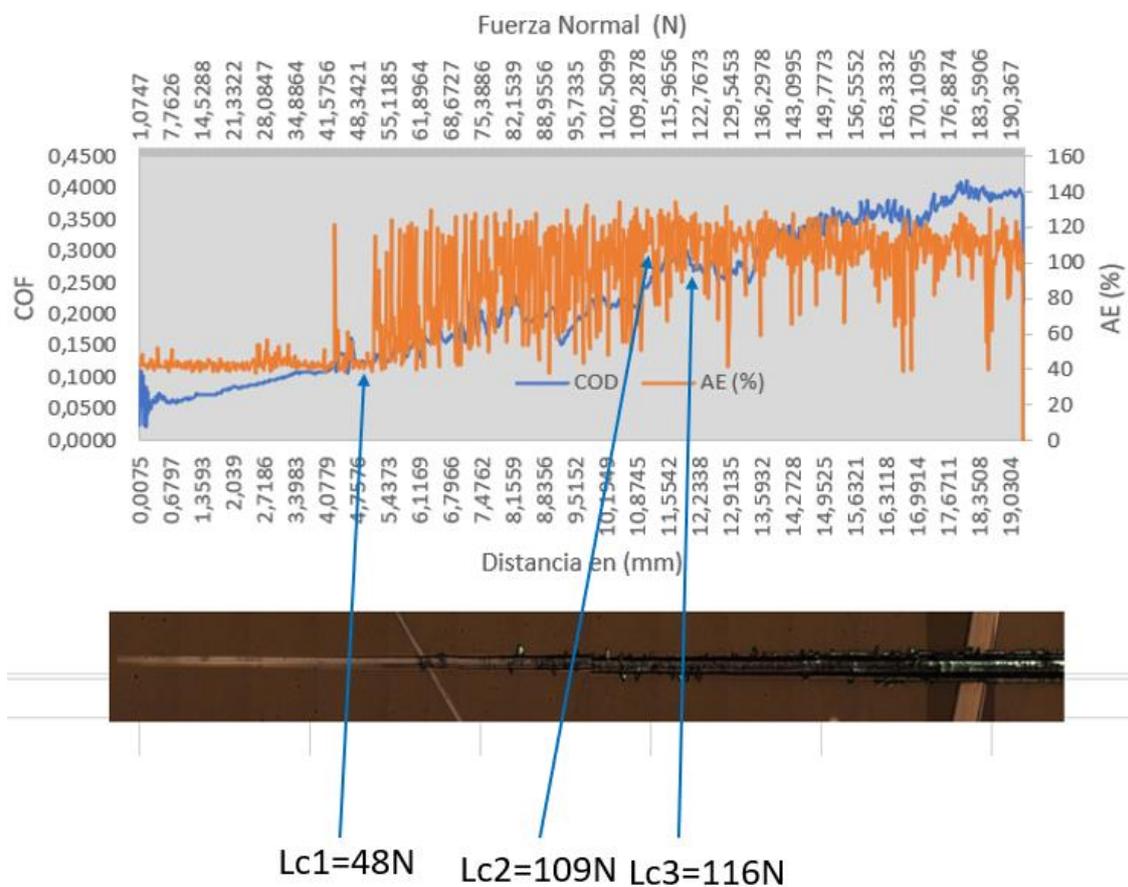


Gráfico 22. Scratch test de Vanadis 4, Ensayo y su respectiva huella.

	LC1(N)	LC(2)	LC3(N)
Scratch 1	48,34	109,28	115,96

Tabla 14. Resultados de Scratch test del Vanadis 4 Dúplex.

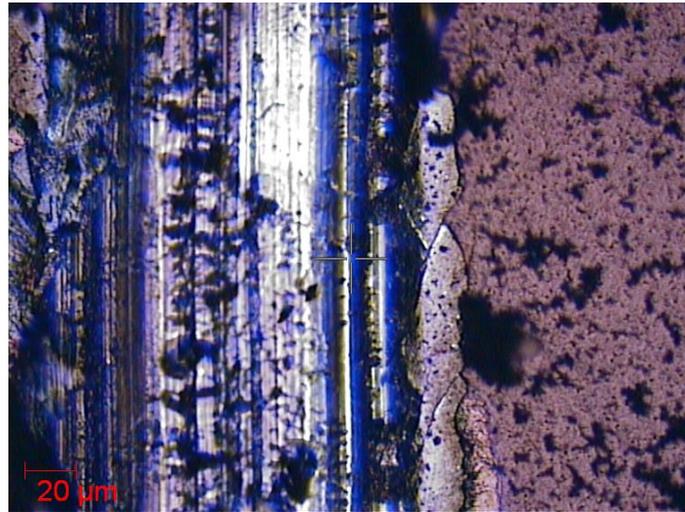


Ilustración 28. Huella del ensayo. Acero Vanadis 4.

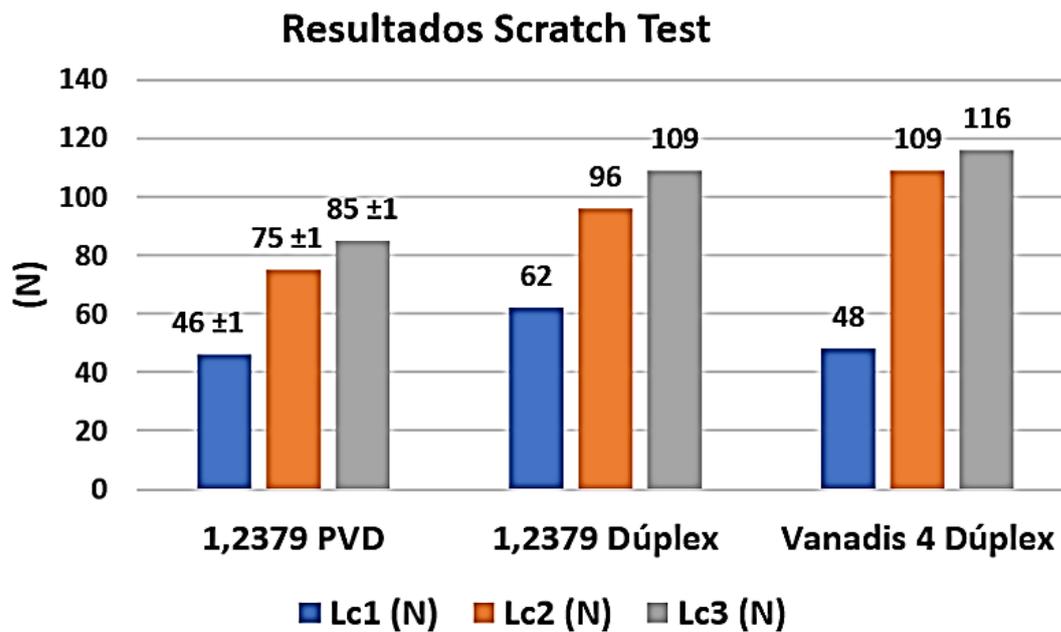


Gráfico 23. Comparativa de los resultados de los ensayos scratch test.

Los resultados de adherencia del tratamiento Dúplex, superan los resultados obtenidos en tratamiento PVD. Si se toman como referencia de comparación los valores de Lc2, En el acero 1.2379 PVD Lc2= 75 N, mientras que en el mismo acero pero con tratamiento Dúplex Lc2= 96 N, lo que representa un 21.8 % de incremento. Luego si se comparan las dos probetas de acero con tratamiento Dúplex, el acero Vanadis4 tiene un valor de Lc2= 109 N, mientras que el Dúplex

Este resultado obtenido en el estudio de adherencia, es el logro más importante de este trabajo, a partir de los ensayos realizados. Con el tratamiento Dúplex, través de los ensayos, poder identificar la optimización que logra este recubrimiento, cuando se realiza por un tratamiento Dúplex.

Esta mejora lograda en el tratamiento Dúplex, se recomienda para el uso industrial en útiles, piezas y herramientas, que se encuentran en condiciones severas de trabajo, bajo grandes cargas y presiones externas, como es el caso de útiles de conformar, moldes de inyección, matrices y otras piezas como los aros o anilla del pistón en los automóviles, entre otras.

#### 5.4 TRIBOLOGÍA

Después de realizado todos los ensayos de fricción en el equipo Pin on disc, se obtienen sus gráficos. Se ilustra una muestra de gráficos de cada probeta ensayada. El resto de los gráficos, en los anexos

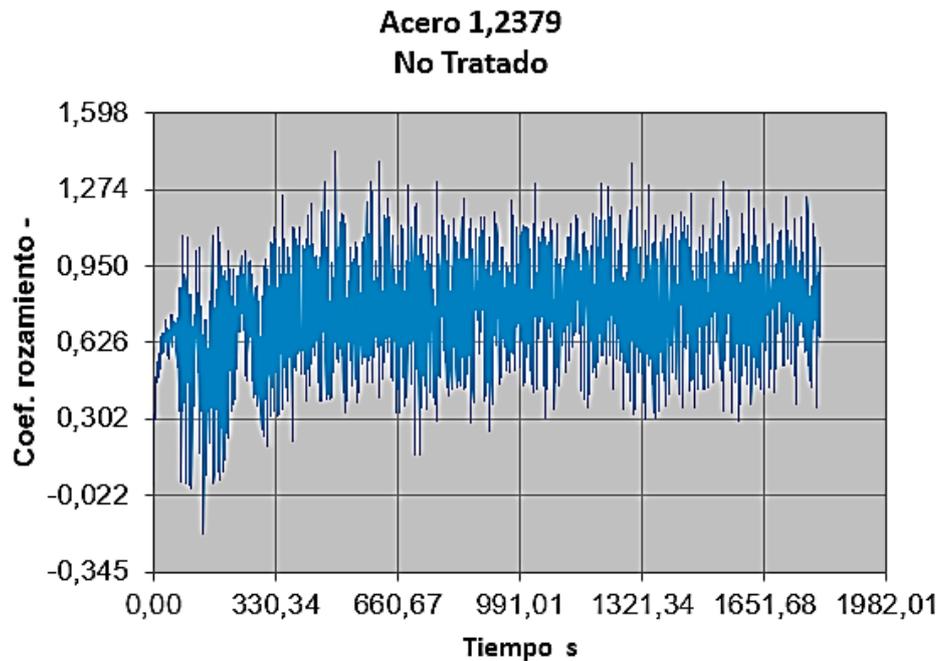


Gráfico 24 Acero 1.2379 no tratado. Radio 6 mm.

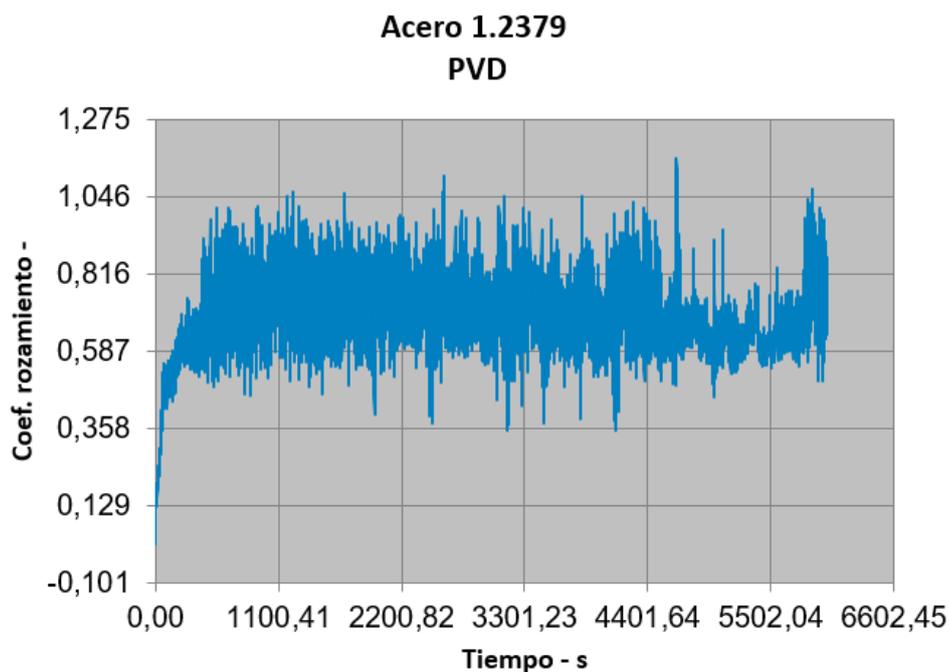


Gráfico 25. Acero 1.2379 con recubrimiento PVD. (RF01), Radio 10 mm.

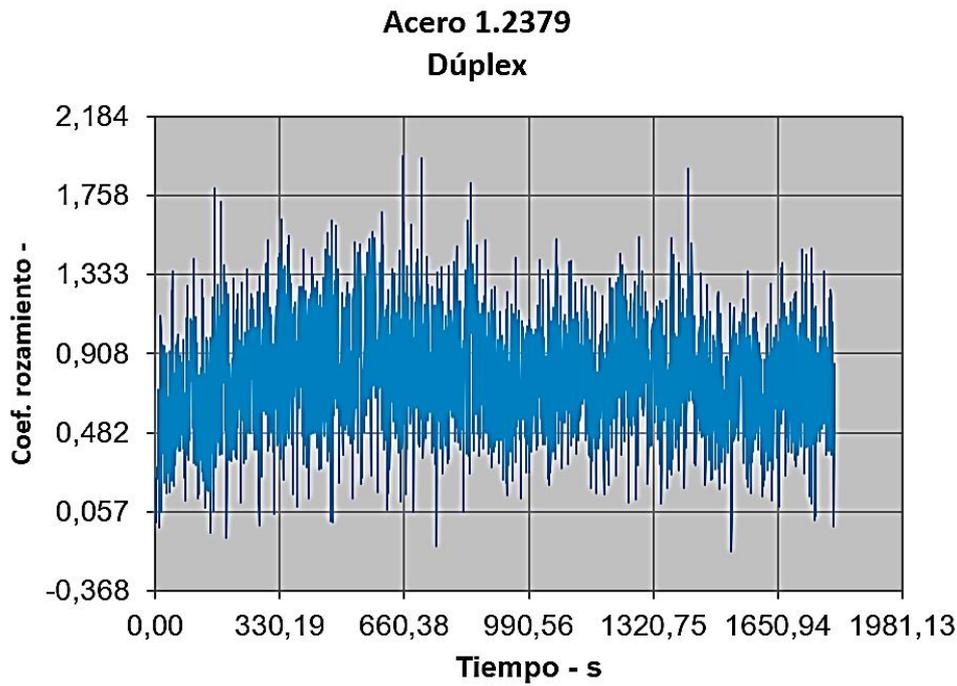


Gráfico 26. Acero 1.2379 con tratamiento Dúplex, Radio 10 mm

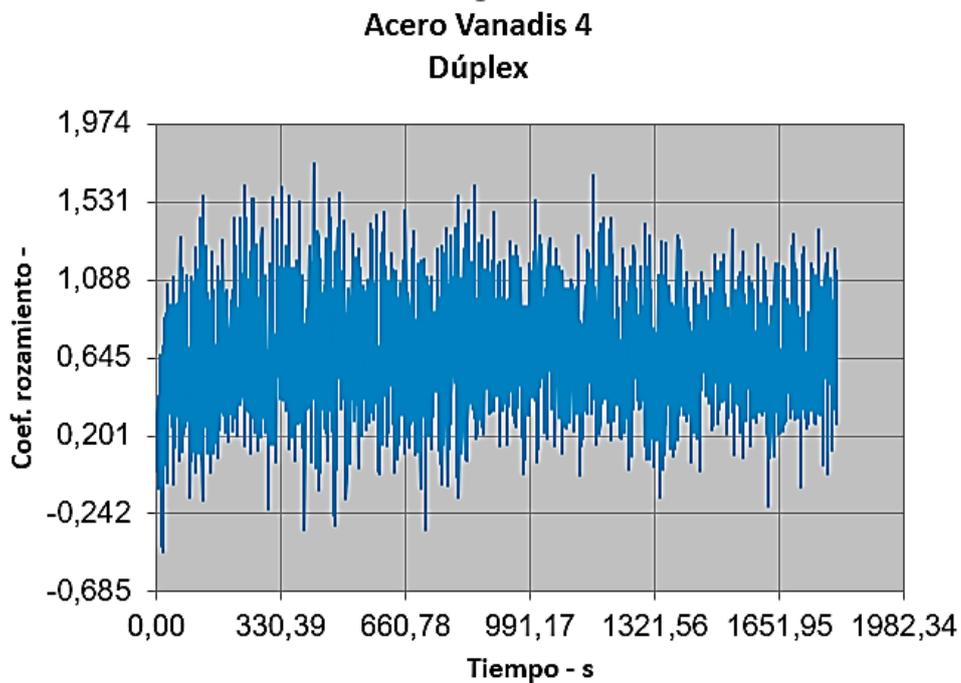


Gráfico 27. Acero Vanadis 4 Dúplex. Radio 10 mm.

**DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.**

Acero	Tratamiento	RPM	Radio	Carga (N)	Ciclos	Fallos	COF.
1.2379 (NTF01)	No Tratada	200	12	40	20000	Sí (12000)	0,6
		200	10	40	20000	Sí (6000)	0,6
		200	8	10	6000	No	0,5
		200	6	5	6000	No	0,8
							<b>0,63</b>
1.2379 (RF01)	PVD	200	12	40	20000	Sí (Inicio)	No
		200	10	20	20000	Vibraciones	0,7
		200	8	10	6000	No	0,6
		200	6	5	6000	No	1,16
							<b>0,82</b>
1.2379 (RF02)	PVD	200	12	20	20000	Vibraciones	0,75
		200	10	20	10000	Vibraciones	0,54
		150	8	20	20000	No	0,93
		150	6	20	20000	No	0,8
							<b>0,76</b>
1.2379 (DF01)	DUPLEX	200	12	20	20000	No	0,65
		200	10	20	20000	No	0,65
		200	8	20	6000	No	0,85
		200	6	20	6000	No	0,9
							<b>0,76</b>
VANADIS 4 DV01	DUPLEX	200	12	20	20000	No	0,75
		200	10	20	20000	No	0,63
		200	8	10	6000	No	0,65
		200	6	5	6000	No	0,8
							<b>0,71</b>

Tabla 15. Resultados de los coeficientes de rozamiento según ensayo. Pin on disc

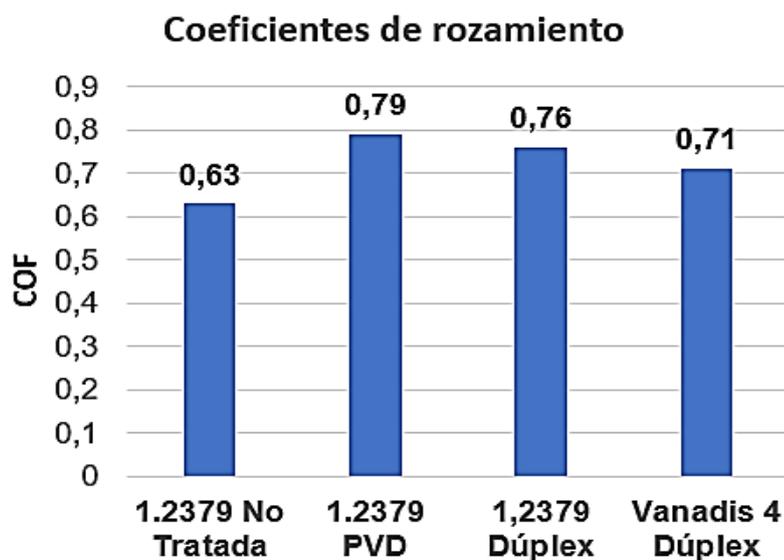


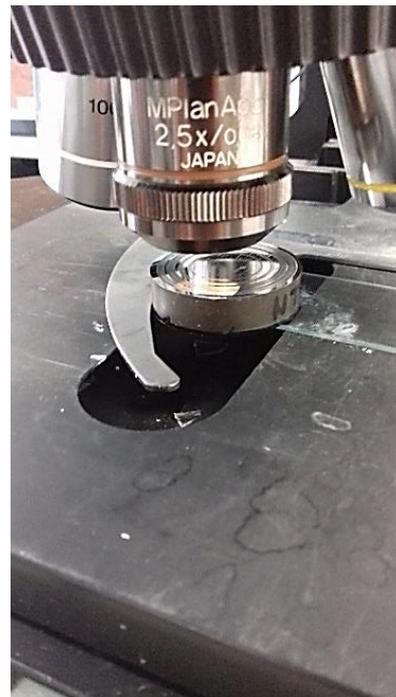
Gráfico 28. Comparativa de los coeficientes de rozamiento

El material acero 1.2379, sin tratar tiene un coeficiente de rozamiento inferior que con recubrimiento PVD. Al aplicar un tratamiento Dúplex al acero 1.2379, también incrementa el coeficiente de rozamiento comparado con el valor de la muestra sin tratar, por lo que este tipo de recubrimiento no es tribológico es un recubrimiento duro.

### CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE DESGASTE UTILIZANDO EL PROCEDIMIENTO DE LA NORMA ASTM G99

A continuación se realizaron las mediciones del ancho del surco en tres zonas diferentes, que se utilizarán en el cálculo del volumen perdido, según el procedimiento de la norma. Al realizar la medición en tres zonas, permite promediar los resultados y obtener un resultado más aproximado.

El objetivo será calcular el coeficiente de desgaste, y compararlo con los resultados obtenidos por las mediciones realizadas confocal.



*Ilustración 29. Microscopía electrónica. Medición del ancho del surco. Laboratorio UPNA*



Ilustración 30. Ancho de surco. Probeta 1.2379 R6-R8. Zona 1,2,3



Ilustración 31. Ancho de surco. Probeta 1.2379 R10-R12. Zona 1,2,3

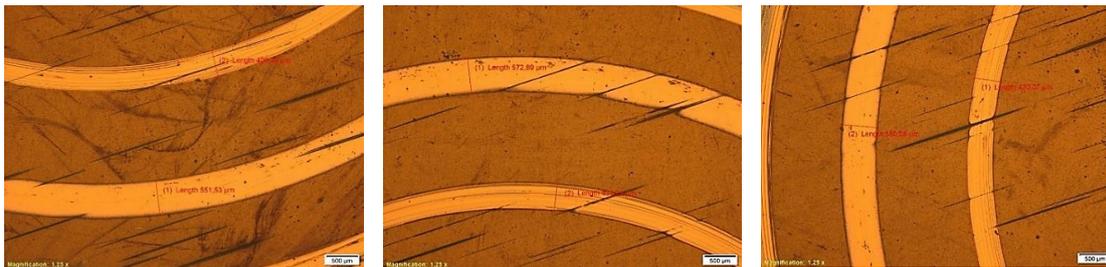


Ilustración 32. Ancho de surco. Probeta 1.2379 PVD R6-R8. Zona 1,2,3 (RF01)

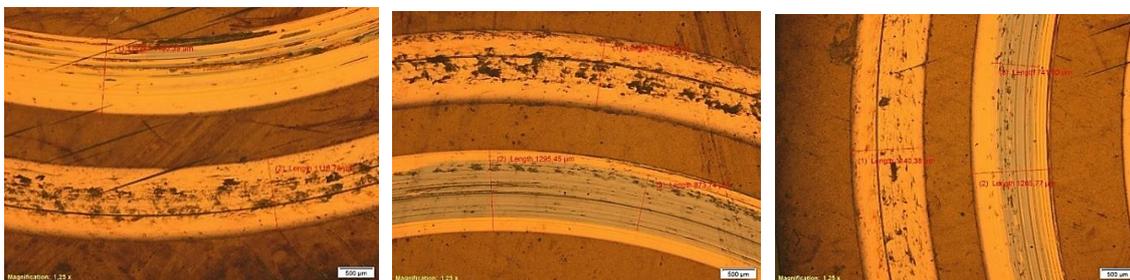


Ilustración 33. Ancho de surco. Probeta 1.2379 R10-R12. Zona 1,2,3 (RF01)

ESTUDIO PARA LA MEJORA DE LA ADHERENCIA Y PROPIEDADES TRIBOLÓGICAS DE  
RECUBRIMIENTOS TiAIN-TiAISIN

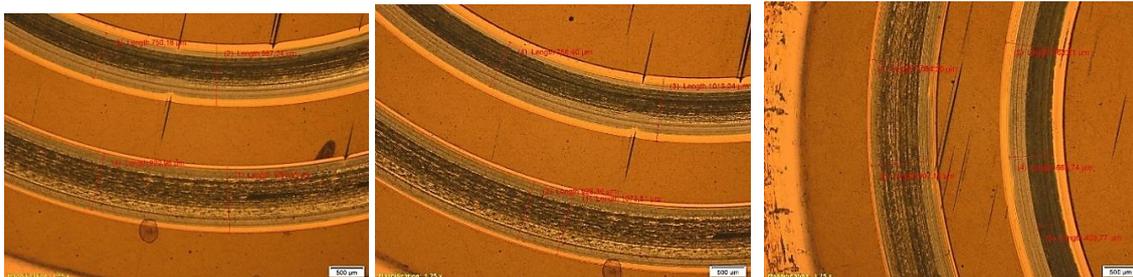


Ilustración 34. Ancho de surco. Probeta 1.2379 R6-R8. Zona 1,2,3 (FR02)



Ilustración 35. Ancho de surco. Probeta 1.2379 R10-R12. Zona 1,2,3 (FR02)

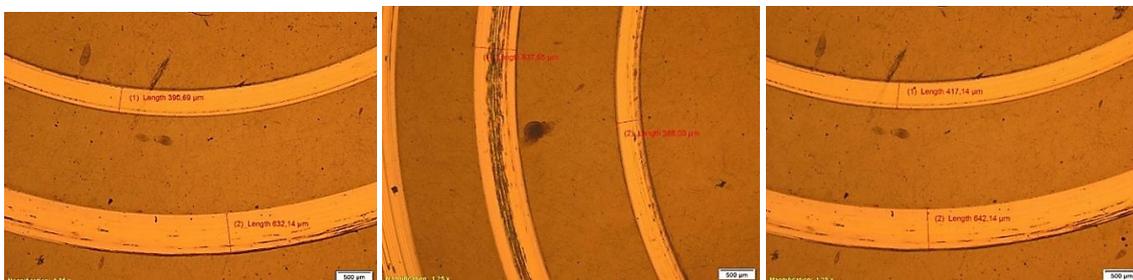


Ilustración 36. Ancho de surco. Probeta 1.2379 Dúplex R6-R8. Zona 1,2,3



Ilustración 37. Ancho de surco. Probeta 1.2379 Dúplex R10-R12. Zona 1,2,3

ESTUDIO PARA LA MEJORA DE LA ADHERENCIA Y PROPIEDADES TRIBOLÓGICAS DE  
RECUBRIMIENTOS TiAIN-TiAISIN



Ilustración 38. Ancho de surco. Probeta Vanadis 4 R6-R8. Zona 1,2,3



Ilustración 39. Ancho de surco. Probeta Vanadis 4 R10-R12. Zona 1,2,3

**Análisis de los resultados:**

Empleando el procedimiento de cálculo establecido en la norma, utilizando las ecuaciones (2) y la (3), utilizadas en el cálculo anterior,

$$V_{perdido} (m^3) = \frac{\pi(\text{radio circun.})x(\text{ancho surco})^3}{6x(\text{radio de la esfera del pin})} \quad \text{Ecuación (2)}$$

$$k = \frac{V_{perdido}}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot N \cdot P} \quad \text{Ecuación (3)}$$

Donde:

K= Coeficiente de desgaste (m<sup>3</sup>/Nxm)

R= radio circunferencia de la prueba

N= Número de ciclos

P= Carga aplicada.

ESTUDIO PARA LA MEJORA DE LA ADHERENCIA Y PROPIEDADES TRIBOLÓGICAS DE  
RECUBRIMIENTOS TiAIN-TiAISIN

PROBETA	R (m)	P (N)	N (RPM)	Ancho Surco (μm)	Ancho Surco (m)	Vperdido (m³)	Coef.K (m³/Nm)			
NTF01	6,E-03	5	6000	561,600	5,616000E-04	1,854855E-10	1,6401E-13			
	6,E-03	5	6000	564,280	5,642800E-04	1,881536E-10	1,6636E-13	1,707707E-13		
	6,E-03	5	6000	581,370	5,813700E-04	2,057721E-10	1,8194E-13			
	8,E-03	10	6000	883,540	8,835400E-04	9,630437E-10	3,1932E-13			
	8,E-03	10	6000	882,400	8,824000E-04	9,593208E-10	3,1808E-13	3,272330E-13		
	8,E-03	10	6000	906,000	9,060000E-04	1,038370E-09	3,4430E-13			
	1,E-02	40	6003	1728,440	1,728440E-03	9,012397E-09	5,9735E-13			
	1,E-02	40	6003	1496,030	1,496030E-03	5,843839E-09	3,8734E-13	4,728131E-13		
	1,E-02	40	6003	1553,540	1,553540E-03	6,544021E-09	4,3375E-13			
	1,2E-02	40	12129	1554,100	1,554100E-03	7,861320E-09	2,1491E-13			
	1,2E-02	40	12129	1518,390	1,518390E-03	7,331766E-09	2,0043E-13	2,067649E-13		
	1,2E-02	40	12129	1529,740	1,529740E-03	7,497414E-09	2,0496E-13			
									2,943954E-13	

Tabla 16. Coeficiente de desgaste probeta 1.2379 no tratado.

PROBETA	R (m)	P (N)	N (RPM)	Ancho Surco (μm)	Ancho Surco (m)	Vperdido (m³)	COE.K (m³/Nm)			
RF01	6,0E-03	5	6000	406,46	4,064600E-04	7,032052E-11	6,2177E-14			
	6,0E-03	5	6000	434,24	4,342400E-04	8,574683E-11	7,5817E-14	6,887605E-14		
	6,0E-03	5	6000	420,07	4,200700E-04	7,762357E-11	6,8634E-14			
	8,0E-03	10	6000	551,53	5,515300E-04	2,342474E-10	7,7670E-14			
	8,0E-03	10	6000	572,89	5,728900E-04	2,625313E-10	8,7048E-14	8,502844E-14		
	8,0E-03	10	6000	580,08	5,800800E-04	2,725405E-10	9,0367E-14			
	1,0E-02	20	6003	1150,39	1,150390E-03	2,657129E-09	3,5224E-13			
	1,0E-02	20	6003	1295,45	1,295450E-03	3,794367E-09	5,0299E-13	4,414782E-13		
	1,0E-02	20	6003	1265,77	1,265770E-03	3,539499E-09	4,6921E-13			
	1,2E-02	40	20000	1113,78	1,113780E-03	2,893722E-09	4,7974E-14			
	1,2E-02	40	20000	1112,32	1,112320E-03	2,882358E-09	4,7786E-14	4,908450E-14		
	1,2E-02	40	20000	1140,38	1,140380E-03	3,106042E-09	5,1494E-14			
									1,61168E-13	
									1,554437E-13	
RF02	6,0E-03	20	20000	987,24	9,872400E-04	1,007620E-09	6,6820E-14			
	6,0E-03	20	20000	1013,24	1,013240E-03	1,089345E-09	7,2239E-14	6,703924E-14		
	6,0E-03	20	20000	963,21	9,632100E-04	9,358184E-10	6,2058E-14			
	8,0E-03	20	20000	1087,35	1,087350E-03	1,795045E-09	8,9278E-14			
	8,0E-03	20	20000	1073,21	1,073210E-03	1,725923E-09	8,5840E-14	8,627957E-14		
	8,0E-03	20	20000	1064,30	1,064300E-03	1,683292E-09	8,3720E-14			
	1,0E-02	20	10000	1156,78	1,156780E-03	2,701654E-09	2,1499E-13			
	1,0E-02	20	10000	1128,61	1,128610E-03	2,509048E-09	1,9966E-13	1,918533E-13		
	1,0E-02	20	10000	1050,27	1,050270E-03	2,021996E-09	1,6091E-13			
	1,2E-02	20	20000	1583,00	1,583000E-03	8,308093E-09	2,7547E-13			
	1,2E-02	20	20000	1564,69	1,564690E-03	8,023125E-09	2,6602E-13	2,539102E-13		
	1,2E-02	20	20000	1469,20	1,469200E-03	6,642038E-09	2,2023E-13			
									1,497706E-13	

Tabla 17. Coeficiente de desgaste probeta 1,2379. Recubrimiento PVD

PROBETA	R (m)	P (N)	N (RPM)	Ancho Surco ( $\mu\text{m}$ )	Ancho Surco (m)	Vperdido ( $\text{m}^3$ )	COE.K ( $\text{m}^3/\text{Nm}$ )		
DF01	6,0E-03	5	6000	390,69	3,906900E-04	6,244900E-11	5,5217E-14		7,652431E-14
	6,0E-03	5	6000	386,00	3,860000E-04	6,022690E-11	5,3252E-14	5,853660E-14	
	6,0E-03	5	6000	417,00	4,170000E-04	7,593409E-11	6,7140E-14		
	8,0E-03	10	6000	632,14	6,321400E-04	3,527014E-10	1,1695E-13		
	8,0E-03	10	6000	637,55	6,375500E-04	3,618346E-10	1,1997E-13	1,198351E-13	
	8,0E-03	10	6000	642,14	6,421400E-04	3,697060E-10	1,2258E-13		
	1,0E-02	20	20000	843,85	8,438500E-04	1,048753E-09	4,1729E-14		
	1,0E-02	20	20000	1014,85	1,014850E-03	1,824244E-09	7,2584E-14	5,049432E-14	
	1,0E-02	20	20000	811,93	8,119300E-04	9,341855E-10	3,7170E-14		
	1,2E-02	20	20000	951,66	9,516600E-04	1,805112E-09	5,9853E-14		
	1,2E-02	20	20000	1176,54	1,176540E-03	3,410976E-09	1,1310E-13	7,723128E-14	
	1,2E-02	20	20000	945,74	9,457400E-04	1,771634E-09	5,8743E-14		

Tabla 18. Coeficiente de desgaste probeta 1.2379. Tratamiento Dúplex.

PROBETA	R (m)	P (N)	N (RPM)	Ancho Surco ( $\mu\text{m}$ )	Ancho Surco (m)	Vperdido ( $\text{m}^3$ )	COE.K ( $\text{m}^3/\text{Nm}$ )		
DV01	6,0E-03	5	6000	381,42	3,814200E-04	5,810841E-11	5,1379E-14		6,300176E-14
	6,0E-03	5	6000	401,92	4,019200E-04	6,799038E-11	6,0117E-14	4,840175E-14	
	6,0E-03	5	6000	331,43	3,314300E-04	3,812449E-11	3,3709E-14		
	8,0E-03	10	6000	627,87	6,278700E-04	3,456022E-10	1,1459E-13		
	8,0E-03	10	6000	517,17	5,171700E-04	1,931378E-10	6,4039E-14	7,676458E-14	
	8,0E-03	10	6000	481,44	4,814400E-04	1,558095E-10	5,1662E-14		
	1,0E-02	20	20000	928,74	9,287400E-04	1,398169E-09	5,5631E-14		
	1,0E-02	20	20000	972,03	9,720300E-04	1,602937E-09	6,3779E-14	7,314974E-14	
	1,2E-02	20	20000	1129,39	1,129390E-03	3,017105E-09	1,0004E-13		
	1,2E-02	20	20000	806,06	8,060600E-04	1,096884E-09	3,6370E-14		
	1,2E-02	20	20000	958,51	9,585100E-04	1,844372E-09	6,1154E-14	5,369095E-14	
	1,2E-02	20	20000	970,86	9,708600E-04	1,916587E-09	6,3549E-14		

Tabla 19. Coeficiente de desgaste Acero Vanadis 4. Tratamiento Dúplex.

Después de calcular los coeficientes, se comparan en un gráfico de barras.

	Coeficientes de desgaste $\text{m}^3/\text{Nm}$
1.2379 No Tratada	2.94E-13 $\pm$ 1.36E-13
1.2379 PVD	1.55E-13 $\pm$ 8.02E-15
1.2379 Dúplex	7.65E-14 $\pm$ 3.1E-14
Vanadis4. Dúplex	6,30E-14 $\pm$ 1.41E-14

Tabla 20. Valores de los coeficientes de desgaste según medición del ancho del surco

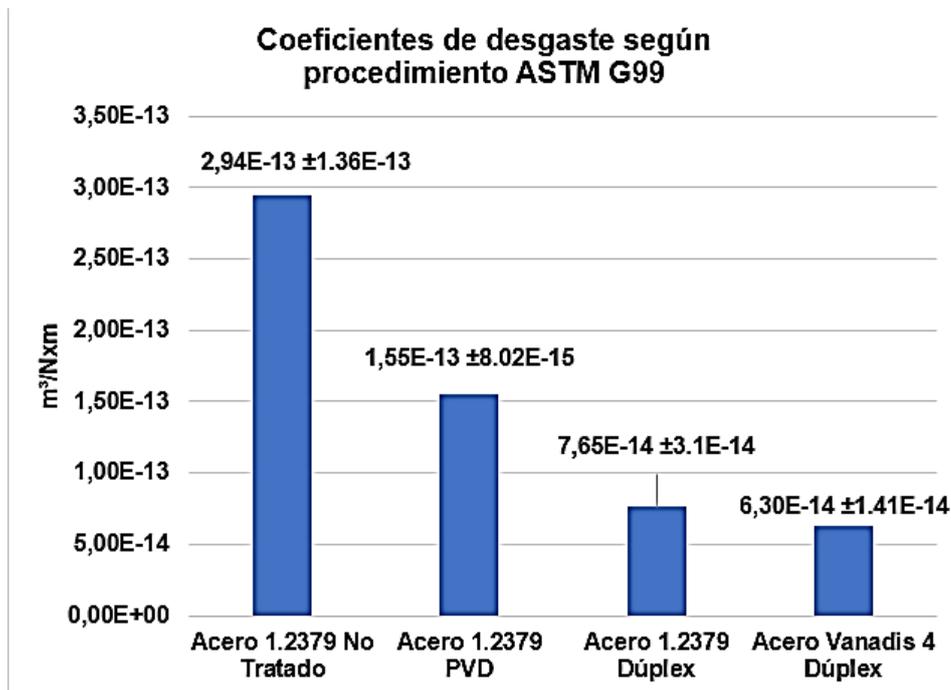


Gráfico 29. Coeficientes de desgaste calculados por medición del ancho del surco en  $m^3/Nm$

Los resultados obtenidos reflejan la superioridad de la resistencia al desgaste del tratamiento Dúplex en el acero 1.2379, con respecto al tratamiento PVD. Hay un incremento de esta resistencia en un 50% con respecto al PVD.

En el caso de la comparación entre ambos aceros con tratamiento Dúplex, hay una mayor resistencia al desgaste en el Vanadis 4, aunque no con gran diferencia.

Por lo que se puede concluir, que con el tratamiento Dúplex, también se optimizan los parámetros de resistencia al desgaste.

### CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE DESGASTE, POR MEDICIONES REALIZADAS CONFOCAL.

Otro modo de determinar el volumen perdido, y calcular el coeficiente de desgaste es por medición confocal y el uso del software Sensoview. Se realiza esta medición en tres zonas de cada surco y luego se calcula el volumen perdido en toda la circunferencia.

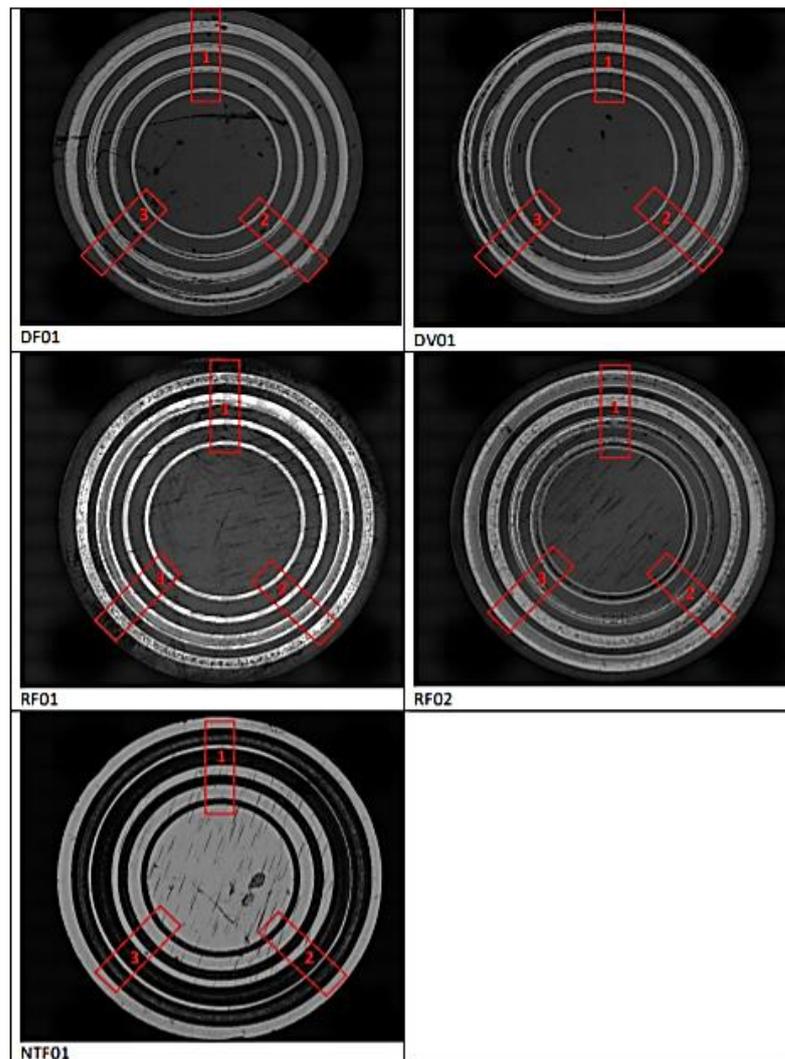


Ilustración 40. Zonas de medición en cada probeta

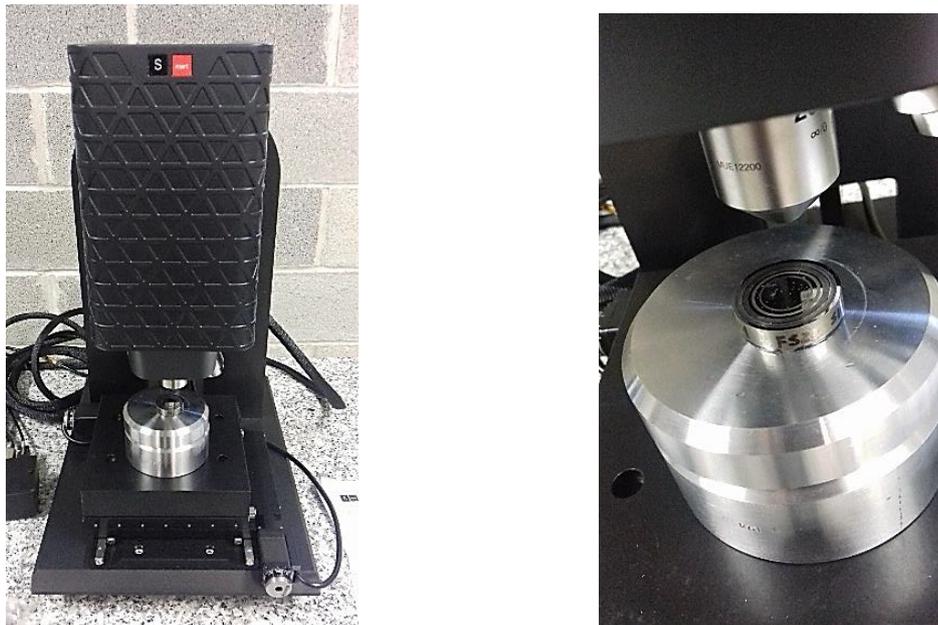


Ilustración 41. Confocal. Laboratorio UPNA. Medición del volumen perdido.

Los resultados de esta medición son procesados por el programa Sensoview y luego se obtiene una imagen con un listado de parámetros en un registro, que genera el software,

Por ejemplo, para la probeta de acero 1.2379 no tratada, (NTF01), se muestran los resultados en la zona 1

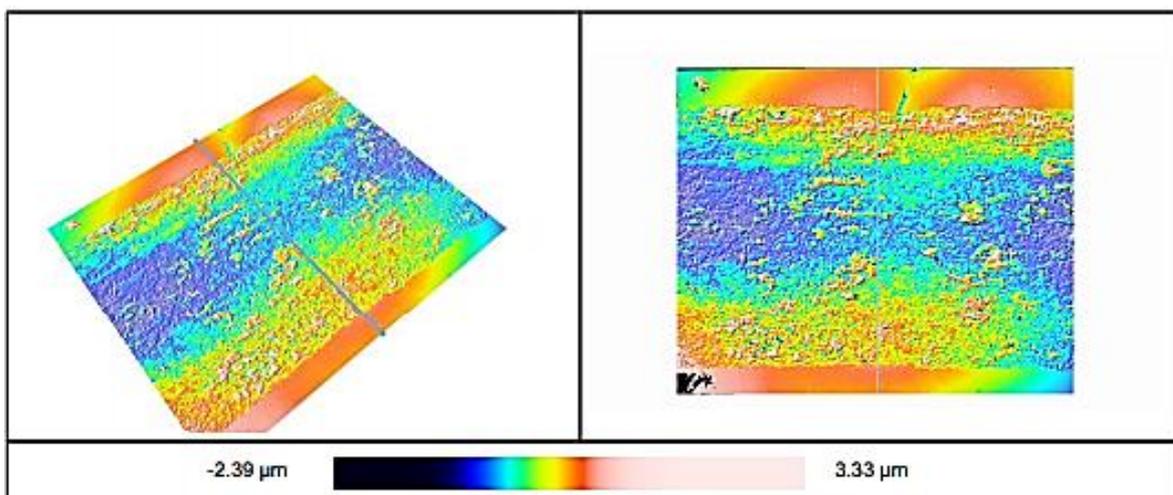


Ilustración 42. Sensoview. Probeta acero 1.2379 no tratada. Radio 6 Zona 1

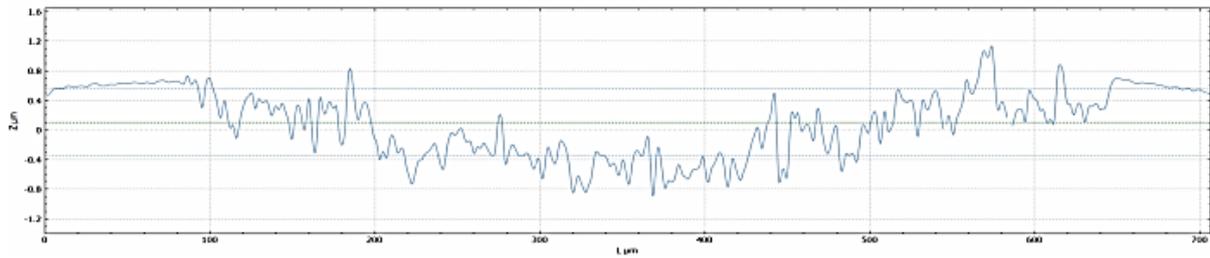


Gráfico 30. Resultado de la medición en la sección.  $V_{Hole} = 283650 \mu m^3$

En el mismo radio, zona 2, se realizó otra medición:

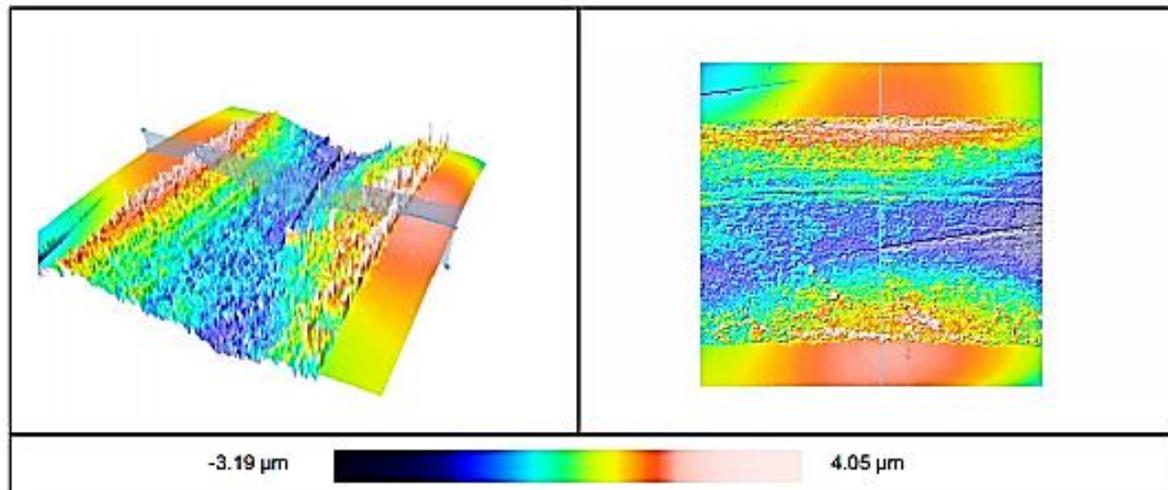


Ilustración 43. Sensoview Probeta acero1.2379 no tratada. Radio 6 Zona 2

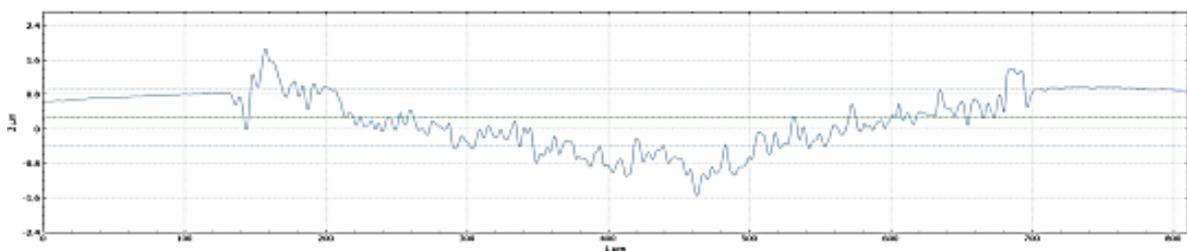


Gráfico 31. Resultados de la medición en la sección.  $V_{Hole} = 3731104 \mu m^3$

Se realiza otra medición en la zona 3

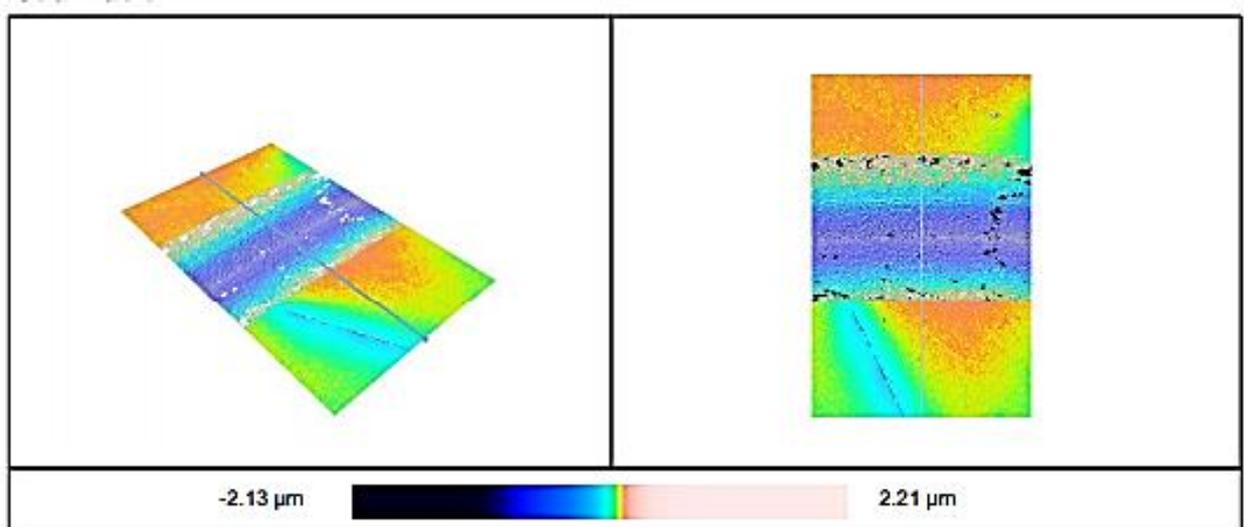


Ilustración 44. Ilustración Sensoview Probeta acero 1.2379 no tratada. Radio 6 Zona 3

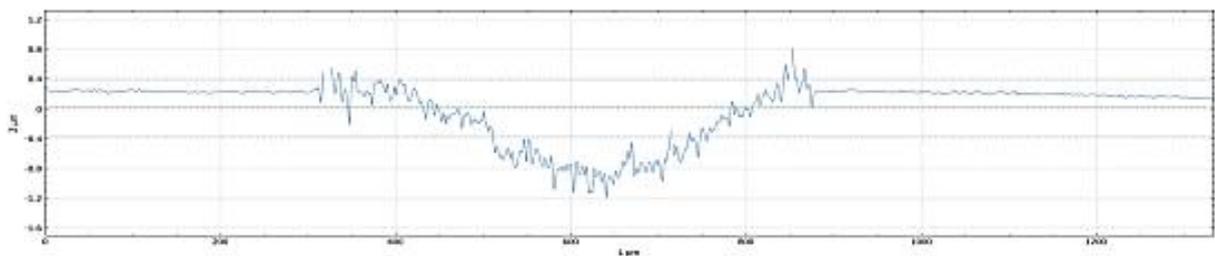


Gráfico 32. Resultados de la medición en la sección. VHole= 231768 μm<sup>3</sup>

De esta manera, se fueron realizando tres mediciones en diferentes secciones de cada radio de las probetas (el resto de las ilustraciones y tablas se encuentran en los anexos) y con el valor VHole, y utilizando la ecuación (4), se calcula el volumen perdido del surco en toda su circunferencia. Luego se promedia el valor calculado en las tres secciones, para tener un valor más exacto.

$$V_{\text{perdido}} = (2 \times \pi \times R \times V_{\text{Hole}}) / L \quad \text{Ecuación (4)}$$

Donde:

$$L = 844.46 \mu\text{m}$$

$$V_{\text{Hole}} = 2.83650 \mu\text{m}^3$$

$$R = 6 \text{ mm}$$

Sustituyendo todo y llevando el resultado final a metros cúbicos, obtenemos

$$V_{perdido} = 2,1273018 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3$$

Luego con el valor del volumen perdido, se calcula el coeficiente de desgaste por la siguiente expresión

$$k = \frac{V_{perdido}}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot N \cdot P} \quad \text{Ecuación (3)}$$

Sustituyendo, obtenemos,

$$K = 1.1255 \times 10^{-14} \text{ m}^3 / \text{Nm}$$

Con los resultados se elabora una hoja de cálculo en Excel y se obtienen la siguiente tabla.

PROBETA	ZONA	R (m)	P (N)	N (RPM)	VpH (μm³)	VpH(m³)	Vp.Surco (m³)	COEF. K (m³/N.m)		
NTF01	1	6,0E-03	5	6000	283650	2,836500E-13	1,273018E-11	1,125595E-14	1,175294E-14	1,579194E-14
	2	6,0E-03	5	6000	373104	3,731040E-13	1,674487E-11	1,480571E-14		
	3	6,0E-03	5	6000	231768	2,317680E-13	1,040172E-11	9,197143E-15		
	1	8,0E-03	10	6000	891073	8,910730E-13	5,332168E-11	1,768002E-14	1,425517E-14	
	2	8,0E-03	10	6000	590685	5,906850E-13	3,534651E-11	1,171994E-14		
	3	8,0E-03	10	6000	673624	6,736240E-13	4,030957E-11	1,336556E-14		
	1	1,0E-02	40	6003	2404380	2,404380E-12	1,798472E-10	1,192053E-14	1,455349E-14	
	2	1,0E-02	40	6003	3840570	3,840570E-12	2,872740E-10	1,904093E-14		
	3	1,0E-02	40	6003	2561400	2,561400E-12	1,915923E-10	1,269901E-14		
1	1,2E-02	40	12129	7699200	7,699200E-12	6,910786E-10	1,889215E-14	2,260616E-14		
2	1,2E-02	40	12129	13660300	1,366030E-11	1,226146E-09	3,351938E-14			
3	1,2E-02	40	12129	6278860	6,278860E-12	5,635892E-10	1,540694E-14			

Tabla 21. Acero 1.2379 no tratada. Cálculo del coeficiente de desgaste

PROBETA	ZONA	R (m)	P (N)	N (RPM)	VpH (μm³)	VpH(m³)	Vp.Surco (m³)	COEF. K (m³/Nm)				
RF01	1	6,0E-03	5	6000	253380	2,533800E-13	1,137167E-11	1,005476E-14	9,591085E-15	5,837720E-15		
	2	6,0E-03	5	6000	255702	2,557020E-13	1,147588E-11	1,014690E-14				
	3	6,0E-03	5	6000	216004	2,160040E-13	9,694237E-12	8,571587E-15				
	1	8,0E-03	10	6000	64429,3	6,442930E-14	3,855440E-12	1,278359E-15	1,463421E-15			
	2	8,0E-03	10	6000	89477,6	8,947760E-14	5,354327E-12	1,775349E-15				
	3	8,0E-03	10	6000	67362,4	6,736240E-14	4,030957E-12	1,336556E-15				
	1	1,0E-02	20	6003	893241	8,932410E-13	6,681427E-11	8,857089E-15	1,216423E-14			
	2	1,0E-02	20	6003	1445240	1,445240E-12	1,081037E-10	1,433053E-14				
	3	1,0E-02	20	6003	1341820	1,341820E-12	1,003679E-10	1,330505E-14				
	1	1,2E-02	40	20000	101389	1,013890E-13	9,100655E-12	1,508765E-16	1,321491E-16			
	2	1,2E-02	40	20000	73412,1	7,341210E-14	6,589455E-12	1,092442E-16				
	3	1,2E-02	40	20000	91611,5	9,161150E-14	8,223029E-12	1,363266E-16				
									6,095605E-15			
	RF02	1	6,0E-03	20	20000	2484800	2,484800E-12	1,115176E-10	7,395238E-15		6,784950E-15	6,353491E-15
		2	6,0E-03	20	20000	1870270	1,870270E-12	8,393752E-11	5,566280E-15			
3		6,0E-03	20	20000	2484160	2,484160E-12	1,114888E-10	7,393333E-15				
1		8,0E-03	20	20000	3622030	3,622030E-12	2,167418E-10	1,077985E-14	1,043074E-14			
2		8,0E-03	20	20000	3324270	3,324270E-12	1,989239E-10	9,893661E-15				
3		8,0E-03	20	20000	3567890	3,567890E-12	2,135020E-10	1,061872E-14				
1		1,0E-02	20	10000	820018	8,200180E-13	6,133720E-11	4,881060E-15	3,656159E-15			
2		1,0E-02	20	10000	221443	2,214430E-13	1,656390E-11	1,318113E-15				
3		1,0E-02	20	10000	801243	8,012430E-13	5,993284E-11	4,769304E-15				
1		1,2E-02	20	20000	1595620	1,595620E-12	1,432225E-10	4,748869E-15	4,542110E-15			
2		1,2E-02	20	20000	734857	7,348570E-13	6,596061E-11	2,187074E-15				
3		1,2E-02	20	20000	2247970	2,247970E-12	2,017773E-10	6,690387E-15				

Tabla 22. Acero 1.2379 con recubrimiento PVD. Cálculo del coeficiente de desgaste

ESTUDIO PARA LA MEJORA DE LA ADHERENCIA Y PROPIEDADES TRIBOLÓGICAS DE  
 RECUBRIMIENTOS TiAIN-TiAISIN

PROBETA	ZONA	R (m)	P (N)	N (RPM)	VpH ( $\mu\text{m}^3$ )	VpH( $\text{m}^3$ )	Vp.Surco ( $\text{m}^3$ )	COEF. K ( $\text{m}^3/\text{Nm}$ )		
DF01	1	6,0E-03	5	6000	164741	1,647410E-13	7,393559E-12	6,537341E-15	5,196828E-15	2,813235E-15
	2	6,0E-03	5	6000	143446	1,434460E-13	6,437841E-12	5,692302E-15		
	3	6,0E-03	5	6000	84693,2	8,469320E-14	3,801022E-12	3,360841E-15		
	1	8,0E-03	10	6000	162244,0	1,622440E-13	9,708658E-12	3,219127E-15	2,560825E-15	
	2	8,0E-03	10	6000	126906,0	1,269060E-13	7,594037E-12	2,517976E-15		
	3	8,0E-03	10	6000	98046,7	9,804670E-14	5,867101E-12	1,945371E-15		
	1	1,0E-02	20	20000	515156	5,151560E-13	3,853358E-11	1,533202E-15	1,536373E-15	
	2	1,0E-02	20	20000	438476	4,384760E-13	3,279793E-11	1,304988E-15		
	3	1,0E-02	20	20000	595032	5,950320E-13	4,450829E-11	1,770929E-15		
1	1,2E-02	20	20000	662008	6,620080E-13	5,942170E-11	1,970262E-15	1,958916E-15		
2	1,2E-02	20	20000	449168,0	4,491680E-13	4,031723E-11	1,336810E-15			
3	1,2E-02	20	20000	863411,0	8,634110E-13	7,749959E-11	2,569676E-15			

Tabla 23. Acero 1.2379 con recubrimiento Dúplex. Cálculo del coeficiente de desgaste.

PROBETA	ZONA	R (m)	P (N)	N (RPM)	VpH ( $\mu\text{m}^3$ )	VpH( $\text{m}^3$ )	Vp.Surco ( $\text{m}^3$ )	COEF. K ( $\text{m}^3/\text{Nm}$ )		
DV01	1	6,0E-03	5	6000	64322,1	6,432210E-14	2,886769E-12	2,552464E-15	3,584090E-15	2,430517E-15
	2	6,0E-03	5	6000	86999,1	8,699910E-14	3,904510E-12	3,452345E-15		
	3	6,0E-03	5	6000	119636,0	1,196360E-13	5,369251E-12	4,747460E-15		
	1	8,0E-03	10	6000	92970,7	9,297070E-14	5,563354E-12	1,844657E-15	2,215322E-15	
	2	8,0E-03	10	6000	109684,0	1,096840E-13	6,563475E-12	2,176270E-15		
	3	8,0E-03	10	6000	132302,0	1,323020E-13	7,916933E-12	2,625040E-15		
	1	1,0E-02	20	20000	439927	4,399270E-13	3,290646E-11	1,309307E-15	2,566518E-15	
	2	1,0E-02	20	20000	675373	6,753730E-13	5,051778E-11	2,010039E-15		
	3	1,0E-02	20	20000	1471750	1,471750E-12	1,100866E-10	4,380208E-15		
1	1,2E-02	20	20000	310930	3,109300E-13	2,790901E-11	9,253869E-16	1,356137E-15		
2	1,2E-02	20	20000	430396,0	4,303960E-13	3,863225E-11	1,280940E-15			
3	1,2E-02	20	20000	625660,0	6,256600E-13	5,615911E-11	1,862083E-15			

Tabla 24. Acero Vanadis 4 con recubrimiento Dúplex. Cálculo del coeficiente de desgaste

Si comparamos los coeficientes de desgaste obtenido por las mediciones realizadas confocal con el soft sensoview, obtenemos los siguientes resultados en  $\text{m}^3/\text{Nm}$

	Coeficientes de desgaste $\text{m}^3/\text{Nm}$
1.2379 No Tratada	$1.58\text{E-}14 \pm 1.36\text{E-}13$
1.2379 PVD	$6.09\text{E-}15 \pm 8.02\text{E-}15$
1.2379 Dúplex	$2,81\text{E-}15 \pm 3.1\text{E-}14$
Vanadis 4. Dúplex	$2,43\text{E-}15 \pm 1.41\text{E-}14$

 Tabla 25. Resultados del cálculo de los coeficientes de desgaste en  $\text{m}^3/\text{Nm}$

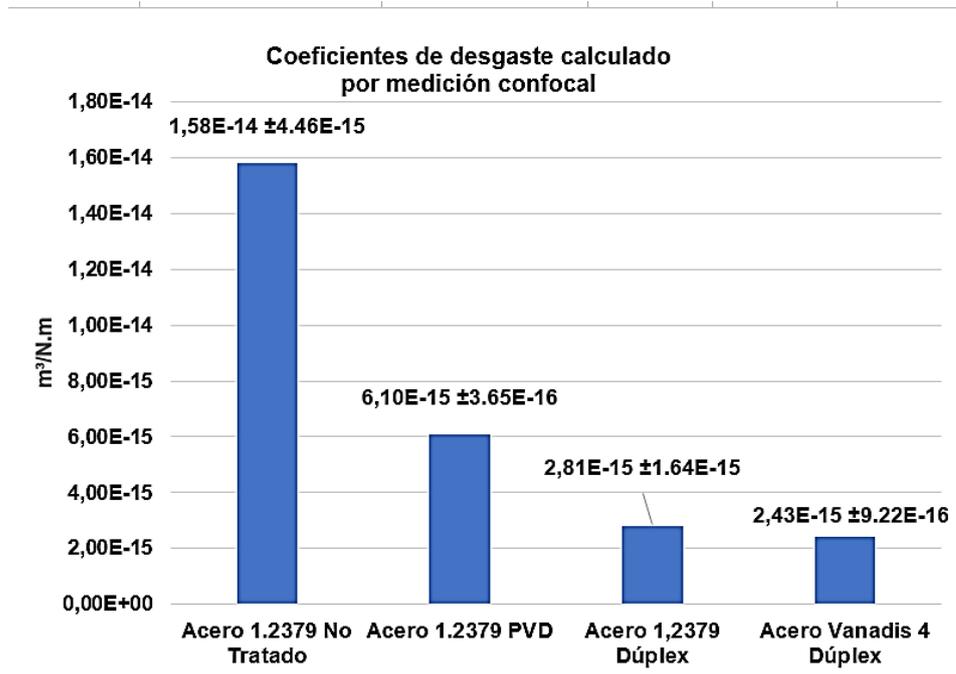


Gráfico 33. Comparativa de los coeficientes de desgaste.

Por este procedimiento, se obtiene la misma tendencia, que por el procedimiento de la norma, aunque hay ciertas diferencias en cuanto a los valores, debido a que en el ensayo de fricción, ocurren deformaciones plásticas del surco y deformaciones en la bola, que no dejan una huella perfectamente esférica. Además en los ensayos, se provoca cierta vibración, que no deja una huella limpia en el surco a la hora de medir el ancho por microscopía electrónica, por eso el resultado obtenido por confocal es mucho más exacto.

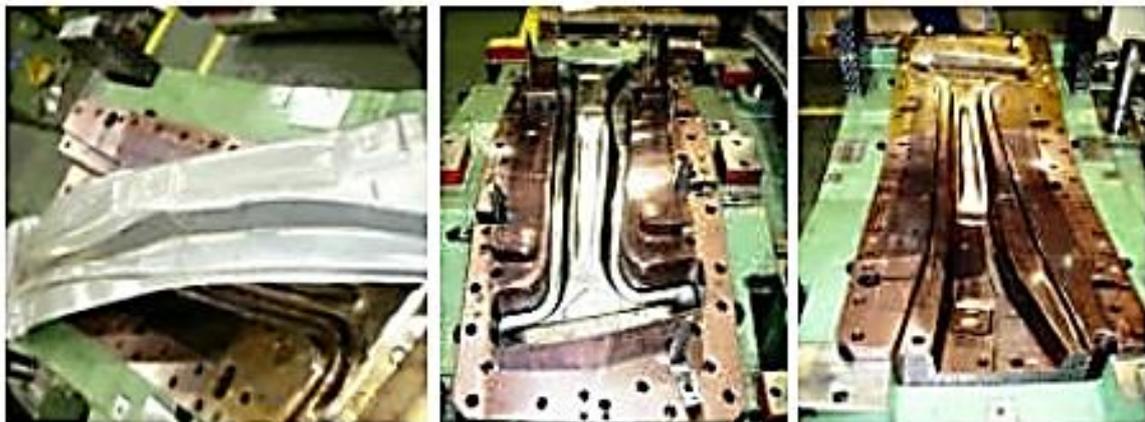
## 6. EJEMPLO DE APLICACIONES DE RECUBRIMIENTO DÚPLEX

Con el tratamiento Dúplex, se logran incrementar un conjunto de propiedades mecánicas y tribológicas, que son de vital importancia en la vida de servicio de útiles, herramientas y piezas. A continuación ejemplos de aplicación.



*Ilustración 45. Ejemplo 1. Acero 1.2379 con tratamiento Dúplex. Útil de conformar*

Otro ejemplo de tratamiento Dúplex aplicado al acero 1.2379 para fabricar útiles con terminación con acabado de espejo y una dureza entre 56-60 HRC



*Ilustración 46. Ejemplo 2 de aplicaciones del tratamiento Dúplex. Útil [33]*

Después de haber realizado 300 000 piezas, se le realizó una inspección al siguiente útil y su geometría no había sufrido prácticamente desgaste,



Ilustración 47. Ejemplo 3 de aplicaciones del tratamiento Dúplex. Útil [34]

Otro ejemplo de aplicación es en una horquilla de substrato 1.2379 (D2), con una dureza entre (58-69) HRC



Ilustración 48. Ejemplo 4 de aplicaciones del tratamiento Dúplex. Horquilla. Acero 1.2379

[35]

Útil de acero Vanadis6 / Vanadis10. Después de haber realizado 100000 piezas, es inspeccionado y no se aprecia deterioro superficial por desgaste.



*Ilustración 49. Ejemplo 5. de tratamiento Dúplex a útil de Acero Vanadis 6 / Vanadis10 [36]*

## 7. CONCLUSIONES

Como conclusión del trabajo realizado, se puede plantear que los resultados de los ensayos muestran una mejora significativa de la adherencia del recubrimiento TiAIN-TiAISIN al sustrato, cuando se aplica con un tratamiento Dúplex, en los aceros estudiados 1.2379 y Vanadis 4.

Al comparar los valores de Lc2 del acero 1.2379 tratado con PVD y el valor del tratamiento Dúplex, se tiene Lc2= 75 N, mientras que el valor del Dúplex de Lc2= 96 N, por lo que se ha incrementado en un 22%.

Si se comparan ambas probetas con tratamientos Dúplex, en el caso del acero 1.2379 el valor de Lc2= 96 N, mientras que el acero Vanadis 4 tuvo un resultado que supera los 100 N, en este caso Lc2= 109 N.

El tratamiento Dúplex, al comenzar por una nitruración, mejora una serie de propiedades mecánicas y tribológicas en el sustrato, que luego con la aplicación de la capa dura, se logran una serie de propiedades combinadas, que son imposibles de lograr por tratamientos individuales.

Entre estas mejoras que se logran, se pueden mencionar,

- Mejora de la adherencia de la capa al sustrato
- Aumenta la dureza superficial.
- Aumenta la capacidad de trabajar bajo altas cargas y presiones externas,
- Aumenta la resistencia al desgaste
- Aumenta la resistencia a fatiga
- Aumenta la resistencia a la corrosión.

Por todas estas razones, se recomienda que para optimizar los valores de las propiedades mecánicas y tribológicas de los recubrimientos antes mencionados, se aplique un tratamiento Dúplex, y con ello se incrementarán las horas de servicios de los útiles, piezas y herramientas que podrán trabajar en condiciones más severas sin que ocurran fallas por delaminación, ni deformaciones plásticas en el sustrato.

En los útiles que ejemplifican la aplicación de tratamiento Dúplex, se realizaron inspecciones dimensionales, después de haber estado largas horas de servicio, produciendo un gran lote de piezas, (en el orden de 100000), y no se registraron fallas dimensionales por causa del desgaste, lo que valida la aplicación del método.

## 8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Trabajo de fin de máster. “Estudio de la aplicabilidad industrial de recubrimientos pVD de última generación”. Autor Eneko Barba Areso. Tutor. Dr José Antonio García Lorente.
- [2] “Tribología integral”. Dr. Francisco Martínez. CEIM. CUJAE,
- [3] <https://www.mecanizadossinc.com/aceros-especiales-acero-f-521/>
- [4].<https://www.mecanizadossinc.com/acero-especial-f-521-tambien-se-mecaniza/>
- [5]<https://www.bing.com/search?q=Acero+Vanadis+4+&qsn=&form=QBRE&sp=1&pq=acero+Vanadis+4+&sc=0-16&sk=&cvid=4566A89D6D0F4F359ED0CF899F9D8BF0>
- [6] <http://www.aeaceros.com/datos-tecnicos/elementos-quimicos>
- [7] [http://www.ecured.cu/Tratamiento\\_térmico\\_del\\_metal](http://www.ecured.cu/Tratamiento_térmico_del_metal)
- [8] <https://kuzudecoletaje.es/tratamientos-termicos-de-los-metales-la-nitruracion/>
- [9] <https://www.researchgate.net/publication/237272525>
- [10] <http://flubetech.com/www2/wp-content/uploads/2013/07/PDFTratermat2013-Articulo.pdf>
- [11]<https://www.pf-mex.com/art%C3%ADculos/el-valor-de-los-recubrimientos-pvd-para-dispositivos-medicos>
- [12] INFORME TECNICO. Dr. Rafael Rodríguez Trías “Recubrimiento duro por deposición física de vapor.: [www.ain.es/boletin/difusin\\_1.htm](http://www.ain.es/boletin/difusin_1.htm). tema1
- [13] <https://www.metalworkingworldmagazine.com/nanocomposite-coatings-for-die-casting/>
- [14] <https://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/32006-Nuevos-recubrimientos-con-tecnologia-avanzada-PVD.html>
- [15] <https://www.metalworkingworldmagazine.com/nanocomposite-coatings-for-die-casting/>
- [16] <https://www.voestalpine.com/highperformancemetals/mexico/es/servicios/recubrimientos-pvd/>
- [17] A comparative study in the tribological behavior of diamond-like carbon coatings deposited by HiPIMS technology with positive voltage pulses J. A. Garcí<sup>1</sup>, Pedro J. Rivero, E. Barba, I. Fernández, J.A. Santiago, J. Fernández, G. G. Fuentes and R.J. Rodríguez
- [18] J.A. García, R. Rodríguez “Recubrimientos PVD” Deformación Metálica Vol 267 (2002) p.88-93 (6)

- [19] R. Rodríguez. “Recubrimientos de baja fricción para componentes de automoción y útiles de deformación metálica” Superficies Vol 15 (2003) p 34-36
- [20] [https://www.eifeler.com/app/uploads/sites/91/2020/02/voestalpine\\_eifeler-Variantic-Bro\\_SPA\\_2020.pdf](https://www.eifeler.com/app/uploads/sites/91/2020/02/voestalpine_eifeler-Variantic-Bro_SPA_2020.pdf)
- [21] [https://www.uddeholm.com/app/uploads/sites/41/2019/04/VARIANTIC-DÚPLEX\\_SP\\_U.pdf](https://www.uddeholm.com/app/uploads/sites/41/2019/04/VARIANTIC-DÚPLEX_SP_U.pdf)
- [22] <https://www.eifeler.com/en/Dúplexbehandlung/>
- [23] <https://www.eifeler.com/en/Dúplex-variantic-1400/>
- [24] [https://www.eifeler.com/app/uploads/sites/82/2018/05/DÚPLEX-TREATMENT\\_EN.pdf](https://www.eifeler.com/app/uploads/sites/82/2018/05/DÚPLEX-TREATMENT_EN.pdf)
- [25] <https://studylib.es/doc/8167642/recubrimientos-de-nitruro-de-cromo--crn->
- [26] <https://www.flubetech.com/recubrimientos/hardlox/>
- [27] Parámetros del proceso aportado por especialistas.
- [28] Manuales de clases. Asignatura Ingeniería se superficie. Dr. Rafael Rodriguez Tria
- [29] <https://www.cromtek.cl/2020/08/14/microdureza-como-obtener-una-medicion-fidedigna/>
- [30] <https://www.asmec.de/en/information.php?seite=0&useite=20>
- [31] <https://www.asmec.de/en/information.php?seite=0&useite=21>
- [32] <https://www.interempresas.net/TTS/Articulos/186215-Microdureza-algunos-topicos.html>
- [33] <https://www.eifeler.com/en/Dúplexbehandlung-ziehwerkzeug-1/>
- [34] <https://www.eifeler.com/en/Dúplexbehandlung-ziehwerkzeug-2/>
- [35] <https://www.eifeler.com/en/Dúplexbehandlung-querlenkerschale/>
- [36] <https://www.eifeler.com/en/Dúplexbehandlung-transferwerkzeug/>
- [37] Realising the potential of Dúplexsurface engineering T. Bell, H. Dong and Y. Sun. Tribology International Vol. 31, Nos 1–3, pp. 127–137, 1998 1998 Elsevier Science Ltd. All rights reserved  
Printed in Great Britain 0301–679X/98/\$19.00 + 0.00
- [38] Tribological behavior of Dúplex-coating on Vanadis10 cold work tool steel B.F. Zappelino a, E.A. dos S. de Almeida a, A.P. Krelling b, C.E. da Costa a, L.C. Fontana a , J.C
- [39] Caracterización mecánica de recubrimientos sol-gel C. Pérez a, A. Díaz-Parralejo b , R. Caruso b , P. Miranda b , A. Pajares a y F. Guiberteau b

[40] The influence of plasma nitriding on microstructure and properties of CrN and CrNiN coatings on Ti6Al4V by magnetron sputtering Jie Jin, Hejie Duan\*, Xiaohan Li College of Material Science and Engineering, Zhejiang University of Technology, H

[41] Influence of temperature in arc-activated plasma nitriding of maraging steel in solution annealed and aged conditions J. Fernández de Ara a, \*, E. Almandoz a, J.F. Palacio a, G.G. Fuentes a, R.J. Rodríguez b, J.A. García b a Asociación de la Industria Navarra, Carretera Pamplona 1, 31191 Cordovilla, Spain b IMEM Department, Universidad Pública de Navarra, Campus de Arrosadía s/n, 31006 Pamplona, Spain

[42] Novel performances of in situ plasma nitriding PVD Dúplex-treated nanocrystalline TiN coatings Chaolin Tan, Kesong Zhou, Tongchun Kuang, Yuling Li & Wenyou Ma  
Hardness and scratch response of PVD multilayer coatings Brahim Tlili, Corinne Nouveau, Yacine Benlatreche, Nasri Mustapha, Michel Lambertin

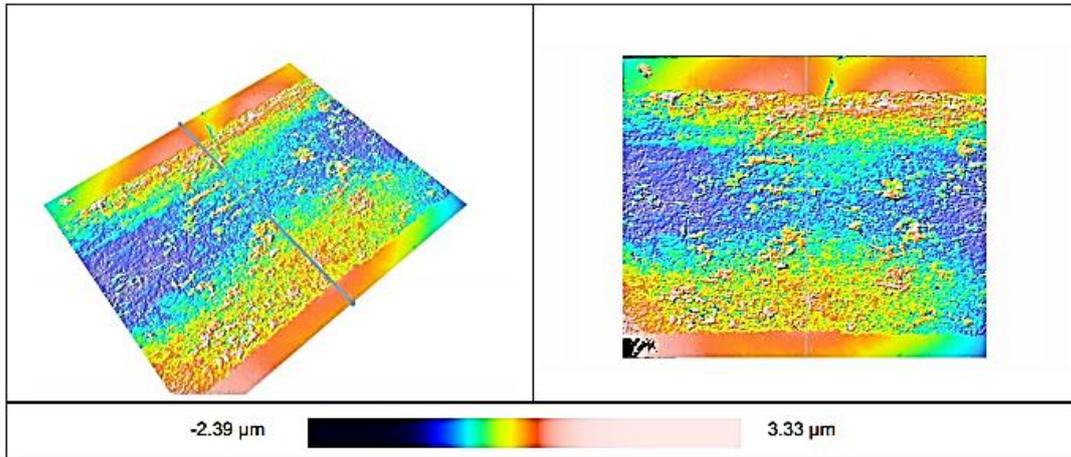
[43] <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00908722> HAL Id: hal-00908722 Submitted on 27 Nov 2013

[44] [https://www.bruker.com/fileadmin/user\\_upload/8-PDF Docs/SurfaceAnalysis/TMT/Webinars/Advanced-Scratch-Testing-for-Evaluation-of-Coatings-Slides.pdf](https://www.bruker.com/fileadmin/user_upload/8-PDF Docs/SurfaceAnalysis/TMT/Webinars/Advanced-Scratch-Testing-for-Evaluation-of-Coatings-Slides.pdf)

**9. ANEXOS**

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DEL VOLUMEN PERDIDO POR CONFOCAL. SENSIVIEW

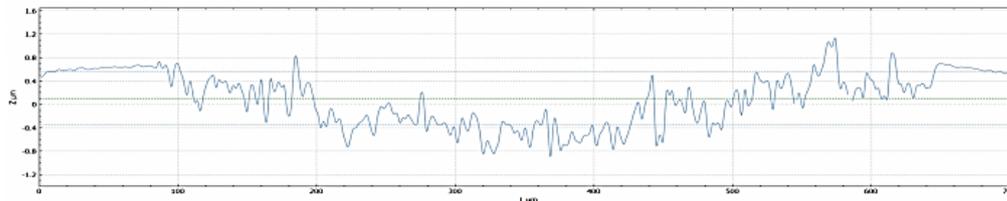
Anexo 1. Acero 1.2379 No Tratado. R6. Zona 1



Filename: NTF01\_R6\_zona1.plux  
 Acquisition author: senso5  
 Analysis author:

Company name: Sensofar S.L.  
 Date: 2020-07-08 14:53:50  
 Analysis Software Version: 1.5.0.0

**Profile**

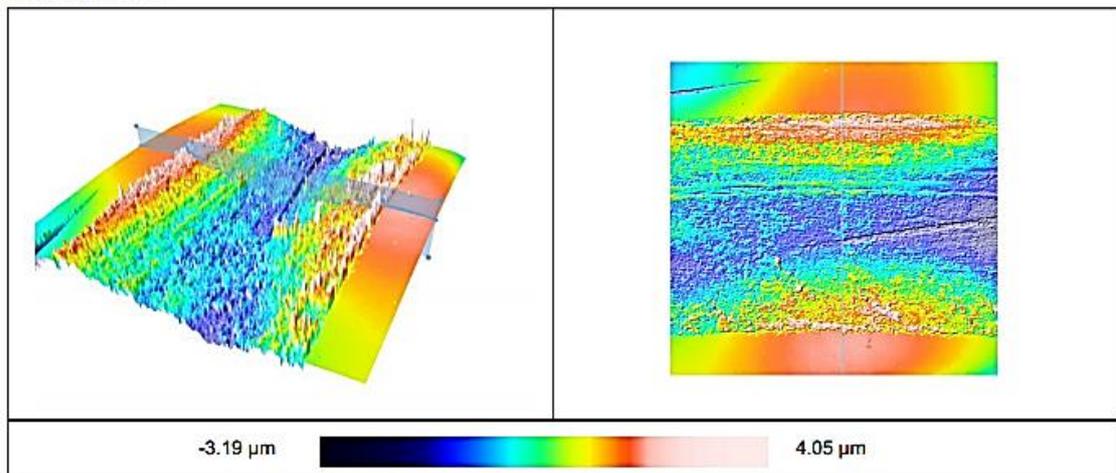


**Volume**

	Peak	Hole
Volume (μm <sup>3</sup> )	22115.8	283650
Area (mm <sup>2</sup> )	79483	401873
Max h/d (μm)	2.88454	2.76014

Anexo 2. Acero 1.2379 No Tratado R6. Zona 2

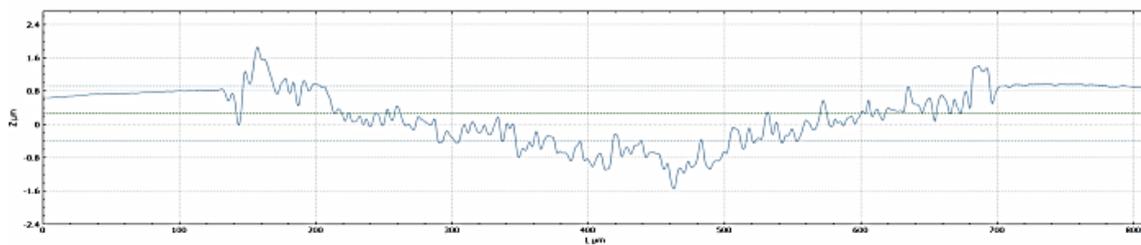
**Visualization**



**Filename:** NTF01\_R6\_zona2.plux  
**Acquisition author:** senso5  
**Analysis author:**

**Company name:** Sensofar S.L.  
**Date:** 2020-07-08 14:56:35  
**Analysis Software Version:** 1.5.0.0

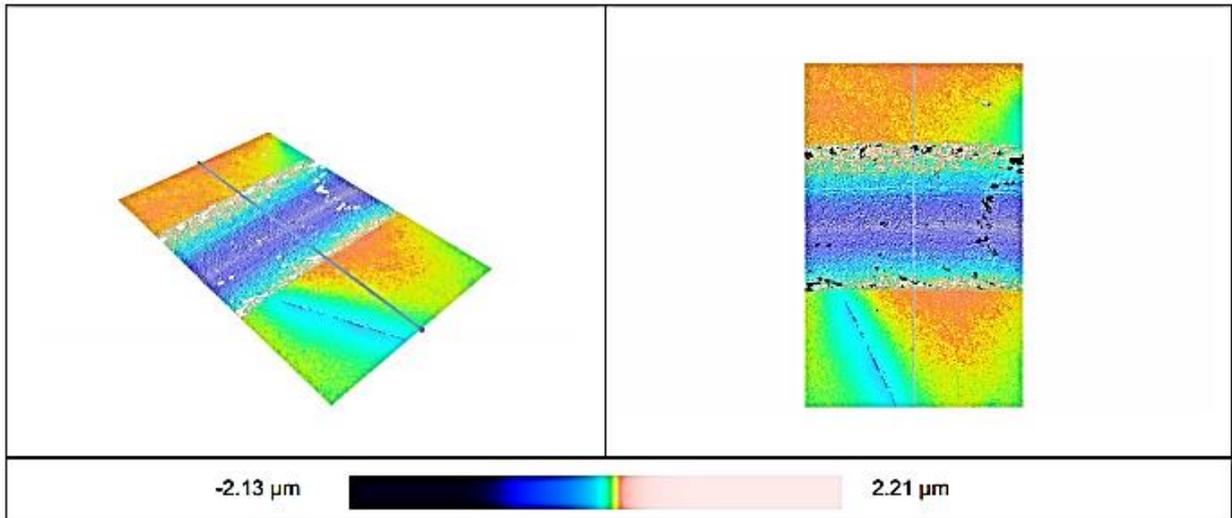
**Profile**



**Volume**

	Peak	Hole
Volume (μm <sup>3</sup> )	30227.2	373104
Area (mm <sup>2</sup> )	86036.5	399784
Max h/d (μm)	3.52357	3.88989

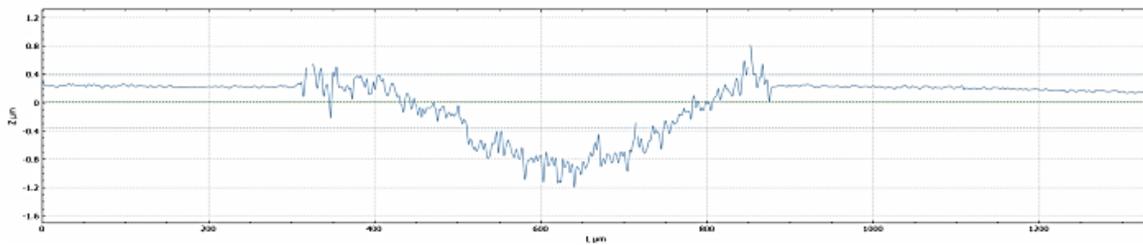
Anexo 3. Acero 1.2379 No Tratado. R6. Zona 3



**Filename:** NTF01\_R6\_zona3.plux  
**Acquisition author:** senso5  
**Analysis author:**

**Company name:** Sensofar S.L.  
**Date:** 2020-07-08 15:00:53  
**Analysis Software Version:** 1.5.0.0

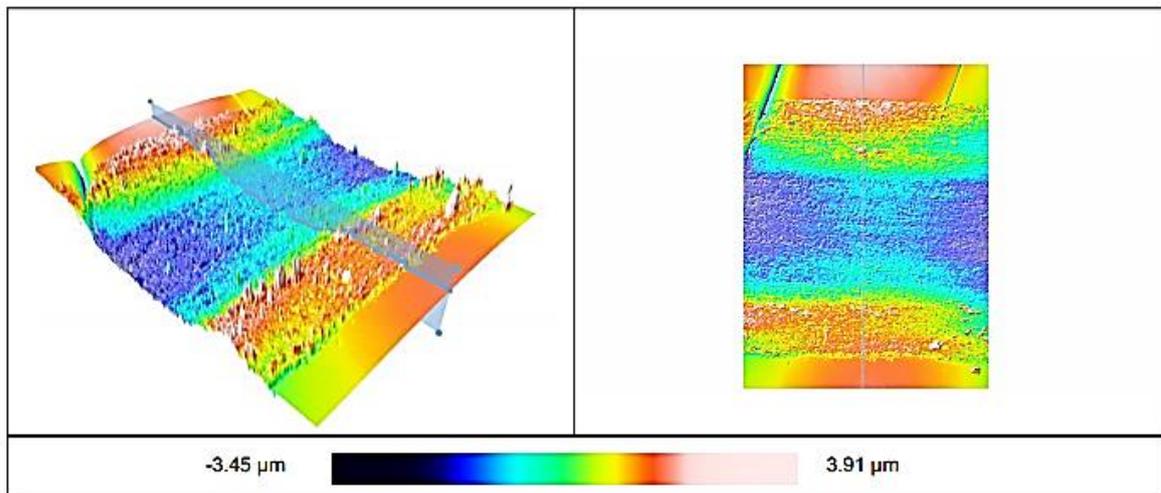
**Profile**



**Volume**

	Peak	Hole
Volume (μm <sup>3</sup> )	10401.5	231768
Area (mm <sup>2</sup> )	91035.1	397902
Max h/d (μm)	1.97307	2.34725

Anexo 4. Acero 1.2379 No Tratado. R8. Zona 1



Filename: NTF01\_R8\_zona1.plux

Acquisition author: senso5

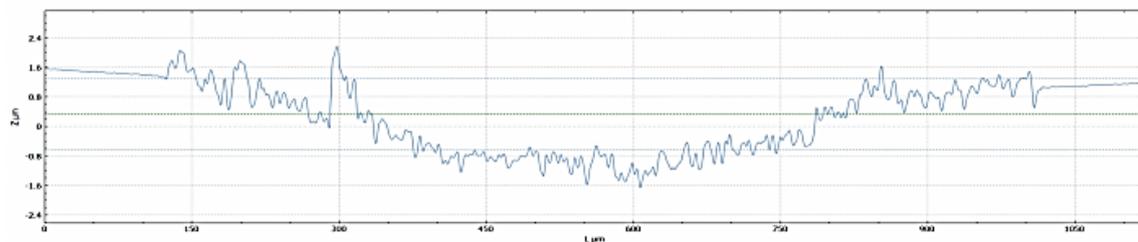
Analysis author:

Company name: Sensofar S.L.

Date: 2020-07-08 15:03:23

Analysis Software Version: 1.5.0.0

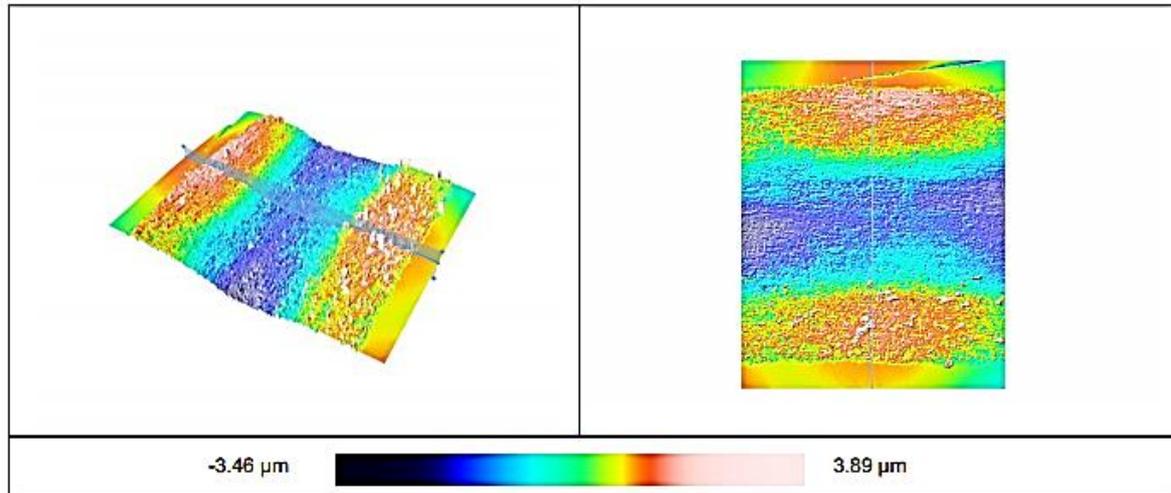
**Profile**



**Volume**

	Peak	Hole
Volume ( $\mu\text{m}^3$ )	32840.4	891073
Area ( $\text{mm}^2$ )	114980	653709
Max h/d ( $\mu\text{m}$ )	3.01616	4.31889

Anexo 5. Acero 1.2379 No Tratado. R8. Zona 2



Filename: NTF01\_R8\_zona2.plux

Acquisition author: senso5

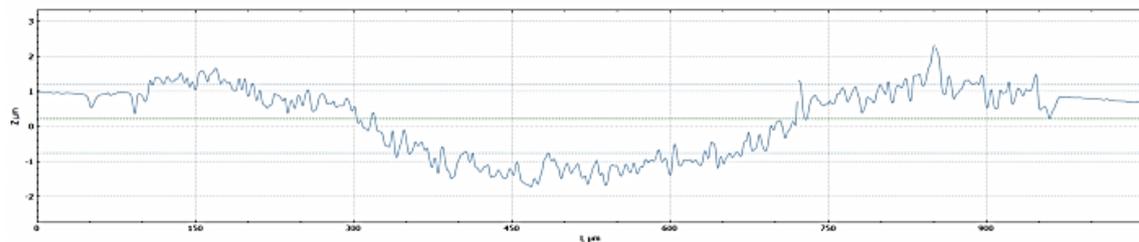
Analysis author:

Company name: Sensofar S.L.

Date: 2020-07-08 16:01:14

Analysis Software Version: 1.5.0.0

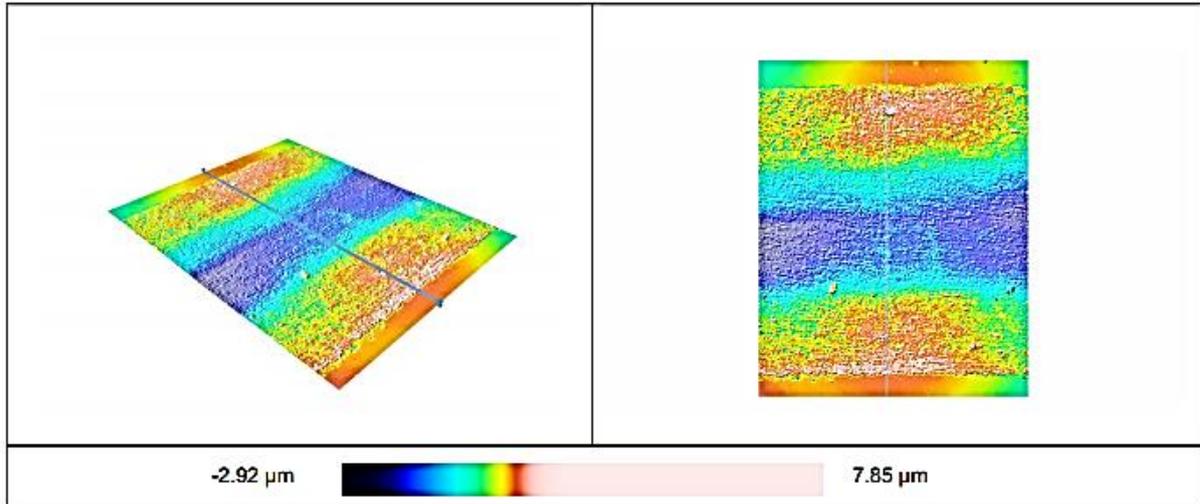
**Profile**



**Volume**

	Peak	Hole
Volume ( $\mu\text{m}^3$ )	125826	590685
Area ( $\text{mm}^2$ )	284828	484292
Max h/d ( $\mu\text{m}$ )	3.34916	3.81108

Anexo 6. Acero 1.2379 No Tratado. R8. Zona 3



Filename: NTF01\_R8\_zona3.plux

Acquisition author: senso5

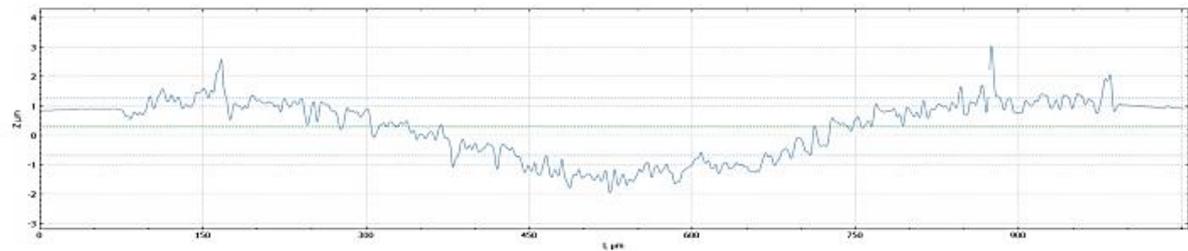
Analysis author:

Company name: Sensofar S.L.

Date: 2020-07-08 16:03:50

Analysis Software Version: 1.5.0.0

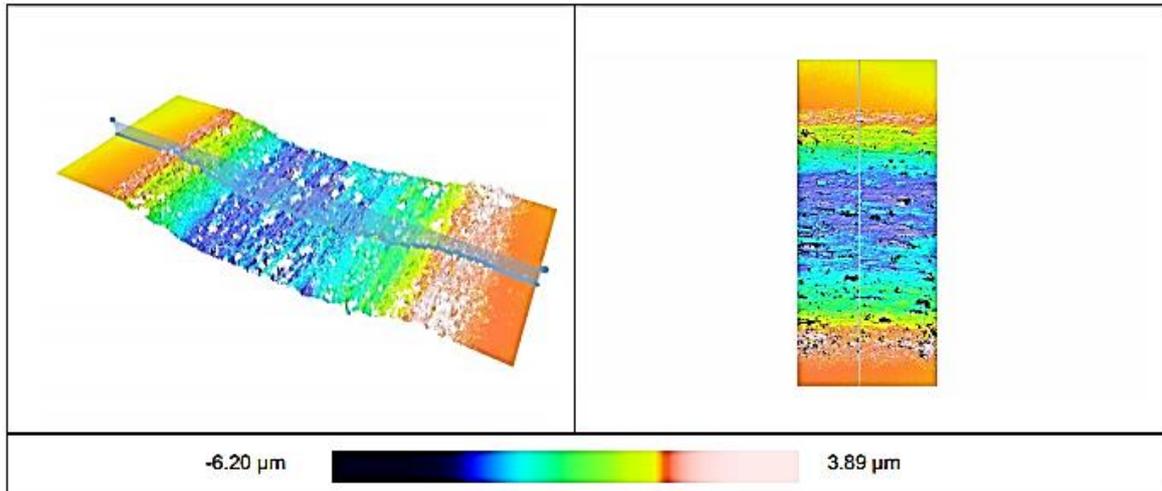
**Profile**



**Volume**

	Peak	Hole
Volume ( $\mu\text{m}^3$ )	77581.4	673624
Area ( $\text{mm}^2$ )	236277	541896
Max h/d ( $\mu\text{m}$ )	7.16068	3.61559

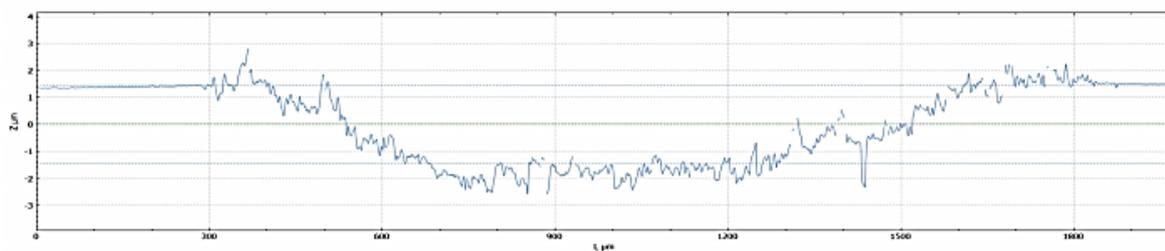
Anexo 7. Acero 1.2379 No Tratado. R10. Zona 1



Filename: NTF01\_R10\_zona1.plux  
 Acquisition author: senso5  
 Analysis author:

Company name: Sensofar S.L.  
 Date: 2020-07-08 16:04:45  
 Analysis Software Version: 1.5.0.0

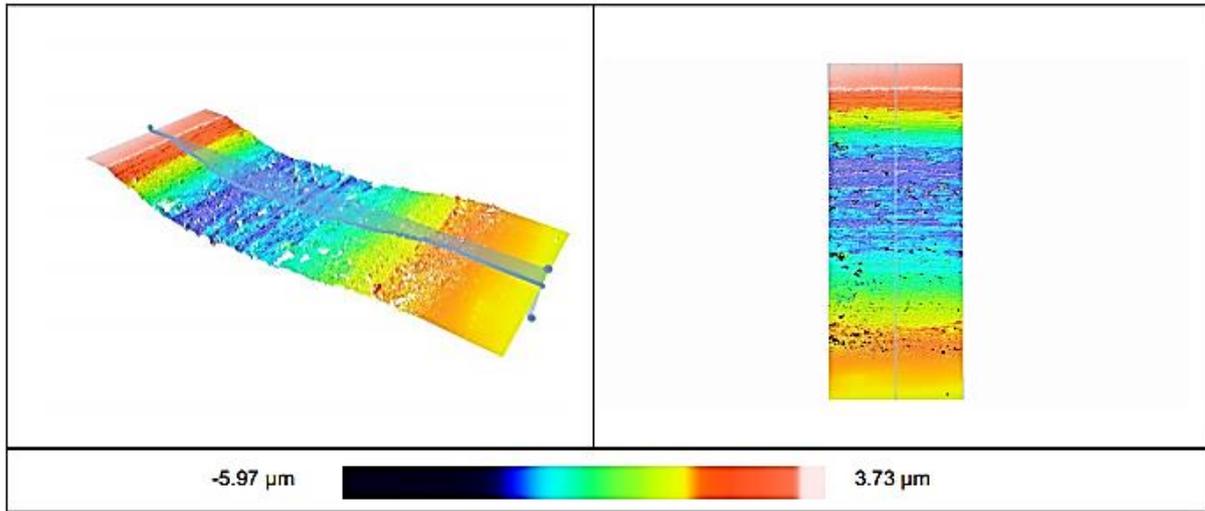
**Profile**



**Volume**

	Peak	Hole
Volume (μm <sup>3</sup> )	23312.7	2.40438e+6
Area (mm <sup>2</sup> )	126841	1.01413e+6
Max h/d (μm)	1.70802	7.67549

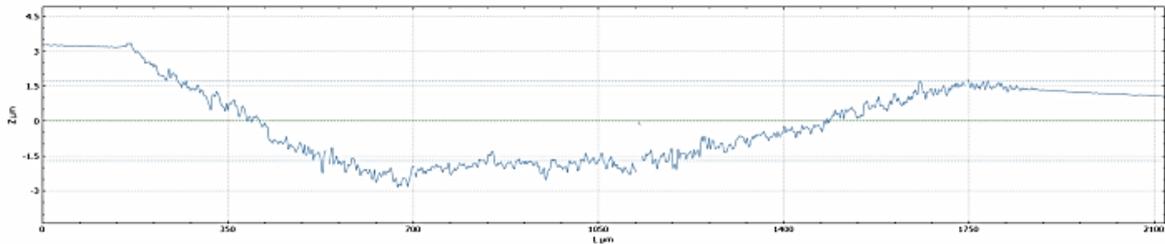
Anexo 8. Acero 1.2379 No Tratado. R10. Zona 2



**Filename:** NTF01\_R10\_zona2.plux  
**Acquisition author:** senso5  
**Analysis author:**

**Company name:** Sensofar S.L.  
**Date:** 2020-07-08 16:06:55  
**Analysis Software Version:** 1.5.0.0

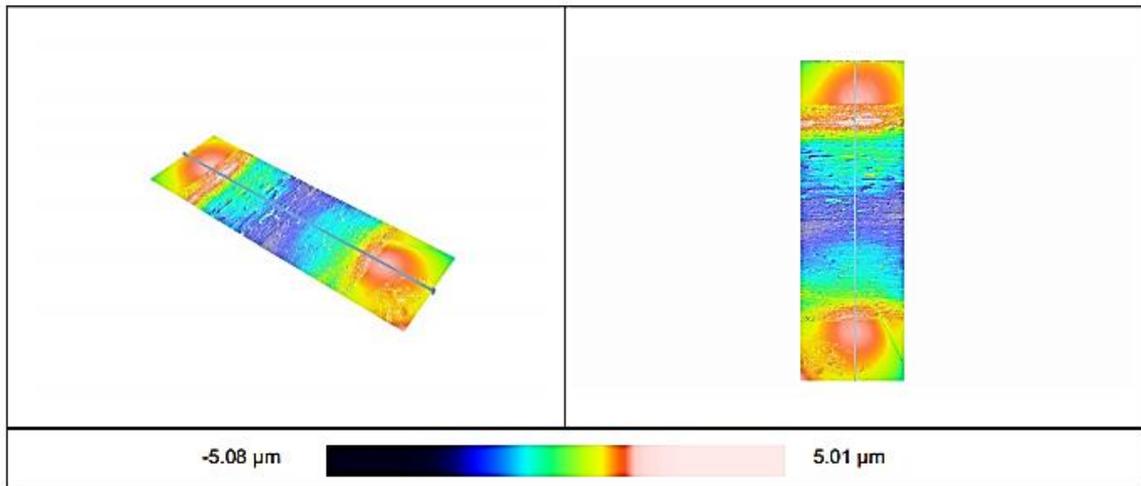
**Profile**



**Volume**

	Peak	Hole
Volume (μm <sup>3</sup> )	5252.29	3.84057e+6
Area (mm <sup>2</sup> )	46770.6	1.28532e+6
Max h/d (μm)	1.886	8.47024

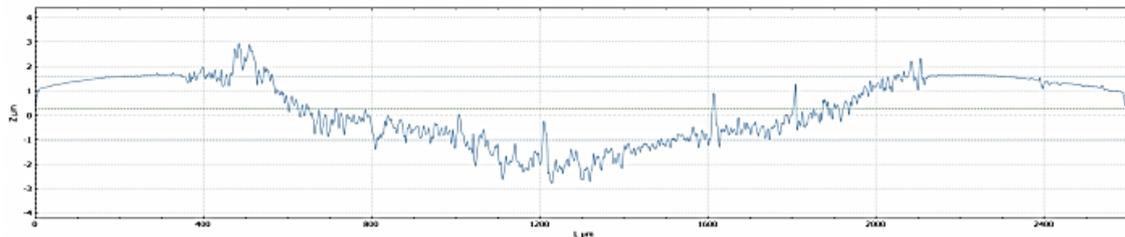
Anexo 9. Acero 1.2379 No Tratado. R10. Zona 3



**Filename:** NTF01\_R10\_zona3.plux  
**Acquisition author:** senso5  
**Analysis author:**

**Company name:** Sensofar S.L.  
**Date:** 2020-07-08 16:09:01  
**Analysis Software Version:** 1.5.0.0

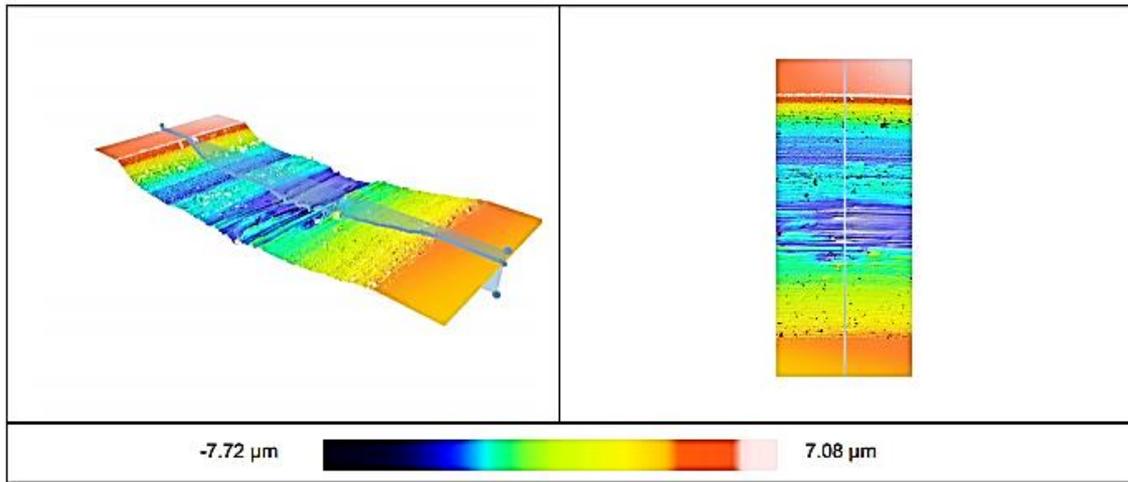
**Profile**



**Volume**

	Peak	Hole
Volume (μm <sup>3</sup> )	89260.7	2.5614e+6
Area (mm <sup>2</sup> )	234242	1.29789e+6
Max h/d (μm)	3.88302	6.18352

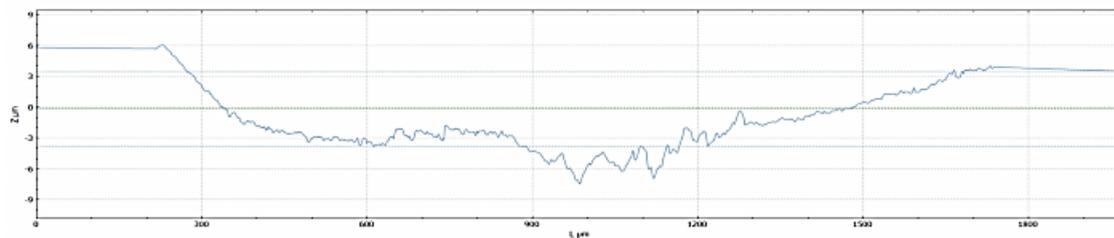
Anexo 10. Acero 1.2379 No Tratado. R12. Zona 1



Filename: NTF01\_R12\_zona1.plux  
 Acquisition author: senso5  
 Analysis author:

Company name: Sensofar S.L.  
 Date: 2020-07-08 16:10:40  
 Analysis Software Version: 1.5.0.0

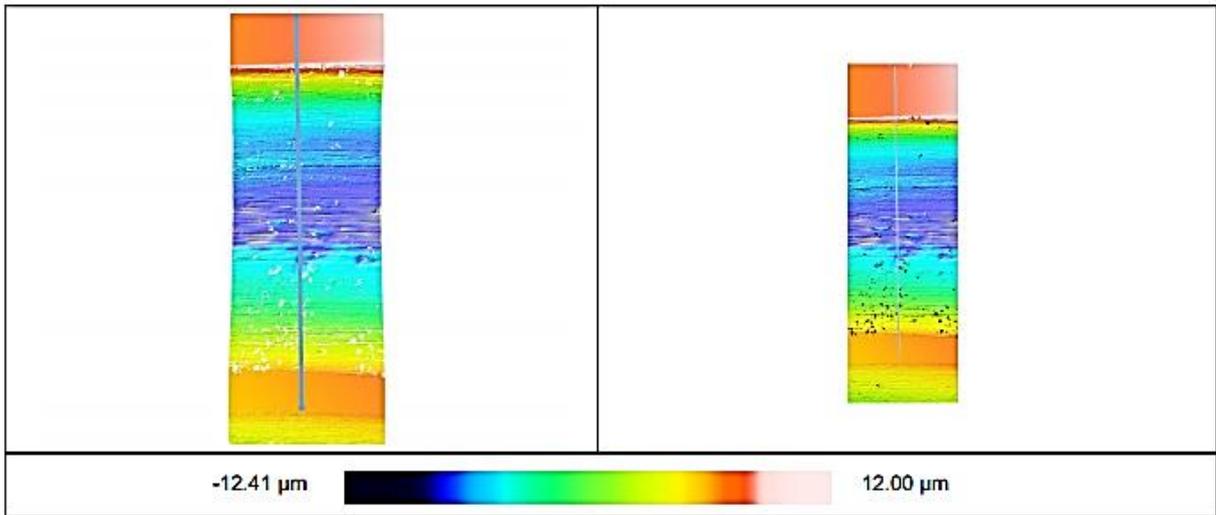
**Profile**



**Volume**

	Peak	Hole
Volume (μm <sup>3</sup> )	11176.6	7.6992e+6
Area (mm <sup>2</sup> )	74844.8	1.23588e+6
Max h/d (μm)	1.98868	12.3941

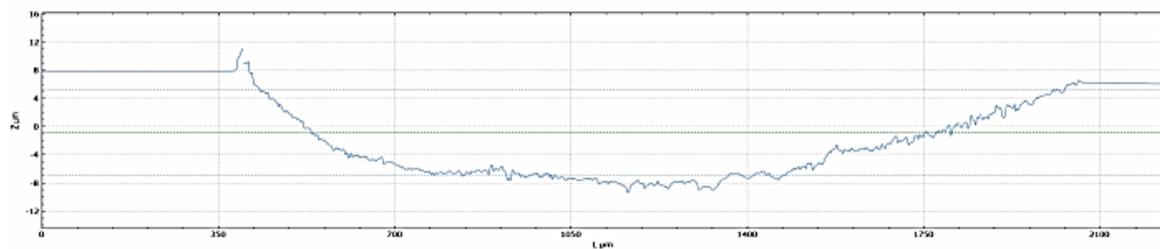
Anexo 11. Acero 1.2379 No Tratado. R12. Zona 2



**Filename:** NTF01\_R12\_zona2.plux  
**Acquisition author:** senso5  
**Analysis author:**

**Company name:** Sensofar S.L.  
**Date:** 2020-07-08 16:14:44  
**Analysis Software Version:** 1.5.0.0

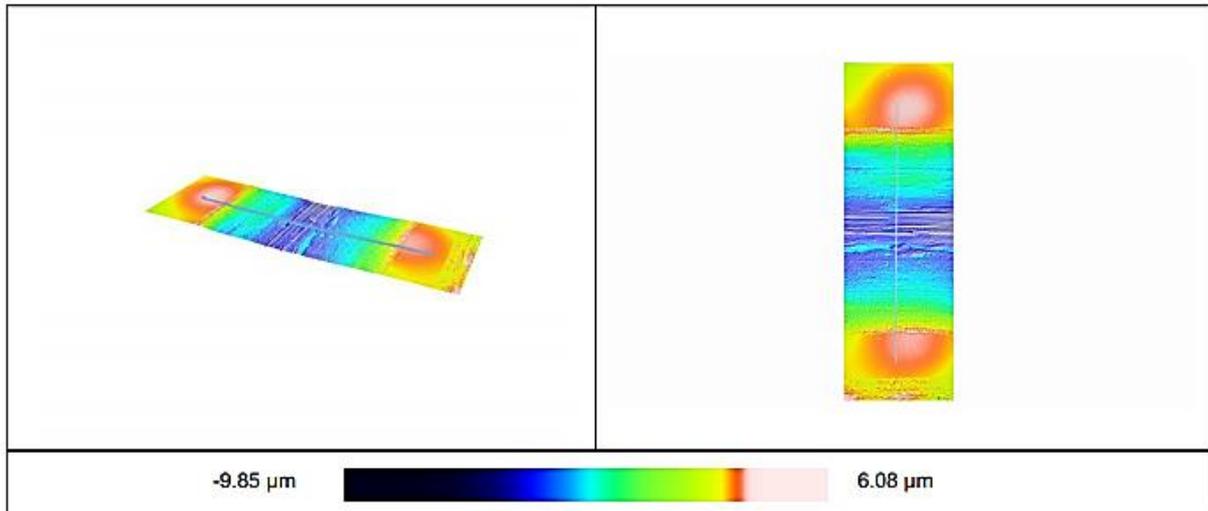
**Profile**



**Volume**

	Peak	Hole
Volume (μm <sup>3</sup> )	115771	1.36603e+7
Area (mm <sup>2</sup> )	125163	1.33055e+6
Max h/d (μm)	4.28976	19.4015

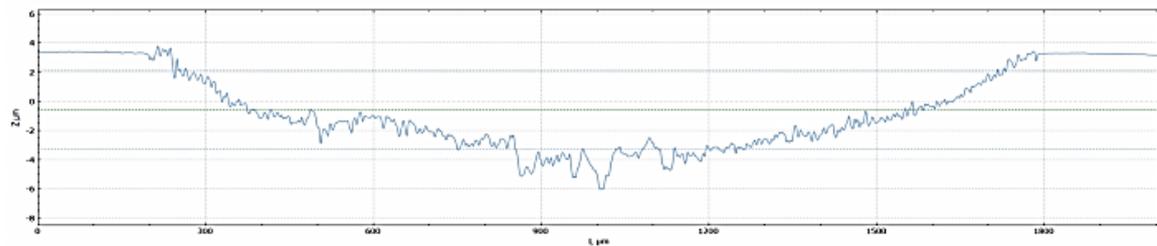
Anexo 12. Acero 1.2379 No Tratado. R12. Zona 3



**Filename:**NTF01\_R12\_zona3.plux  
**Acquisition author:**senso5  
**Analysis author:**

**Company name:**Sensofar S.L.  
**Date:**2020-07-08 16:17:07  
**Analysis Software Version:**1.5.0.0

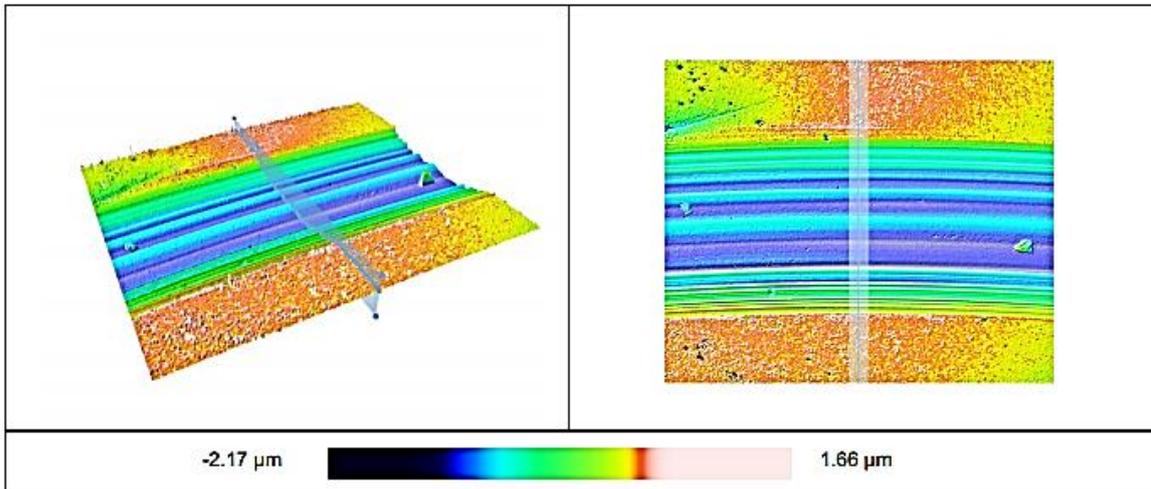
**Profile**



**Volume**

	Peak	Hole
Volume (μm <sup>3</sup> )	25618.4	6.27886e+6
Area (mm <sup>2</sup> )	76934.4	1.30256e+6
Max h/d (μm)	2.8014	12.7292

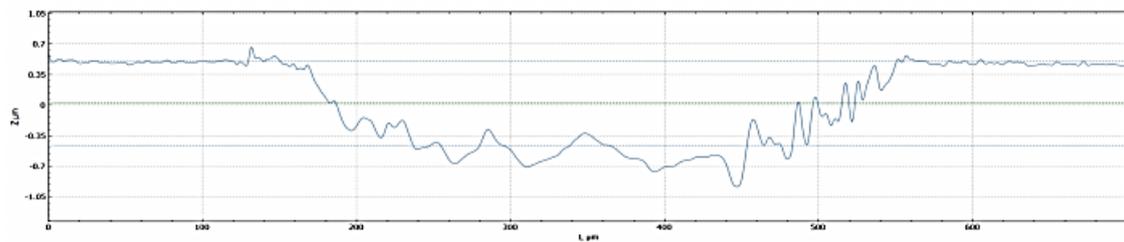
Anexo 13. Acero 1,2379 con tratamiento PVD. R6. Zona 1



Filename: RF01\_R6\_zona1.plux  
 Acquisition author: senso5  
 Analysis author:

Company name: Sensofar S.L.  
 Date: 2020-07-08 12:12:58  
 Analysis Software Version: 1.5.0.0

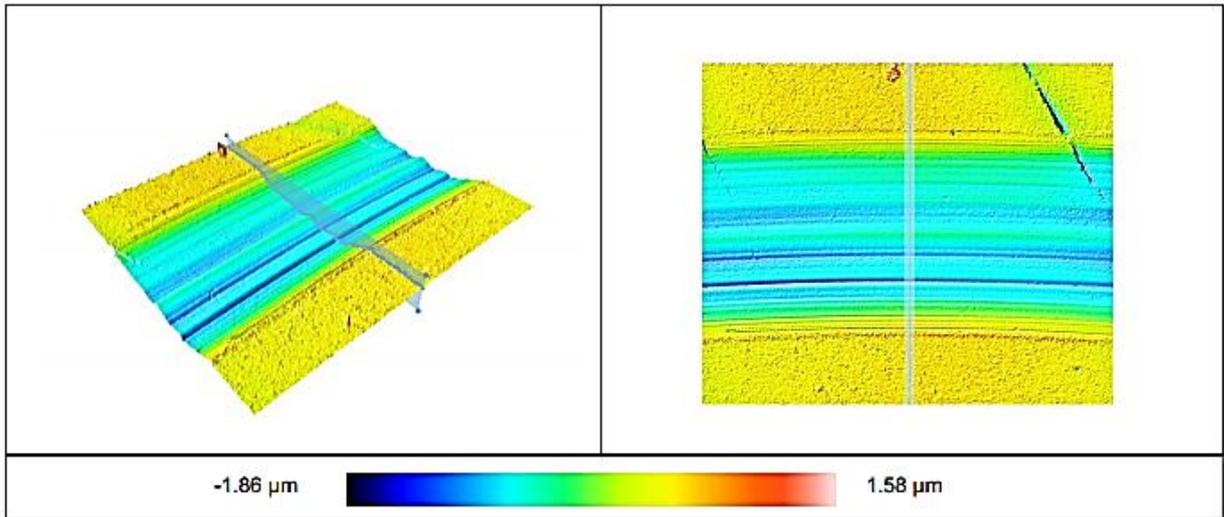
**Profile**



**Volume**

	Peak	Hole
Volume (μm <sup>3</sup> )	886.836	253380
Area (mm <sup>2</sup> )	11569.7	322405
Max h/d (μm)	0.622854	2.57746

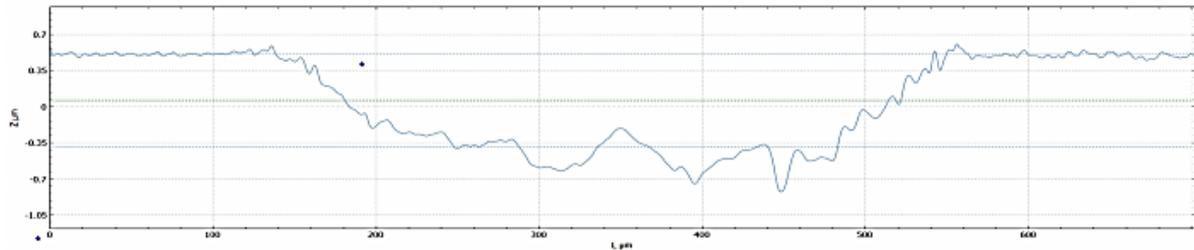
Anexo 14. Acero 1,2379 con tratamiento PVD. R6. Zona 2



Filename:RF01\_R6\_zona2.plux  
Acquisition author:senso5  
Analysis author:

Company name:Sensofar S.L.  
Date:2020-07-08 13:17:06  
Analysis Software Version: 1.5.0.0

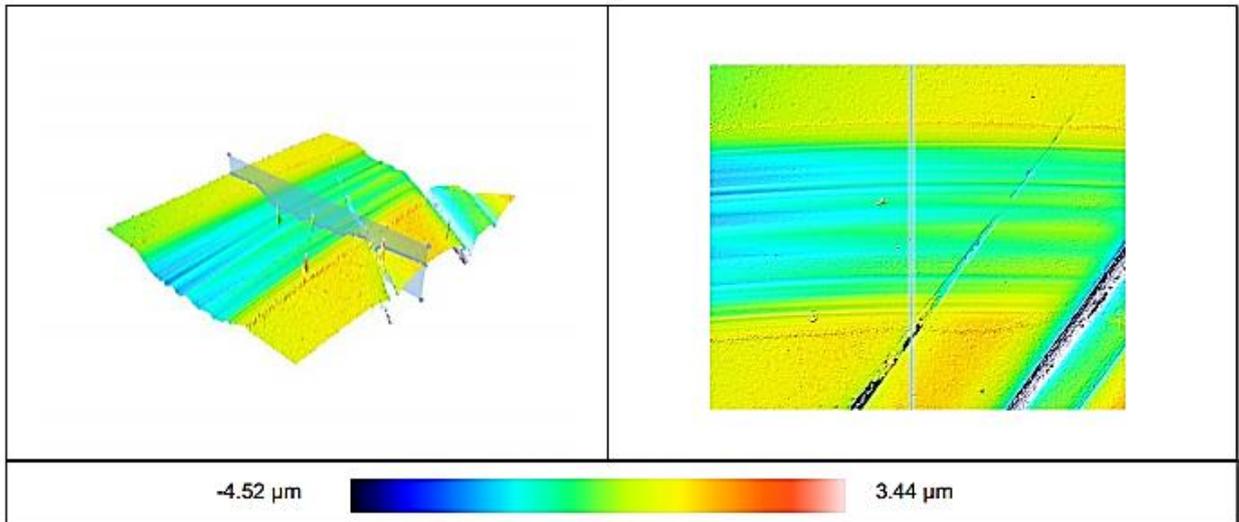
**Profile**



**Volume**

	Peak	Hole
Volume (μm <sup>3</sup> )	2233.63	255702
Area (mm <sup>2</sup> )	28561.2	346959
Max h/d (μm)	0.43475	2.26049

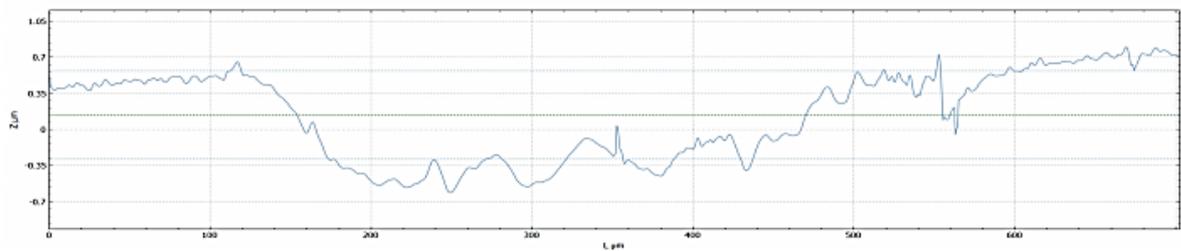
Anexo 15. Acero 1,2379 con tratamiento PVD. R6. Zona 3



**Filename:** RF01\_R6\_zona3.plux  
**Acquisition author:** senso5  
**Analysis author:**

**Company name:** Sensofar S.L.  
**Date:** 2020-07-08 13:34:53  
**Analysis Software Version:** 1.5.0.0

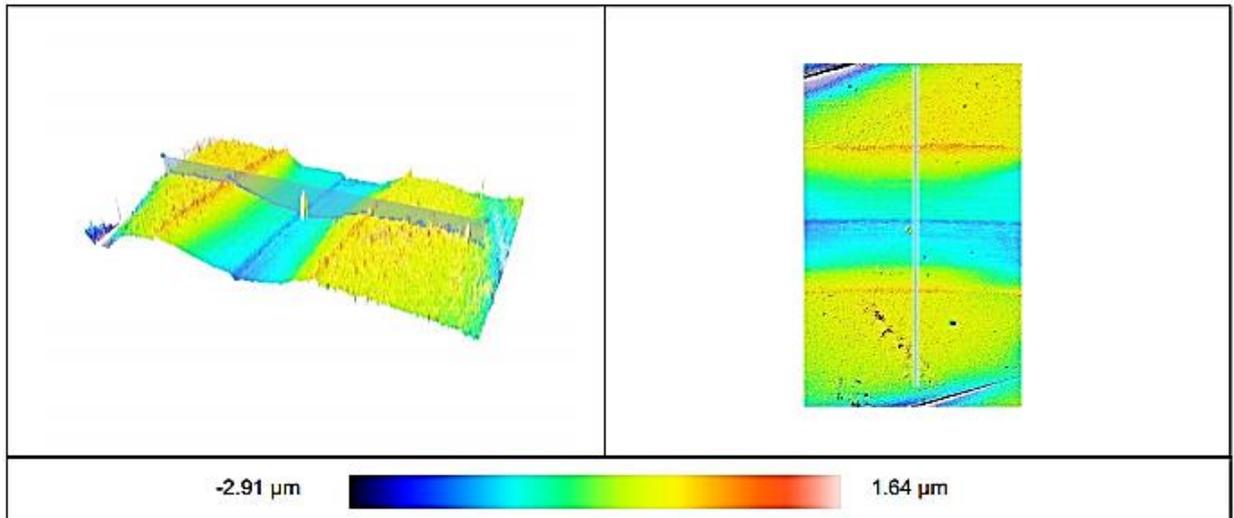
**Profile**



**Volume**

	Peak	Hole
Volume (μm <sup>3</sup> )	15766.2	216004
Area (mm <sup>2</sup> )	61597.8	313762
Max h/d (μm)	3.05334	4.66969

Anexo 16. Acero 1,2379 con tratamiento PVD. R8. Zona 1



Filename:RF01\_R8\_zona1.plux

Acquisition author:senso5

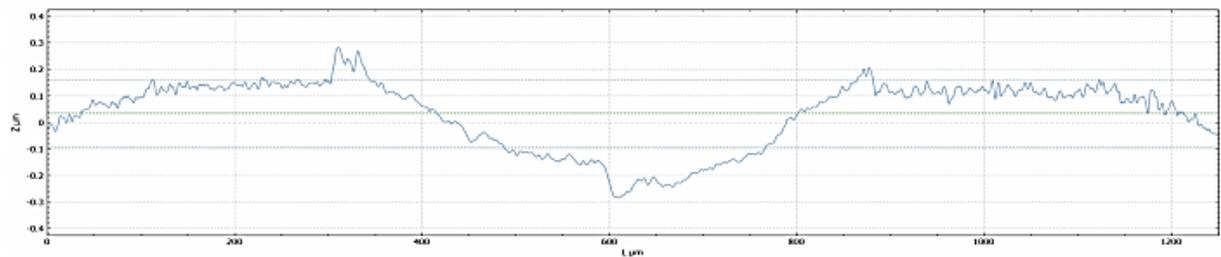
Analysis author:

Company name:Sensofar S.L.

Date:2020-07-08 12:16:48

Analysis Software Version: 1.5.0.0

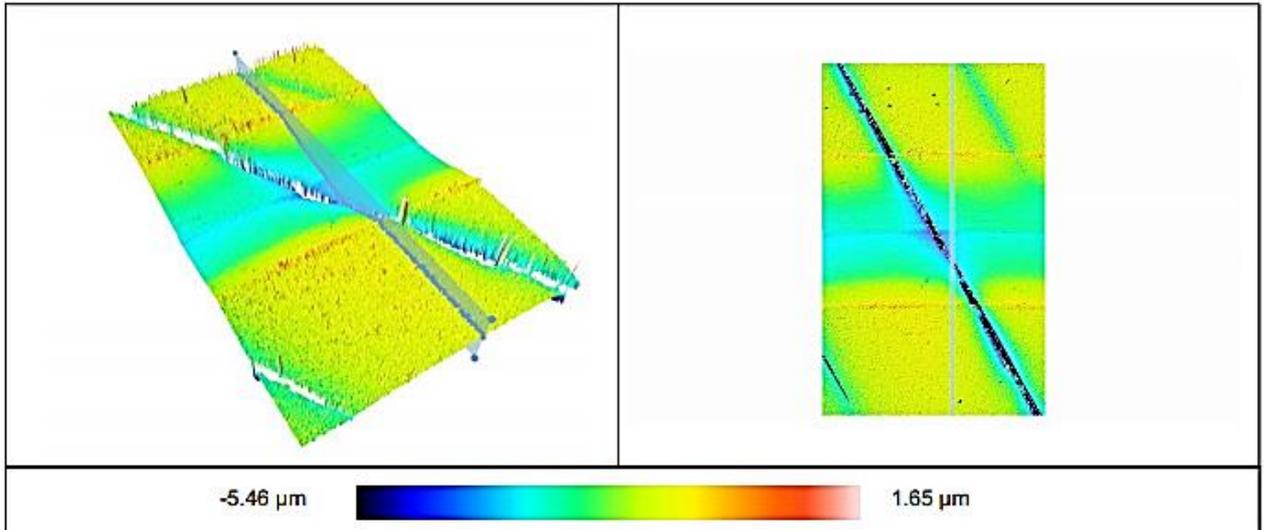
**Profile**



**Volume**

	Peak	Hole
Volume (μm <sup>3</sup> )	14271.8	64429.3
Area (mm <sup>2</sup> )	146750	352702
Max h/d (μm)	0.59512	0.902156

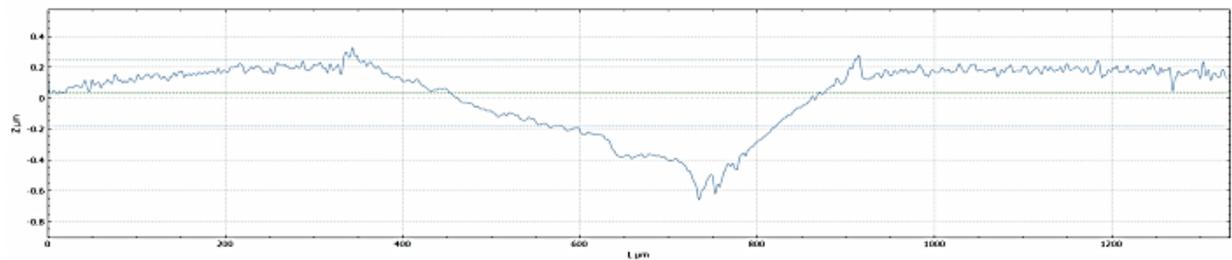
Anexo 17. Acero 1,2379 con tratamiento PVD. R8. Zona 2



Filename:RF01\_R8\_zona2.plux  
 Acquisition author:senso5  
 Analysis author:

Company name:Sensofar S.L.  
 Date:2020-07-08 13:25:01  
 Analysis Software Version:1.5.0.0

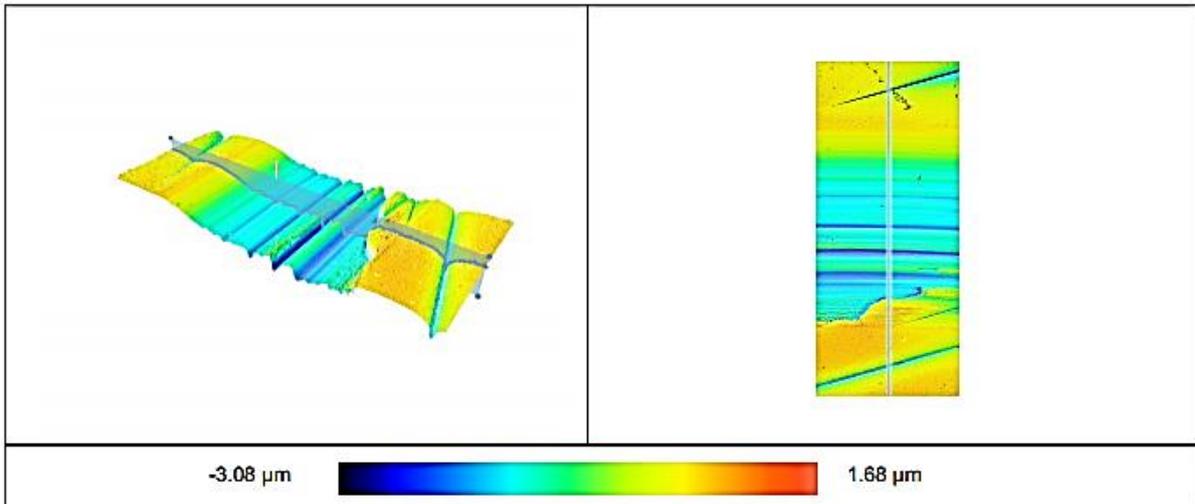
**Profile**



**Volume**

	Peak	Hole
Volume (µm <sup>3</sup> )	12824	89477.6
Area (mm <sup>2</sup> )	128621	388435
Max h/d (µm)	1.03062	5.52658

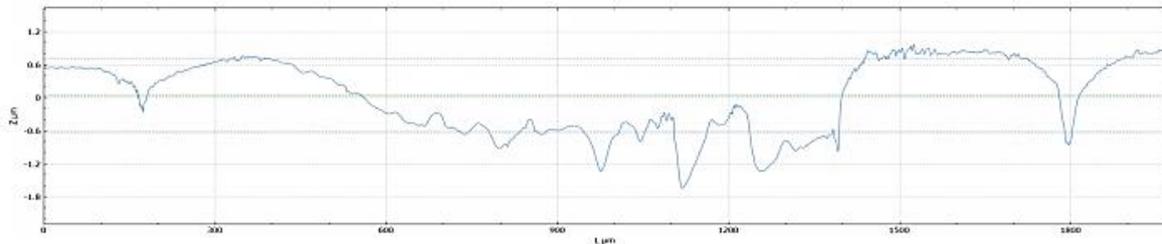
Anexo 18. Acero 1,2379 con tratamiento PVD. R10. Zona 1



Filename:RF01\_R10\_zona1.plux  
 Acquisition author:senso5  
 Analysis author:

Company name:Sensofar S.L.  
 Date:2020-07-08 12:21:09  
 Analysis Software Version: 1.5.0.0

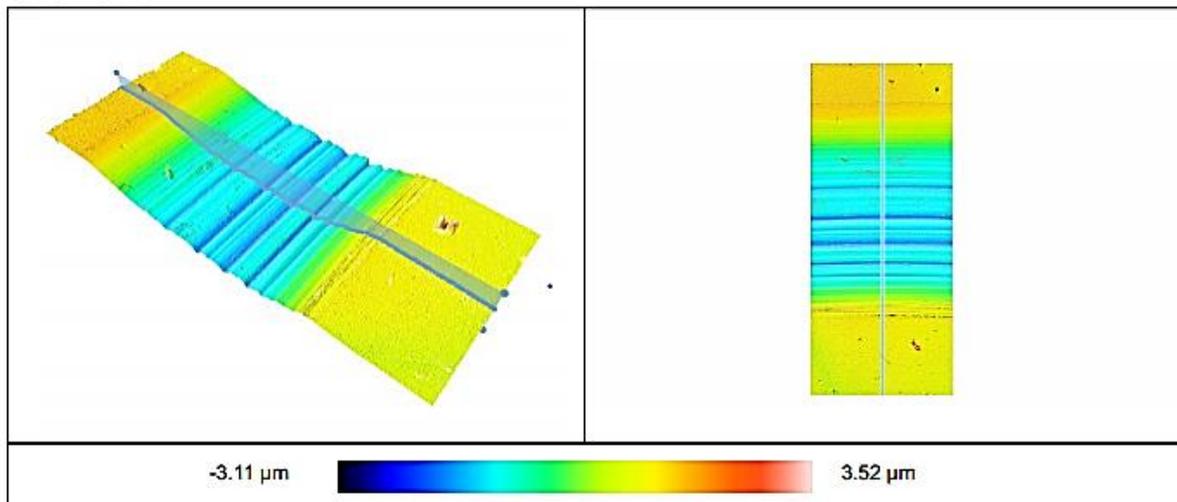
**Profile**



**Volume**

	Peak	Hole
Volume (μm <sup>3</sup> )	22732.3	893241
Area (mm <sup>2</sup> )	129138	873257
Max h/d (μm)	1.23365	2.33205

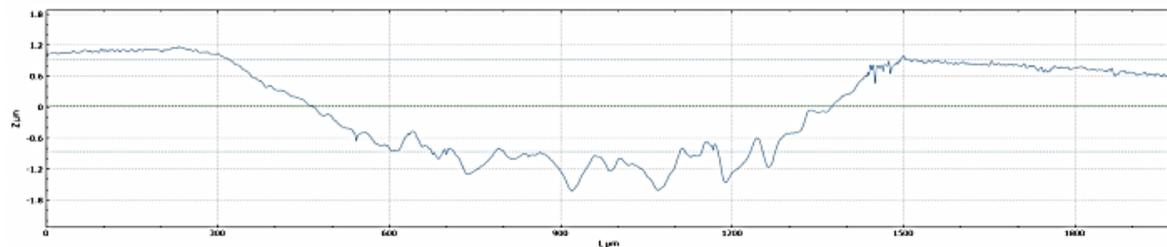
Anexo 19. Acero 1,2379 con tratamiento PVD. R10. Zona 2



Filename: RF01\_R10\_zona2.plux  
 Acquisition author: senso5  
 Analysis author:

Company name: Sensofar S.L.  
 Date: 2020-07-08 13:28:08  
 Analysis Software Version: 1.5.0.0

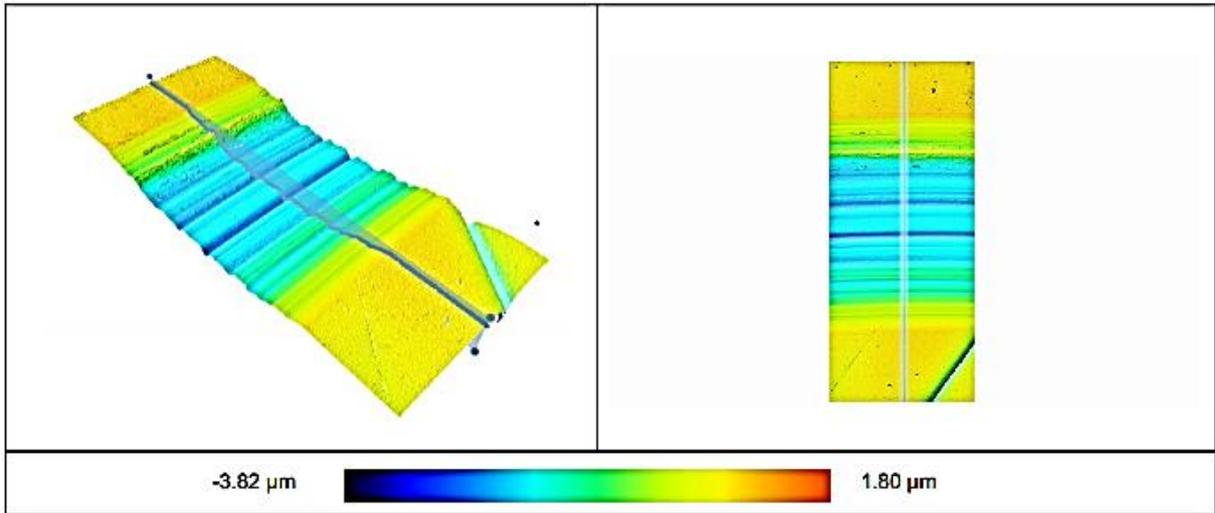
**Profile**



**Volume**

	Peak	Hole
Volume (μm <sup>3</sup> )	9536.81	1.44524e+6
Area (mm <sup>2</sup> )	105484	994045
Max h/d (μm)	0.670423	2.77394

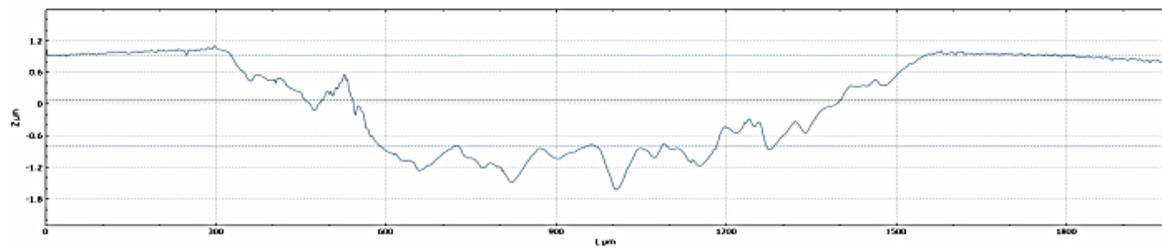
Anexo 20. Acero 1,2379 con tratamiento PVD. R10. Zona 3



**Filename:** RF01\_R10\_zona3.plux  
**Acquisition author:** senso5  
**Analysis author:**

**Company name:** Sensofar S.L.  
**Date:** 2020-07-08 13:32:03  
**Analysis Software Version:** 1.5.0.0

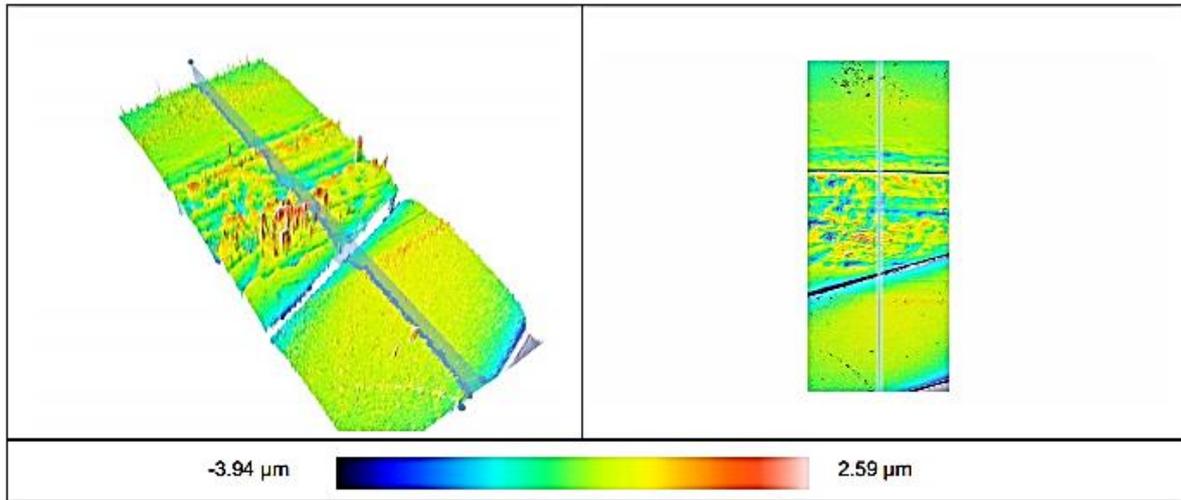
**Profile**



**Volume**

	Peak	Hole
Volume (μm <sup>3</sup> )	13705.9	1.34182e+6
Area (mm <sup>2</sup> )	87834.3	1.0198e+6
Max h/d (μm)	0.461708	2.7304

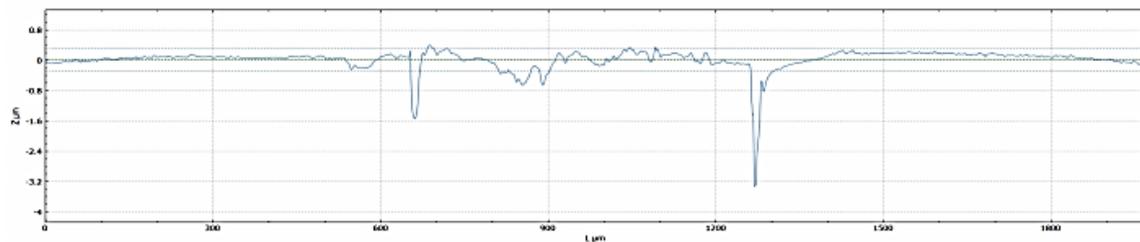
Anexo 21. Acero 1,2379 con tratamiento PVD. R12. Zona 1



Filename:RF01\_R12\_zona1.plux  
 Acquisition author:senso5  
 Analysis author:

Company name:Sensofar S.L.  
 Date:2020-07-08 12:20:10  
 Analysis Software Version:1.5.0.0

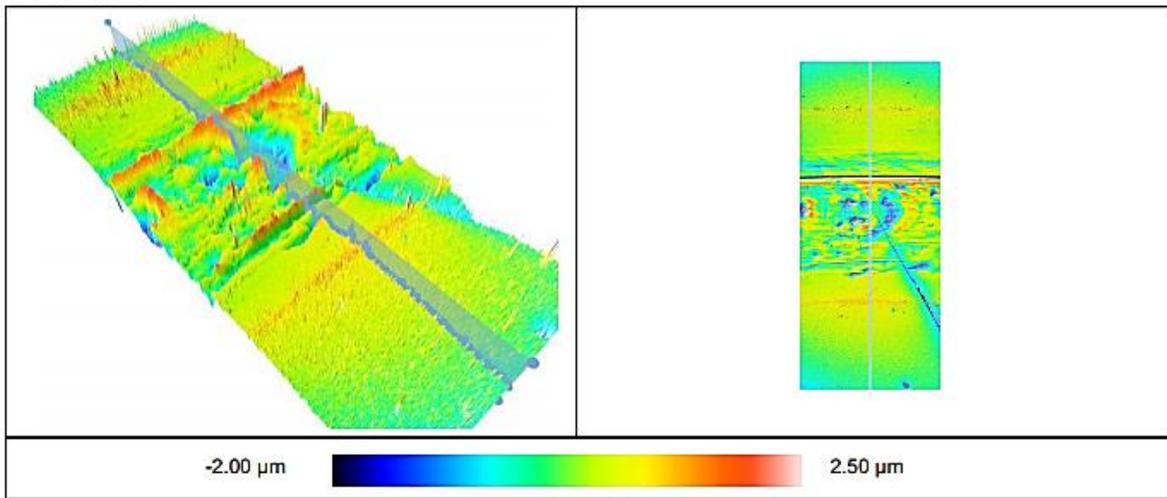
**Profile**



**Volume**

	Peak	Hole
Volume (μm <sup>3</sup> )	44189.9	101389
Area (mm <sup>2</sup> )	333338	402269
Max h/d (μm)	2.55011	3.98442

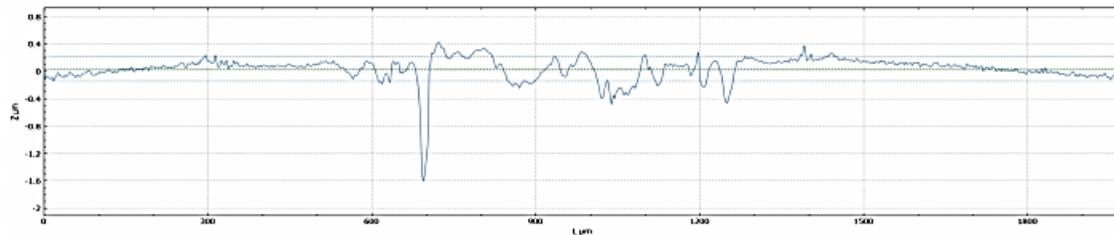
Anexo 22. Acero 1,2379 con tratamiento PVD. R12. Zona 2



Filename: RF01\_R12\_zona2.plux  
 Acquisition author: senso5  
 Analysis author:

Company name: Sensofar S.L.  
 Date: 2020-07-08 13:29:12  
 Analysis Software Version: 1.5.0.0

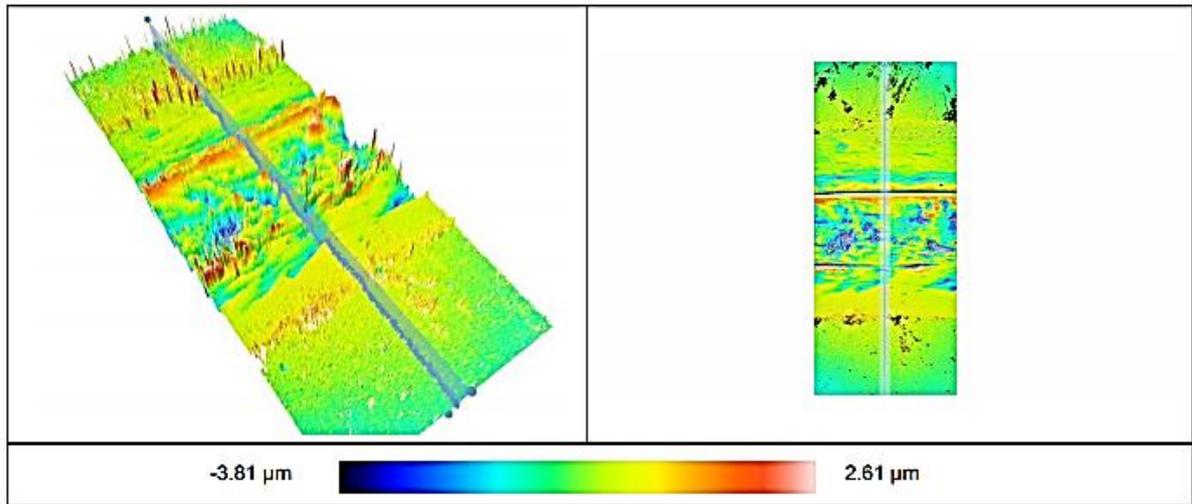
**Profile**



**Volume**

	Peak	Hole
Volume (μm <sup>3</sup> )	34375.8	73412.1
Area (mm <sup>2</sup> )	337486	366107
Max h/d (μm)	1.79365	2.03703

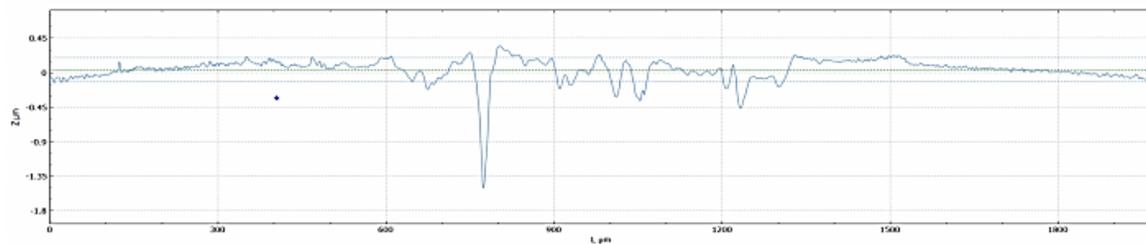
Anexo 23. Acero 1,2379 con tratamiento PVD. R12. Zona 3



Filename: RF01\_R12\_zona3.plux  
 Acquisition author: senso5  
 Analysis author:

Company name: Sensofar S.L.  
 Date: 2020-07-08 13:30:58  
 Analysis Software Version: 1.5.0.0

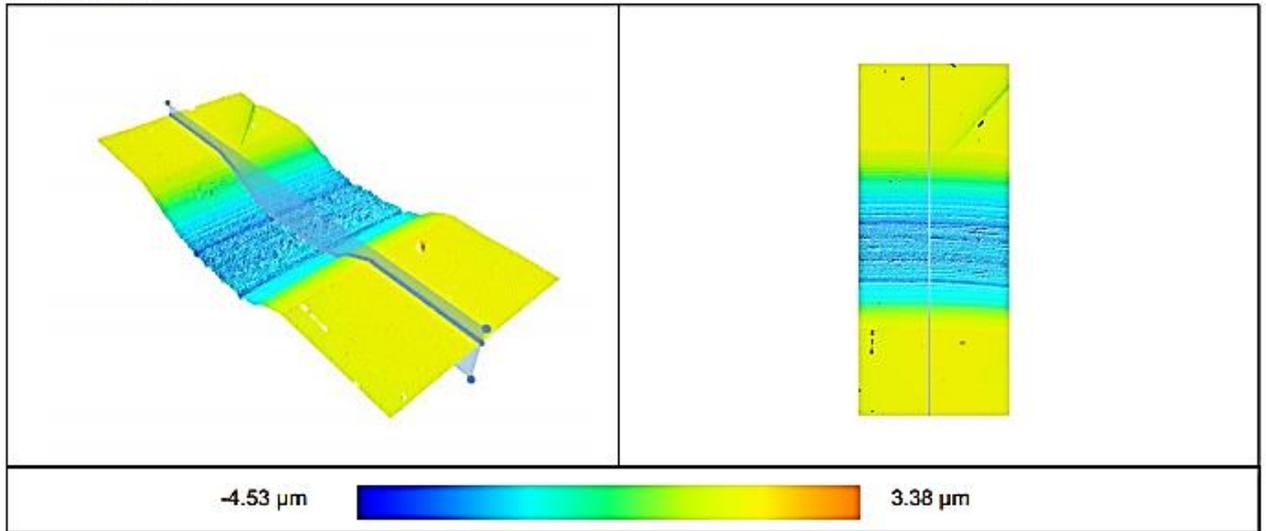
**Profile**



**Volume**

	Peak	Hole
Volume (μm <sup>3</sup> )	41664.1	91611.5
Area (mm <sup>2</sup> )	384977	387713
Max h/d (μm)	2.25823	1.97616

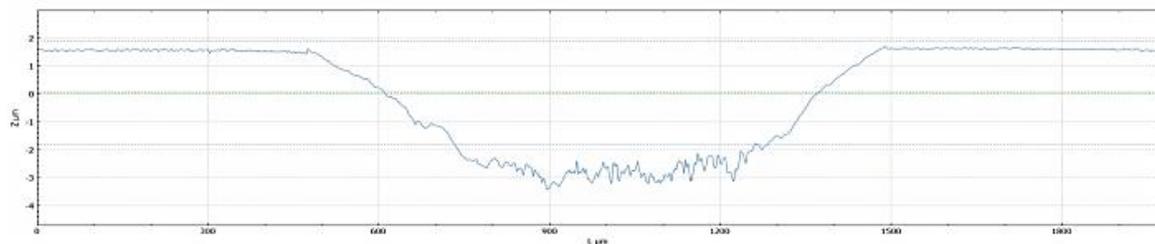
Anexo 24. Acero 1,2379 con tratamiento PVD. R6. Zona 1



Filename:RF02\_R6\_zona1.plux  
 Acquisition author:senso5  
 Analysis author:

Company name:Sensofar S.L.  
 Date:2020-07-08 13:39:38  
 Analysis Software Version: 1.5.0.0

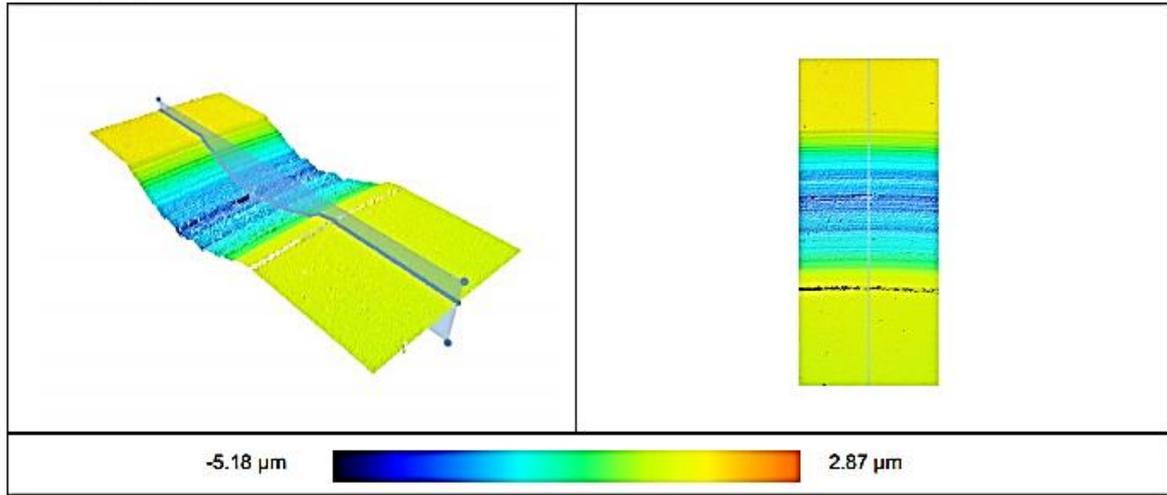
**Profile**



**Volume**

	Peak	Hole
Volume (μm <sup>3</sup> )	4973.61	2.48483e+6
Area (mm <sup>2</sup> )	62541.9	854048
Max h/d (μm)	0.426893	6.06027

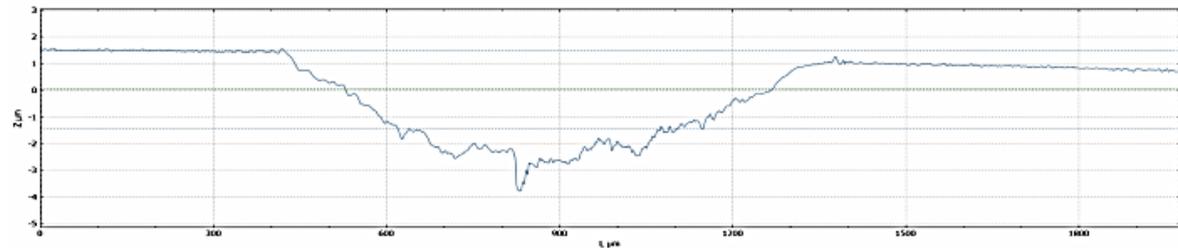
Anexo 25. Acero 1,2379 con tratamiento PVD. R6 Zona 2



Filename: RF02\_R6\_zona2.plux  
 Acquisition author: senso5  
 Analysis author:

Company name: Sensofar S.L.  
 Date: 2020-07-08 14:21:33  
 Analysis Software Version: 1.5.0.0

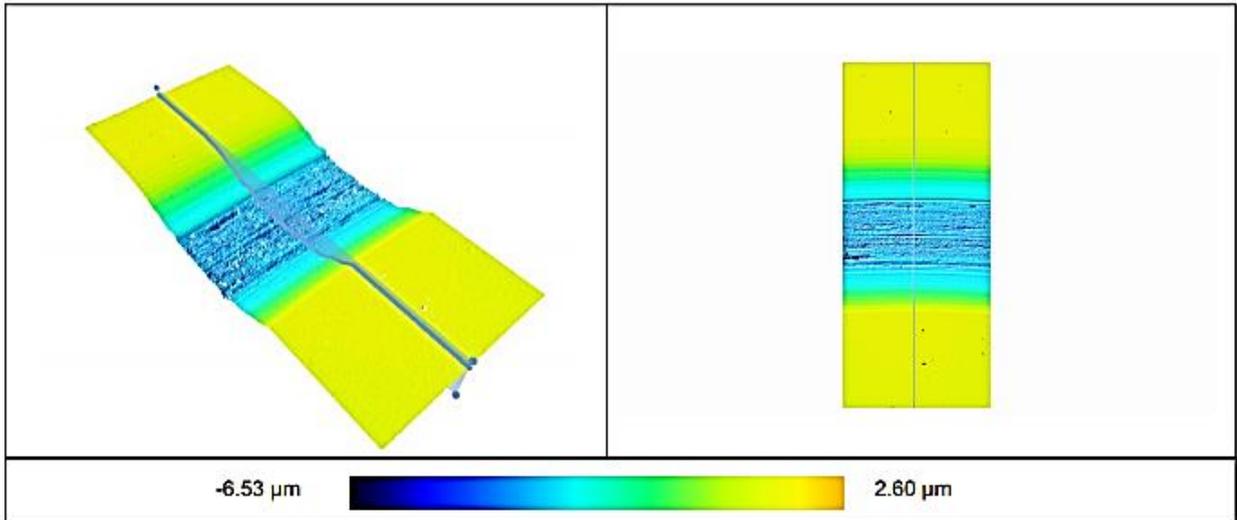
**Profile**



**Volume**

	Peak	Hole
Volume (μm <sup>3</sup> )	1527.95	1.87027e+6
Area (mm <sup>2</sup> )	25752.7	772750
Max h/d (μm)	0.285743	6.37115

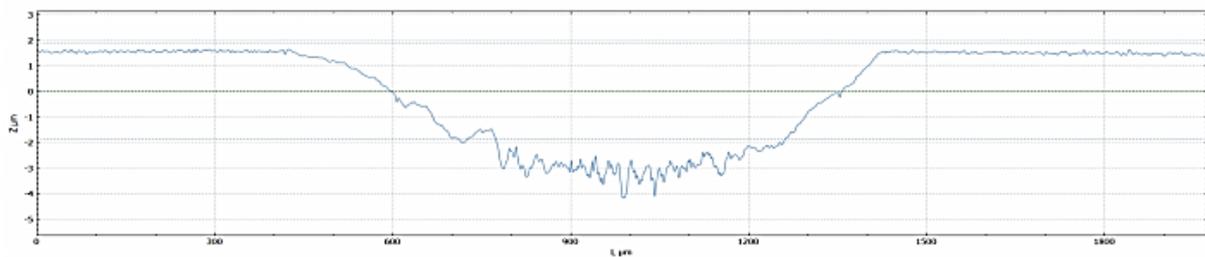
Anexo 26. Probeta RF02. R6 Zona 3



**Filename:** RF02\_R6\_zona3.plux  
**Acquisition author:** senso5  
**Analysis author:**

**Company name:** Sensofar S.L.  
**Date:** 2020-07-08 14:23:32  
**Analysis Software Version:** 1.5.0.0

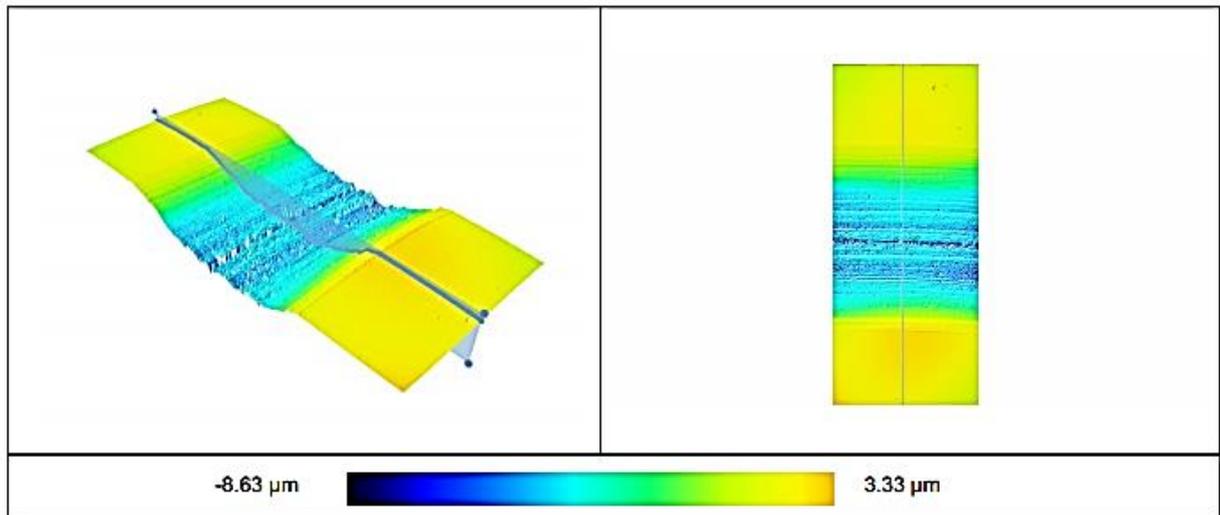
**Profile**



**Volume**

	Peak	Hole
Volume (μm <sup>3</sup> )	2729.8	2.48416e+6
Area (mm <sup>2</sup> )	49492.5	844129
Max h/d (μm)	0.359104	8.02375

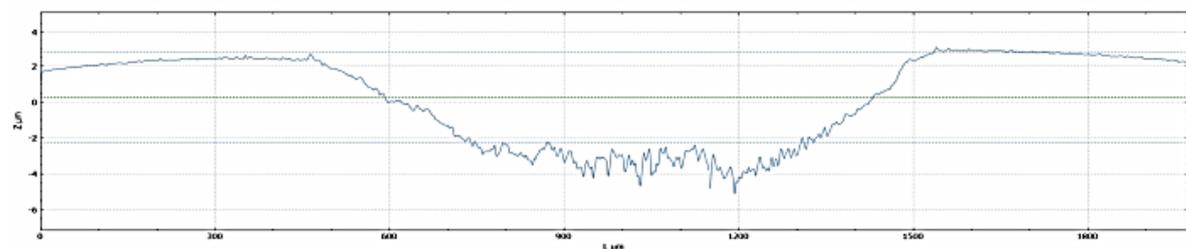
Anexo 27. Acero 1,2379 con tratamiento PVD. R8 Zona 1



Filename: RF02\_R8\_zona1.plux  
 Acquisition author: senso5  
 Analysis author:

Company name: Sensofar S.L.  
 Date: 2020-07-08 14:24:40  
 Analysis Software Version: 1.5.0.0

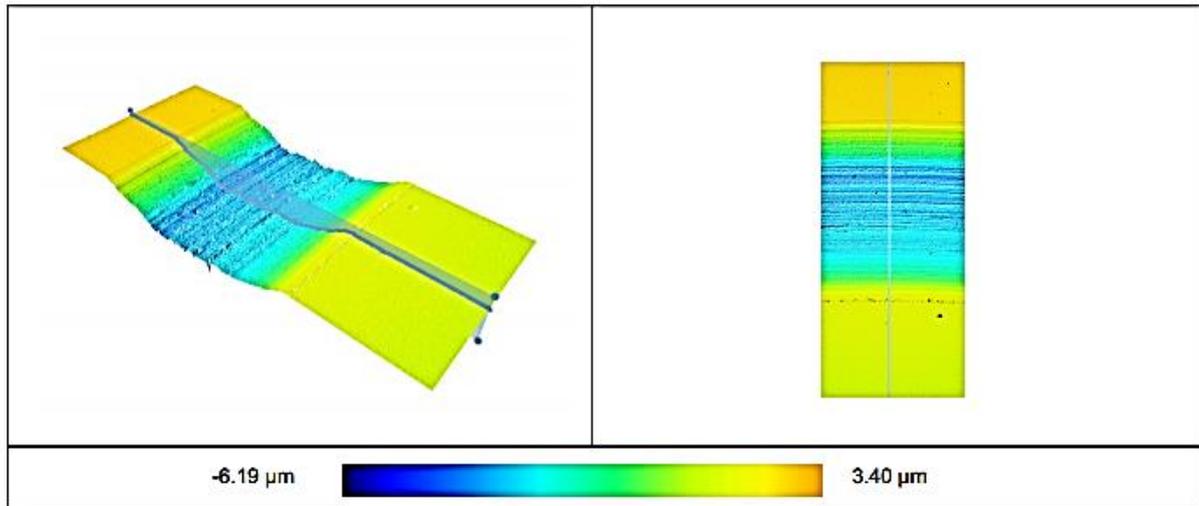
**Profile**



**Volume**

	Peak	Hole
Volume (μm <sup>3</sup> )	21052.6	3.62203e+6
Area (mm <sup>2</sup> )	76035.1	884103
Max h/d (μm)	0.918049	10.848

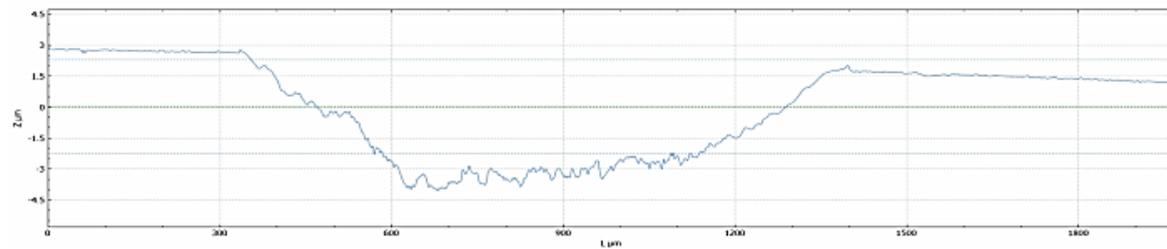
Anexo 28. Probeta RF02. R8 Zona 2



Filename:RF02\_R8\_zona2.plux  
 Acquisition author:senso5  
 Analysis author:

Company name:Sensofar S.L.  
 Date:2020-07-08 14:25:40  
 Analysis Software Version:1.5.0.0

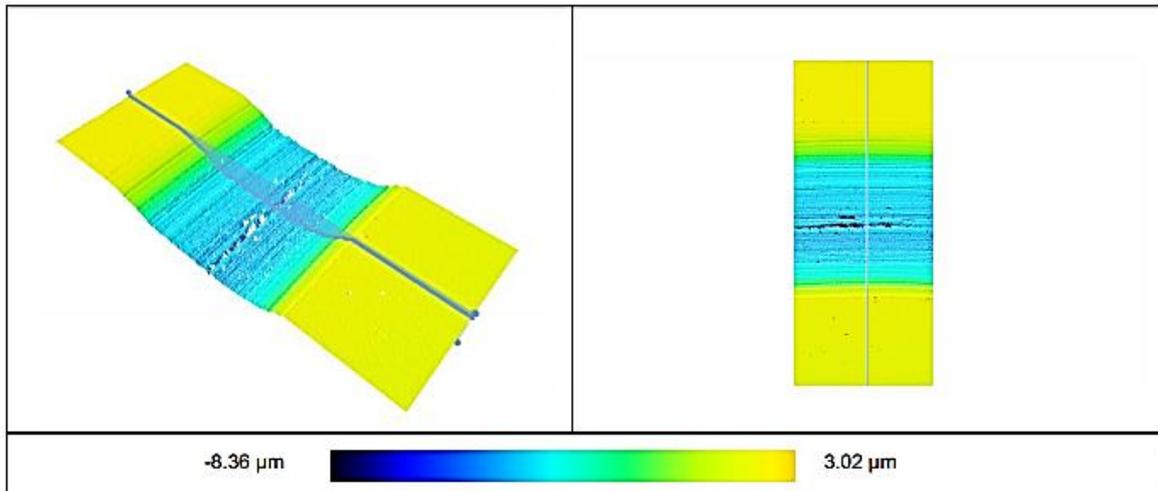
**Profile**



**Volume**

	Peak	Hole
Volume (µm <sup>3</sup> )	5494.31	3.32427e+6
Area (mm <sup>2</sup> )	57420	861352
Max h/d (µm)	0.587999	8.21438

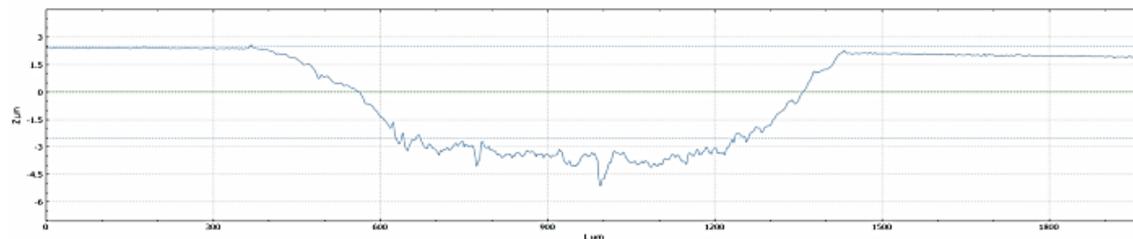
Anexo 29. Acero 1,2379 con tratamiento PVD. R8 Zona 3



**Filename:** RF02\_R8\_zona3.plux  
**Acquisition author:** senso5  
**Analysis author:**

**Company name:** Sensofar S.L.  
**Date:** 2020-07-08 14:26:33  
**Analysis Software Version:** 1.5.0.0

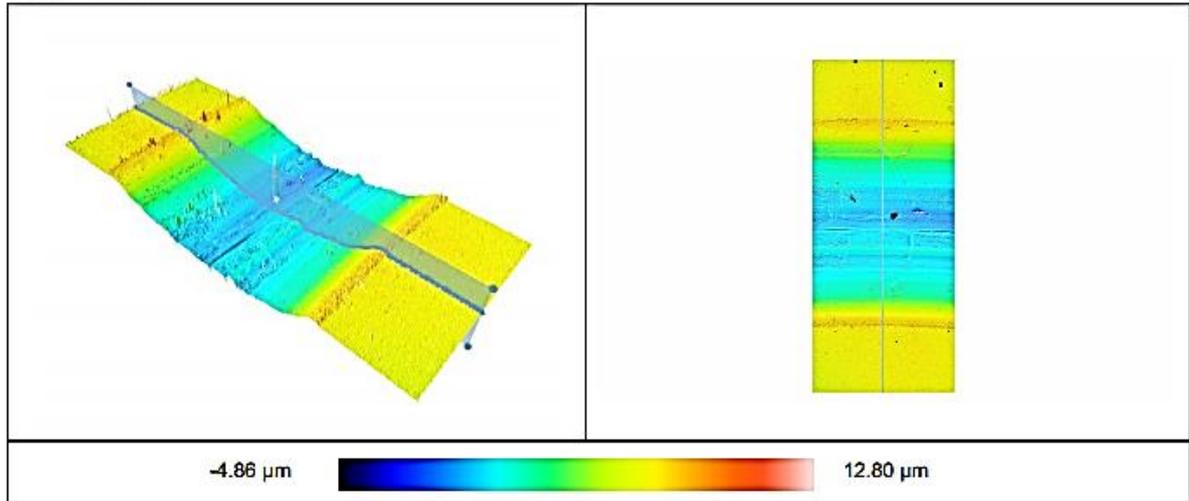
**Profile**



**Volume**

	Peak	Hole
Volume (μm <sup>3</sup> )	3603.49	3.56789e+6
Area (mm <sup>2</sup> )	48955	872969
Max h/d (μm)	0.972783	10.5118

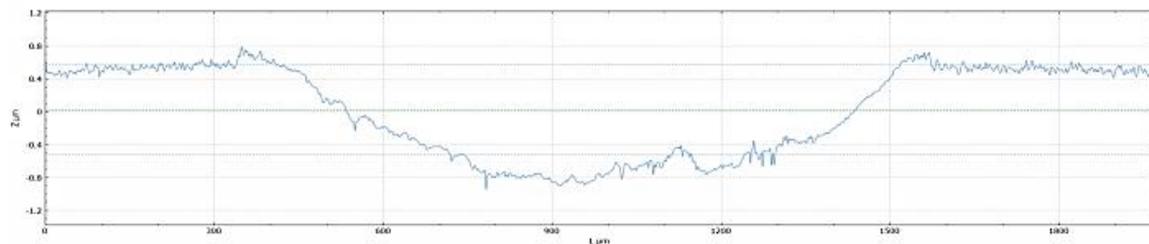
Anexo 30. Acero 1,2379 con tratamiento PVD. R10 Zona 1



**Filename:** RF02\_R10\_zona1.plux  
**Acquisition author:** senso5  
**Analysis author:**

**Company name:** Sensofar S.L.  
**Date:** 2020-07-08 14:27:38  
**Analysis Software Version:** 1.5.0.0

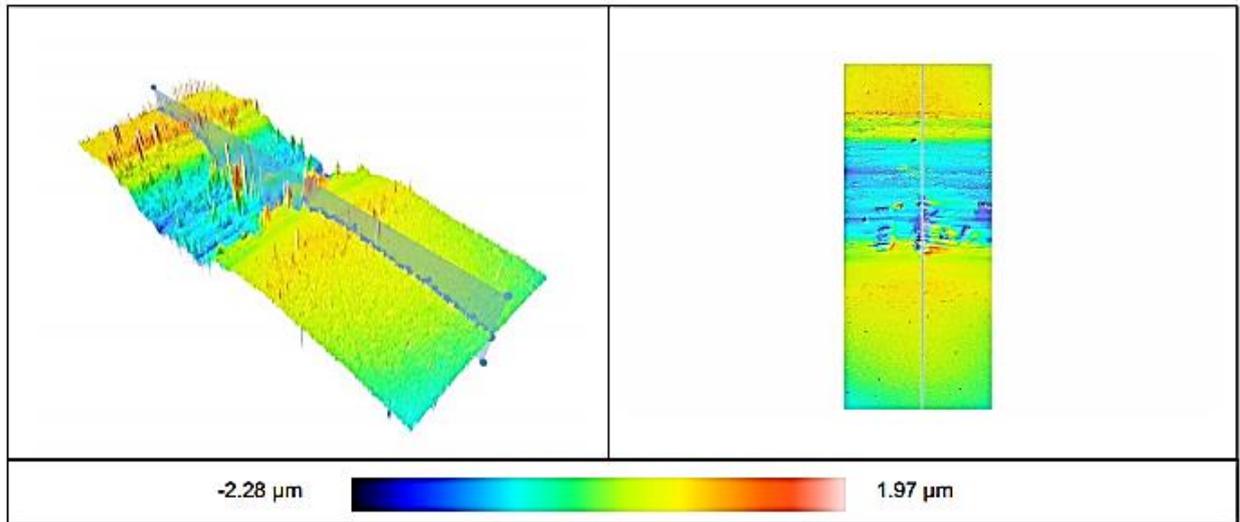
**Profile**



**Volume**

	Peak	Hole
Volume (μm <sup>3</sup> )	18664.8	820018
Area (mm <sup>2</sup> )	159489	907890
Max h/d (μm)	12.3126	2.23038

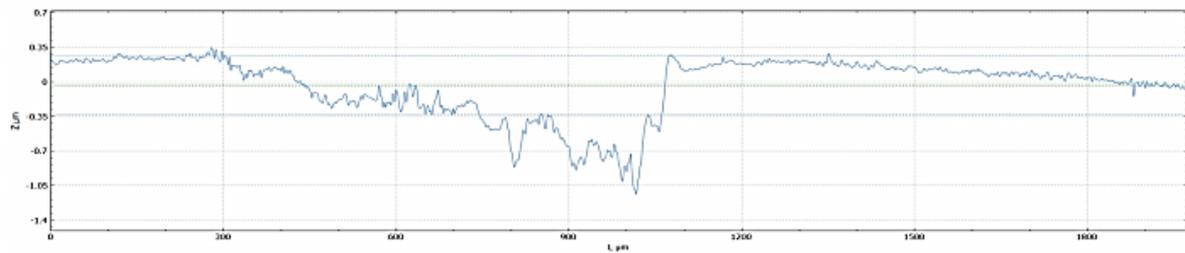
Anexo 31. Acero 1,2379 con tratamiento PVD. R10 Zona 2



**Filename:**RF02\_R10\_zona2.plux  
**Acquisition author:**senso5  
**Analysis author:**

**Company name:**Sensofar S.L.  
**Date:**2020-07-08 14:28:53  
**Analysis Software Version:** 1.5.0.0

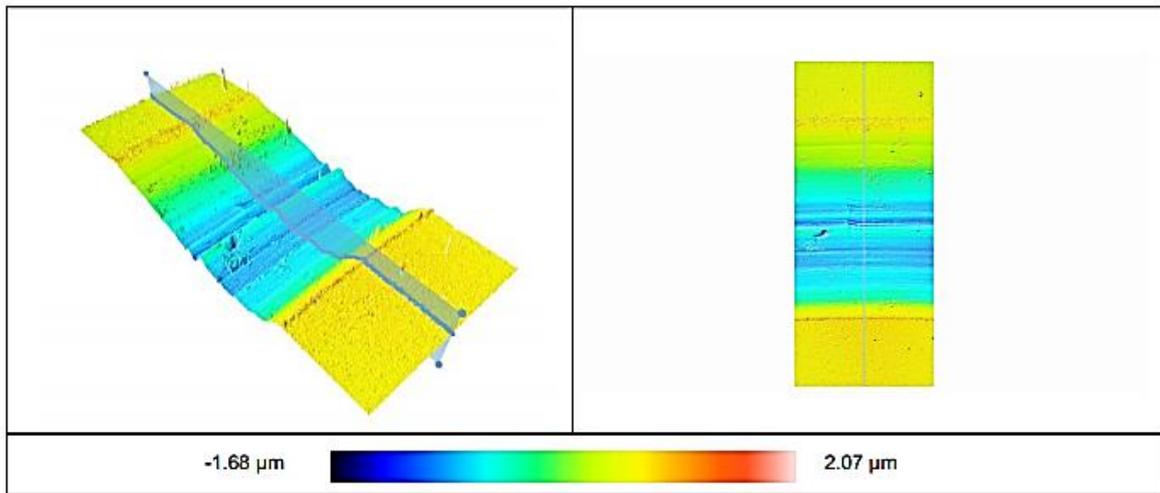
**Profile**



**Volume**

	Peak	Hole
Volume (μm <sup>3</sup> )	5352.85	221443
Area (mm <sup>2</sup> )	79409.2	685966
Max h/d (μm)	1.75884	1.77908

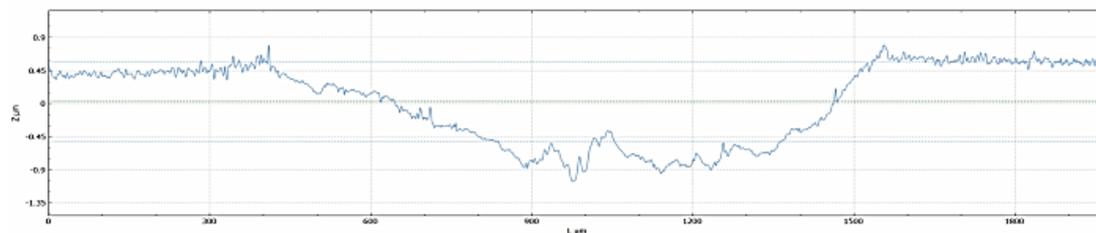
Anexo 32. Acero 1,2379 con tratamiento PVD. R10 Zona 3



Filename: RF02\_R10\_zona3.plux  
 Acquisition author: senso5  
 Analysis author:

Company name: Sensofar S.L.  
 Date: 2020-07-08 14:30:19  
 Analysis Software Version: 1.5.0.0

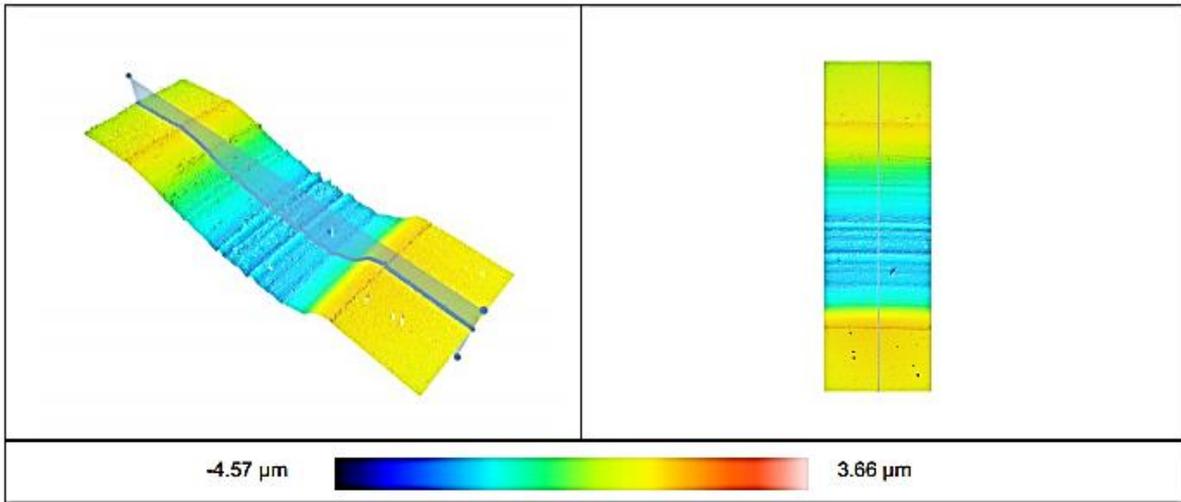
**Profile**



**Volume**

	Peak	Hole
Volume (μm <sup>3</sup> )	4938.14	801243
Area (mm <sup>2</sup> )	57391	939128
Max h/d (μm)	0.588082	2.16577

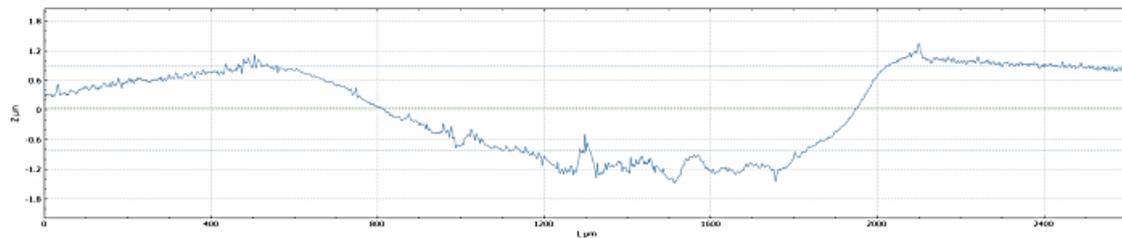
Anexo 33. Acero 1,2379 con tratamiento PVD. R12 Zona 1



**Filename:**RF02\_R12\_zona1.plux  
**Acquisition author:**sens05  
**Analysis author:**

**Company name:**Sensofar S.L.  
**Date:**2020-07-08 14:31:53  
**Analysis Software Version:**1.5.0.0

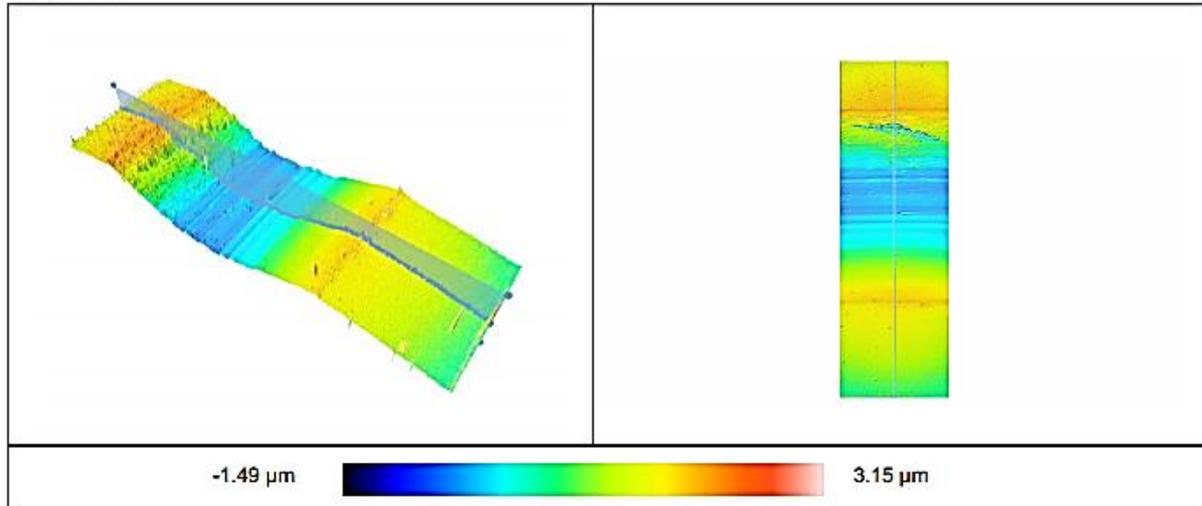
**Profile**



**Volume**

	Peak	Hole
Volume (μm <sup>3</sup> )	54885.8	1.59562e+6
Area (mm <sup>2</sup> )	268632	1.14091e+6
Max h/d (μm)	1.15566	4.43944

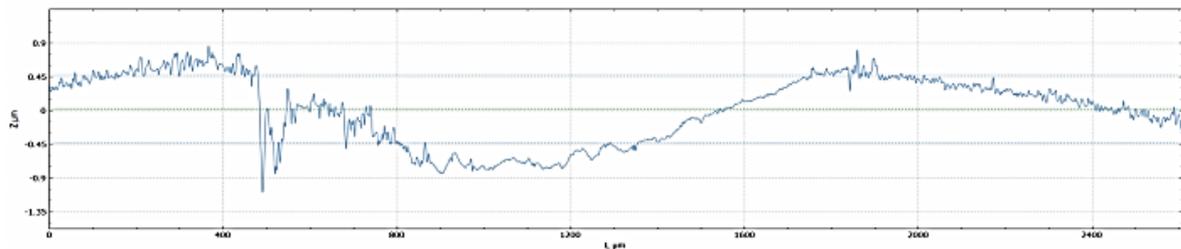
Anexo 34. Acero 1,2379 con tratamiento PVD. R12 Zona 2



Filename:RF02\_R12\_zona2.plux  
 Acquisition author:senso5  
 Analysis author:

Company name:Sensofar S.L.  
 Date:2020-07-08 14:33:40  
 Analysis Software Version: 1.5.0.0

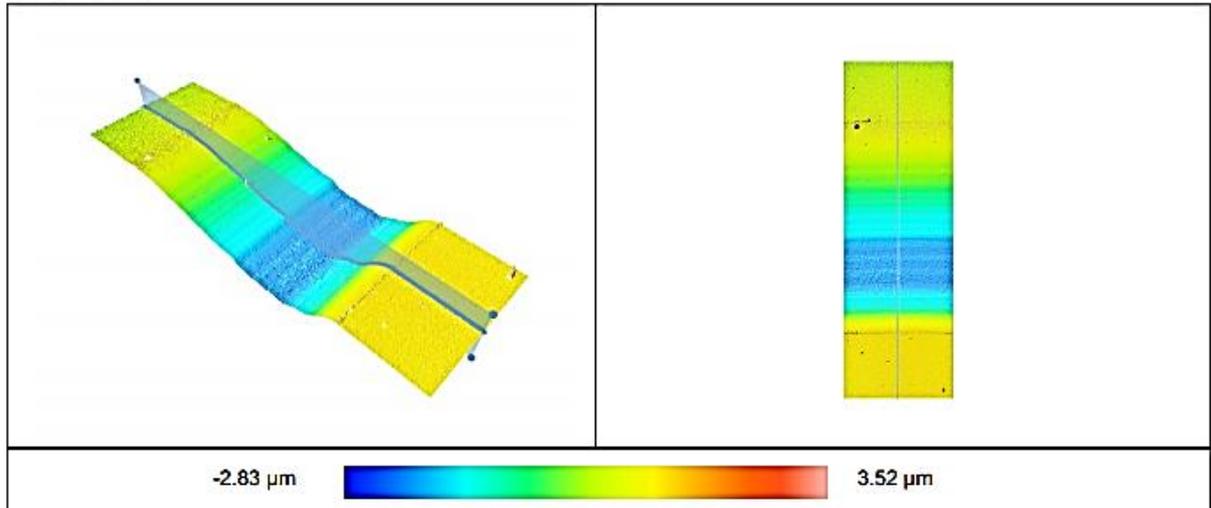
**Profile**



**Volume**

	Peak	Hole
Volume (μm <sup>3</sup> )	45686.3	734857
Area (mm <sup>2</sup> )	251264	1.02944e+6
Max h/d (μm)	1.10699	1.91839

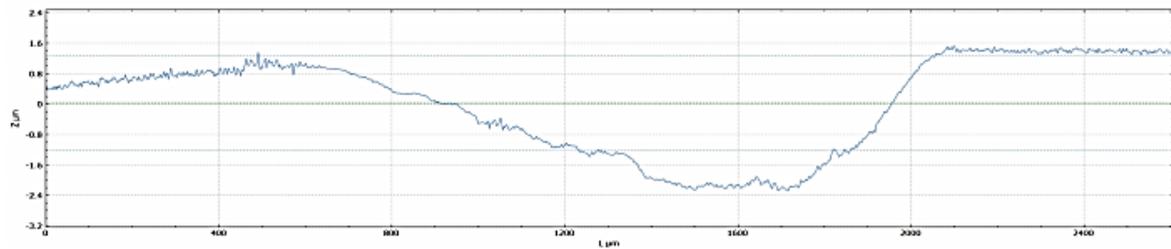
Anexo 35. P Acero 1,2379 con tratamiento PVD. R12 Zona 3



Filename:RF02\_R12\_zona3.plux  
 Acquisition author:senso5  
 Analysis author:

Company name:Sensofar S.L.  
 Date:2020-07-08 14:34:51  
 Analysis Software Version:1.5.0.0

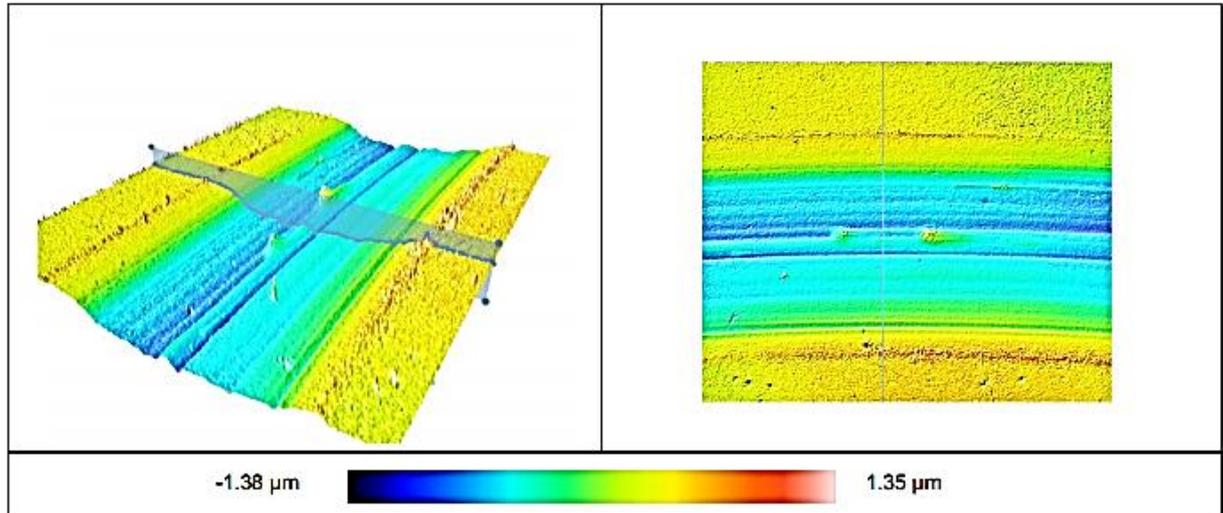
**Profile**



**Volume**

	Peak	Hole
Volume (μm <sup>3</sup> )	55193.8	2.24797e+6
Area (mm <sup>2</sup> )	283668	1.13963e+6
Max h/d (μm)	2.81092	3.98153

Anexo 36. Acero 1,2379 con tratamiento Dúplex. R6 Zona 1



Filename:DF01\_R6\_zona1.plux

Acquisition author:senso5

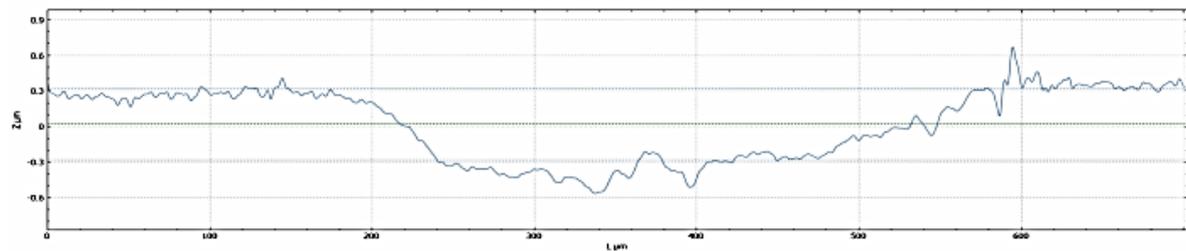
Analysis author:

Company name:Sensofar S.L.

Date:2020-07-08 16:33:01

Analysis Software Version: 1.5.0.0

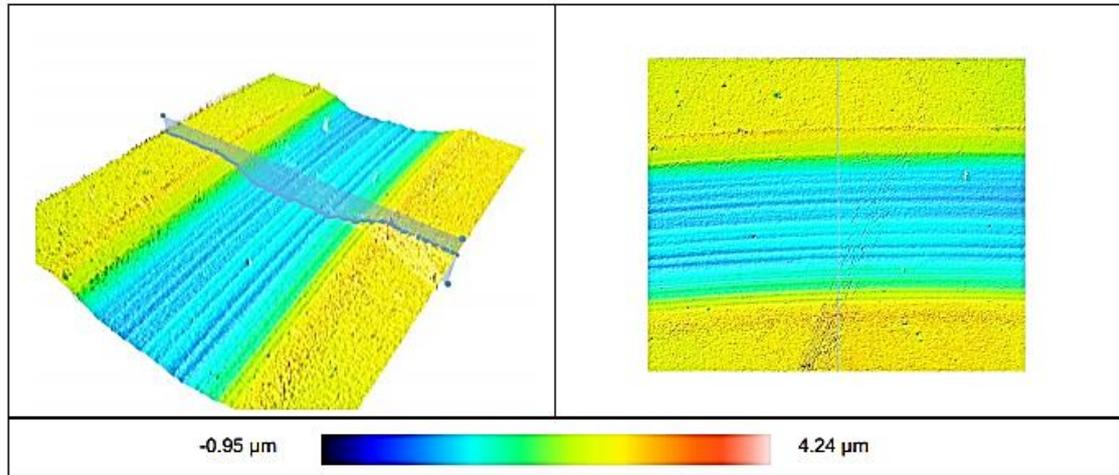
**Profile**



**Volume**

	Peak	Hole
Volume ( $\mu\text{m}^3$ )	154.345	164741
Area ( $\text{mm}^2$ )	6500.19	327516
Max h/d ( $\mu\text{m}$ )	0.160636	1.10241

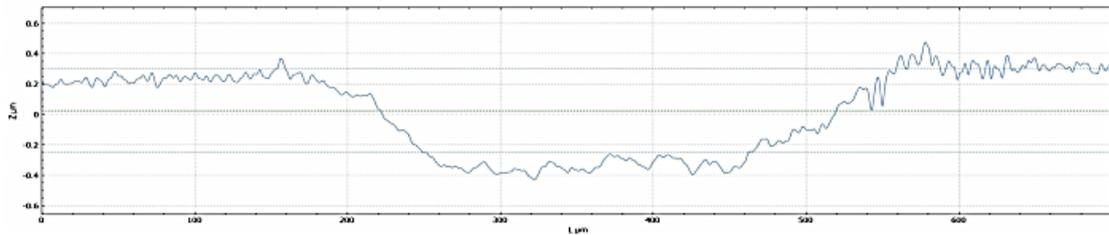
Anexo 37. Acero 1,2379 con tratamiento Dúplex. R6 Zona 2



Filename: DF01\_R6\_zona2.plux  
 Acquisition author: senso5  
 Analysis author:

Company name: Sensofar S.L.  
 Date: 2020-07-08 16:35:48  
 Analysis Software Version: 1.5.0.0

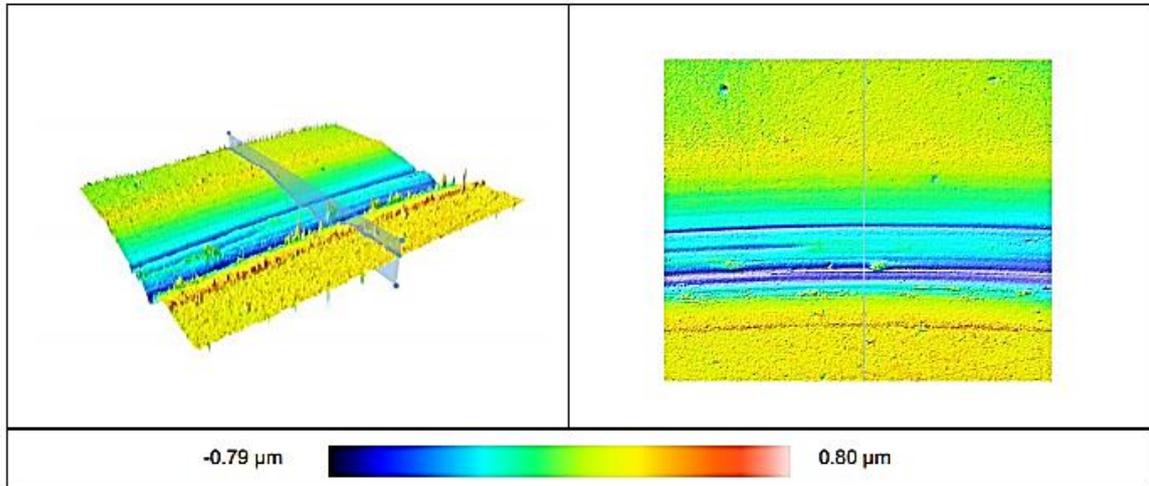
**Profile**



**Volume**

	Peak	Hole
Volume ( $\mu\text{m}^3$ )	83.7342	143446
Area ( $\text{mm}^2$ )	3888.78	307512
Max h/d ( $\mu\text{m}$ )	0.124946	1.17257

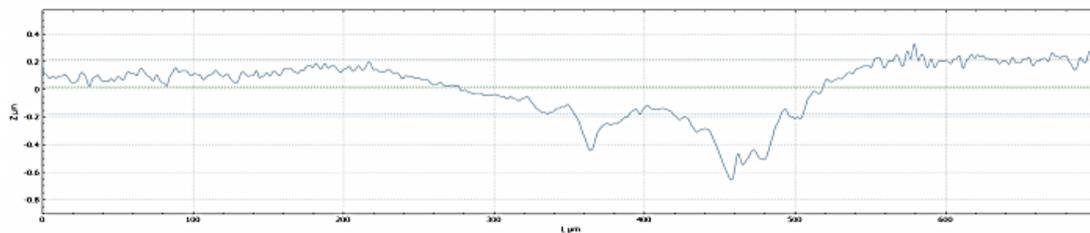
Anexo 38. Acero 1,2379 con tratamiento Dúplex. Probeta DF01. R6 Zona 3



Filename:DF01\_R6\_zona3.plux  
 Acquisition author:senso5  
 Analysis author:

Company name: Sensofar S.L.  
 Date: 2020-07-08 16:36:33  
 Analysis Software Version: 1.5.0.0

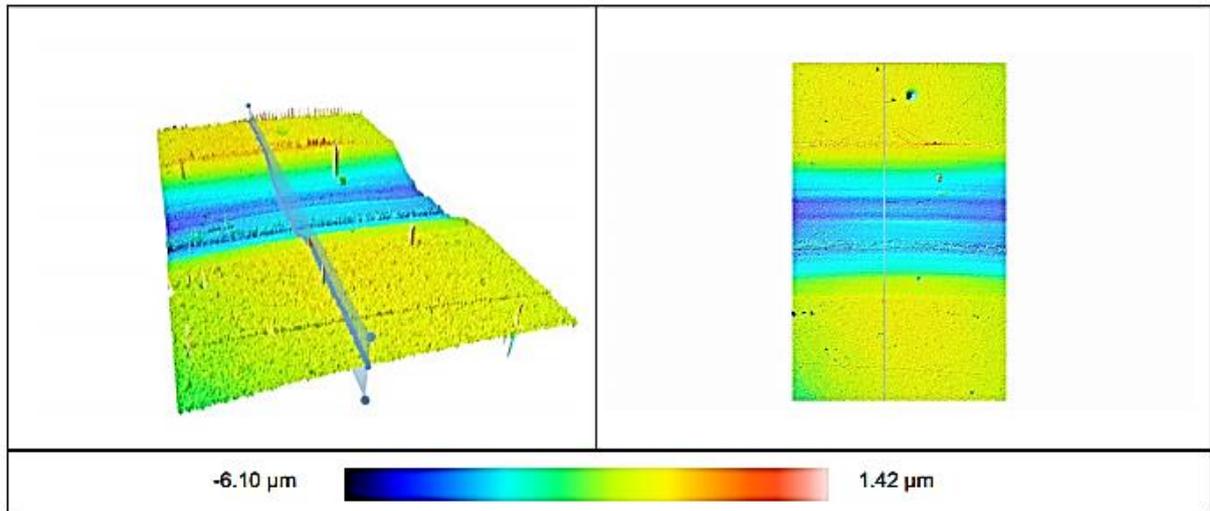
**Profile**



**Volume**

	Peak	Hole
Volume (μm <sup>3</sup> )	302.768	84693.2
Area (mm <sup>2</sup> )	12079.6	270326
Max h/d (μm)	0.55043	0.969542

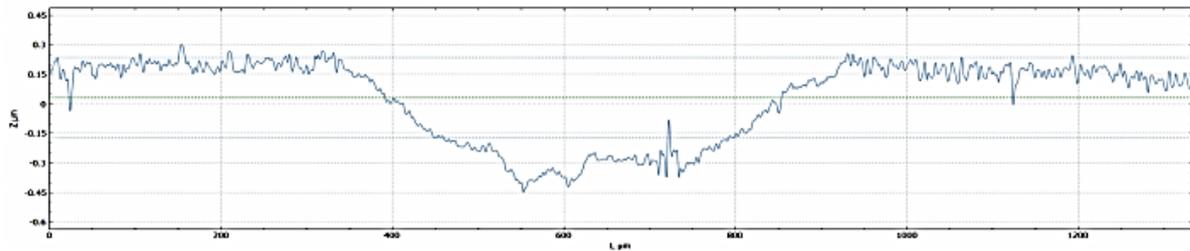
Anexo 39. Acero 1,2379 con tratamiento Dúplex. R8 Zona 1



Filename: DF01\_R8\_zona1.plux  
Acquisition author: senso5  
Analysis author:

Company name: Sensofar S.L.  
Date: 2020-07-08 16:37:17  
Analysis Software Version: 1.5.0.0

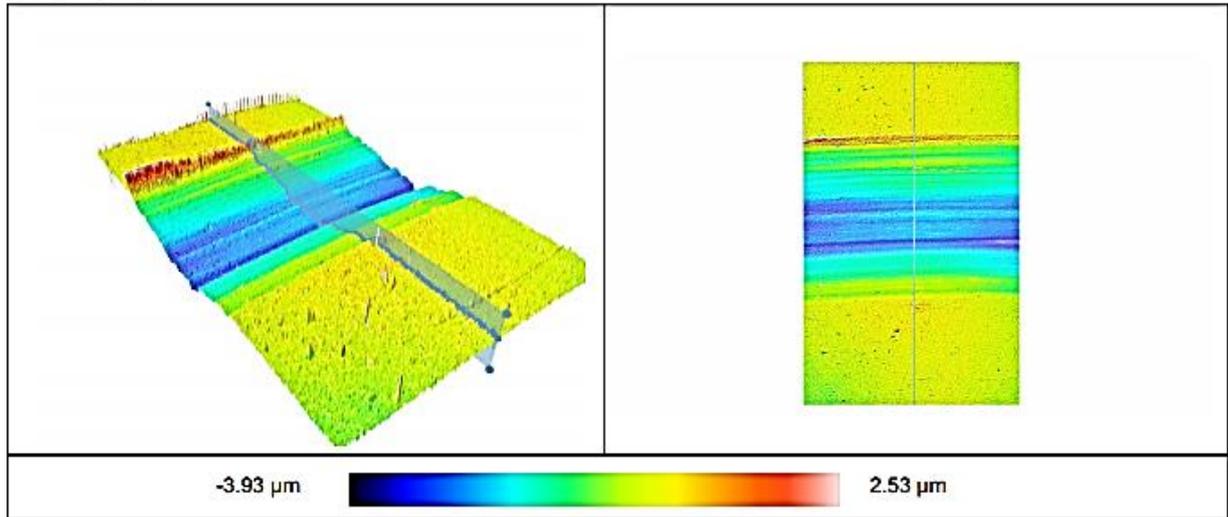
**Profile**



**Volume**

	Peak	Hole
Volume (μm <sup>3</sup> )	163.798	162244
Area (mm <sup>2</sup> )	1846.79	443886
Max h/d (μm)	0.990319	1.08409

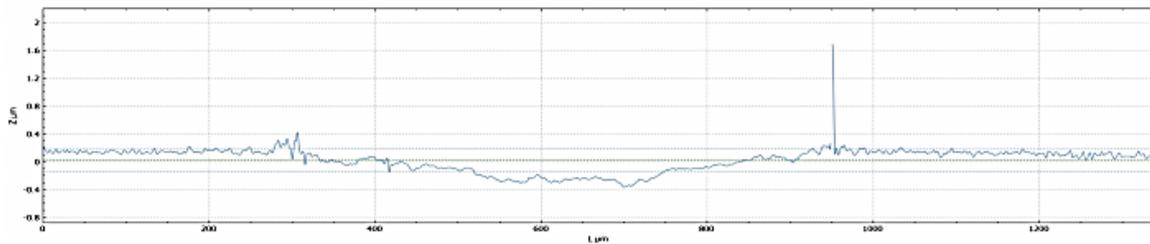
Anexo 40. Acero 1,2379 con tratamiento Dúplex. R8 Zona 2



Filename:DF01\_R8\_zona2.plux  
 Acquisition author:senso5  
 Analysis author:

Company name:Sensofar S.L.  
 Date:2020-07-08 16:38:24  
 Analysis Software Version: 1.5.0.0

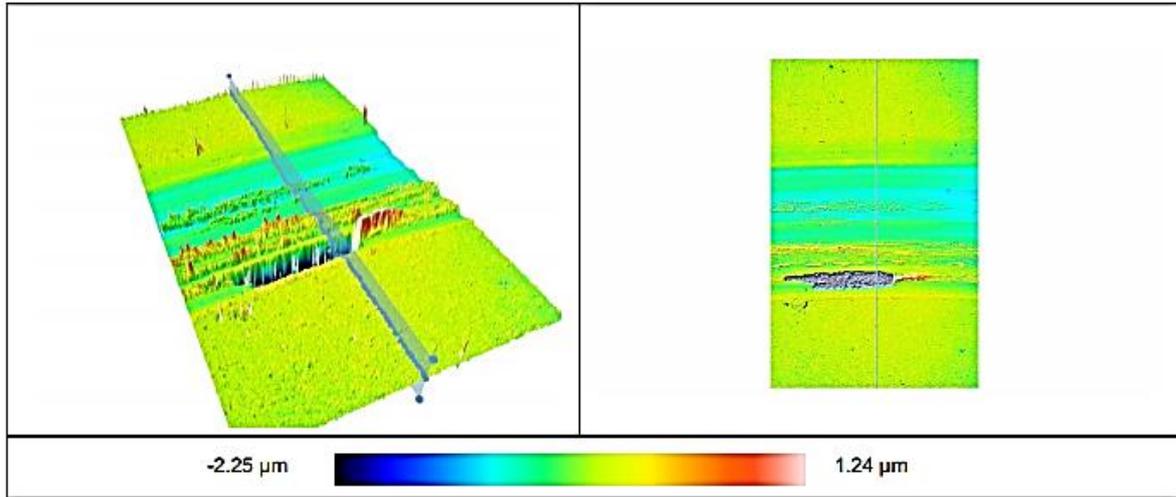
**Profile**



**Volume**

	Peak	Hole
Volume (μm <sup>3</sup> )	3062.23	126906
Area (mm <sup>2</sup> )	34062.6	511164
Max h/d (μm)	0.839552	1.1155

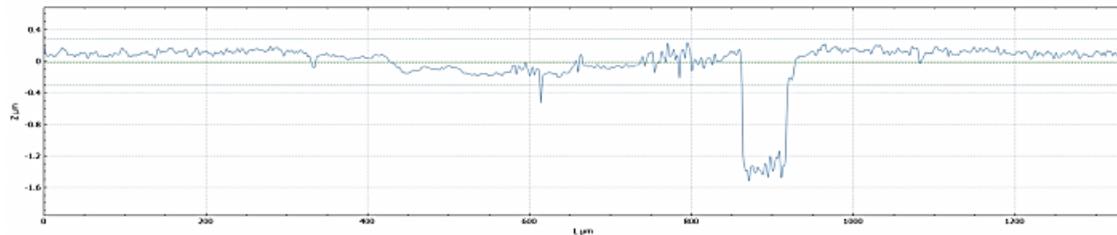
Anexo 41. Acero 1,2379 con tratamiento Dúplex. R8 Zona 3



Filename: DF01\_R8\_zona3.plux  
 Acquisition author: senso5  
 Analysis author:

Company name: Sensofar S.L.  
 Date: 2020-07-08 16:40:16  
 Analysis Software Version: 1.5.0.0

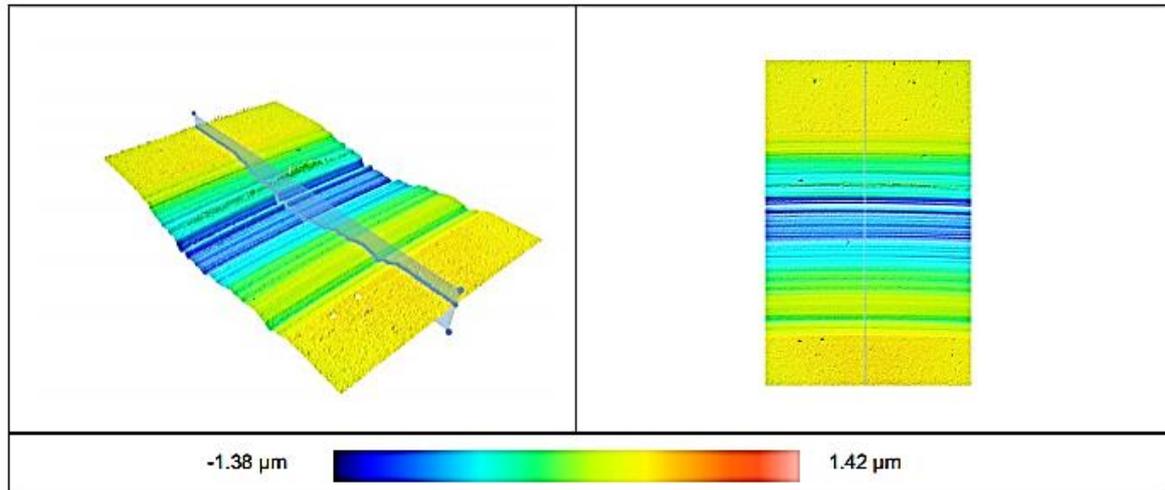
**Profile**



**Volume**

	Peak	Hole
Volume (μm <sup>3</sup> )	5426.37	98046.7
Area (mm <sup>2</sup> )	79848.2	475453
Max h/d (μm)	1.16187	2.35464

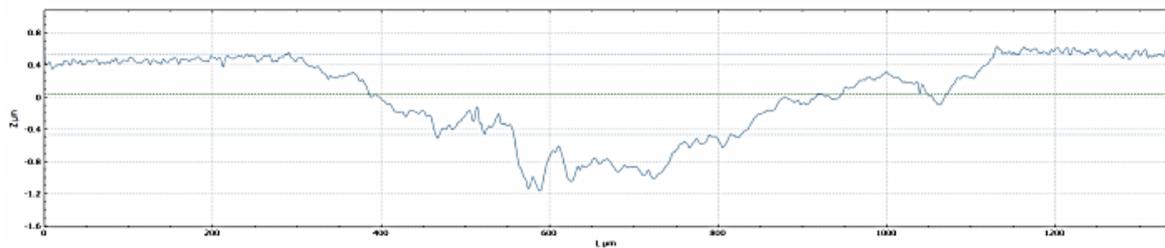
Anexo 42. Acero 1,2379 con tratamiento Dúplex. R10 Zona 1



Filename: DF01\_R10\_zona1.plux  
 Acquisition author: senso5  
 Analysis author:

Company name: Sensofar S.L.  
 Date: 2020-07-08 16:41:09  
 Analysis Software Version: 1.5.0.0

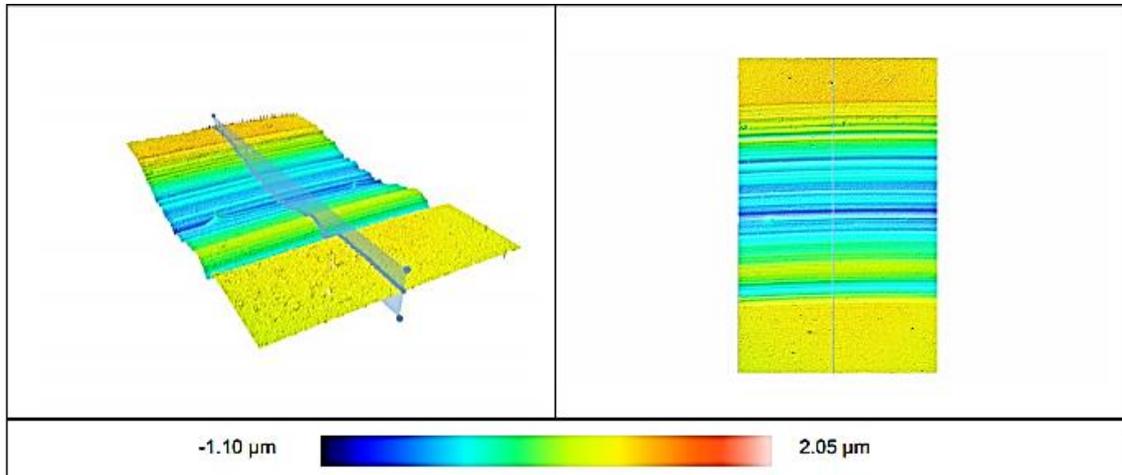
**Profile**



**Volume**

	Peak	Hole
Volume (μm <sup>3</sup> )	1470.51	515156
Area (mm <sup>2</sup> )	33377.5	698302
Max h/d (μm)	0.273227	1.82355

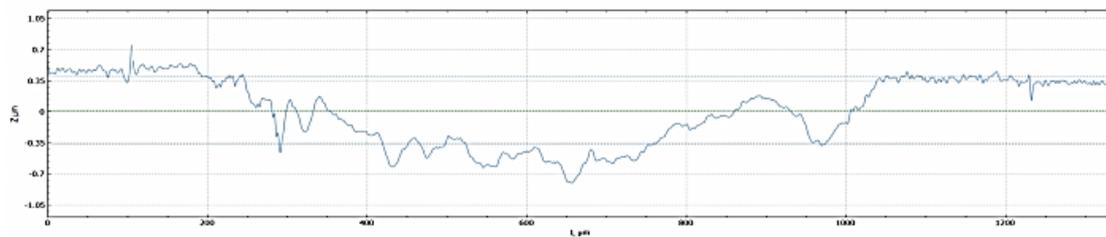
Anexo 43. Probeta DF01. R10 Zona 2



Filename: DF01\_R10\_zona2.plux  
 Acquisition author: senso5  
 Analysis author:

Company name: Sensofar S.L.  
 Date: 2020-07-08 16:42:50  
 Analysis Software Version: 1.5.0.0

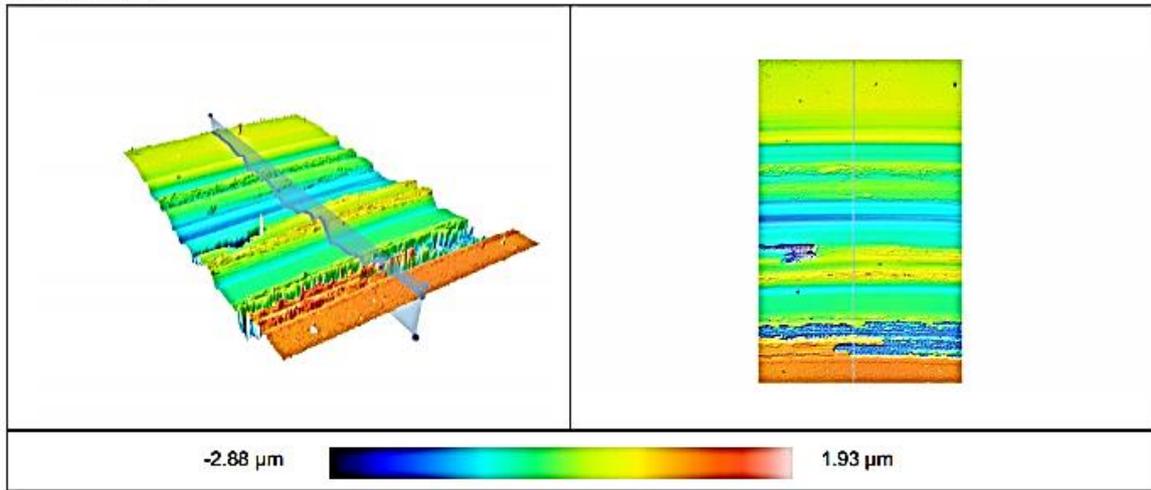
**Profile**



**Volume**

	Peak	Hole
Volume (μm <sup>3</sup> )	1359.76	438476
Area (mm <sup>2</sup> )	31300.7	719987
Max h/d (μm)	0.307655	1.28758

Anexo 44. P Acero 1,2379 con tratamiento Dúplex. R10 Zona 3



Filename: DF01\_R10\_zona3.plux

Acquisition author: senso5

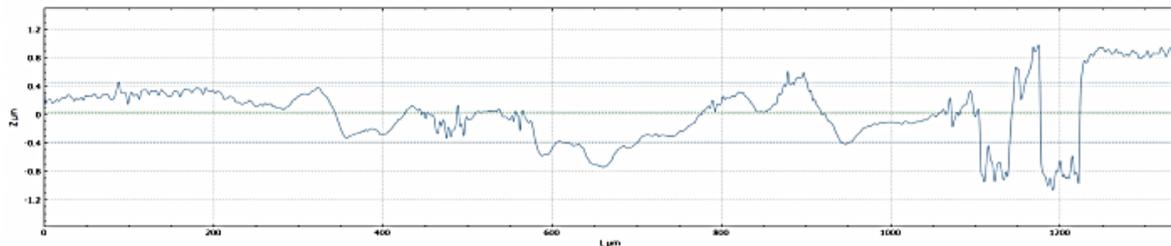
Analysis author:

Company name: Sensofar S.L.

Date: 2020-07-08 16:44:18

Analysis Software Version: 1.5.0.0

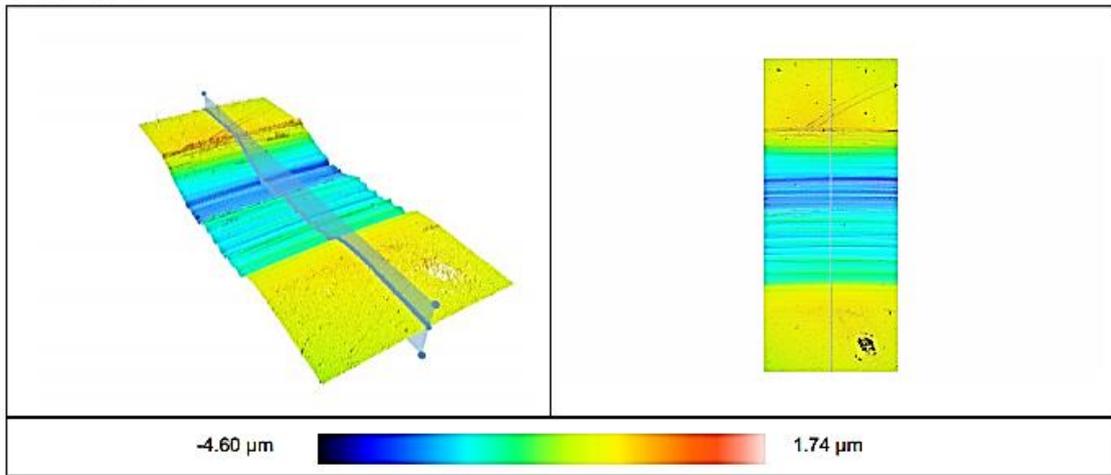
**Profile**



**Volume**

	Peak	Hole
Volume (μm <sup>3</sup> )	1762.07	595032
Area (mm <sup>2</sup> )	33726	855118
Max h/d (μm)	0.593086	3.4715

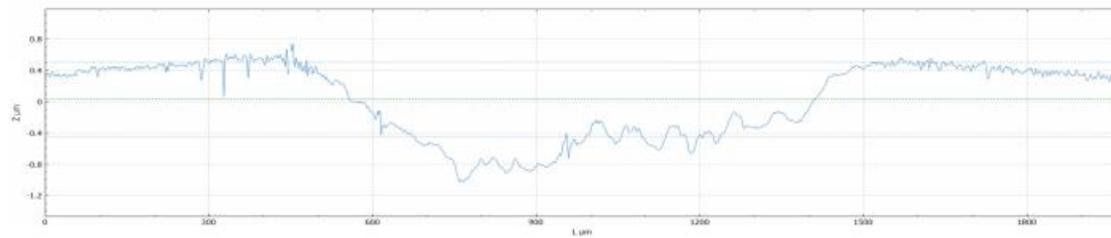
Anexo 45. Probeta DF01. R12 Zona 1



Filename: DF01\_R12\_zona1.plux  
 Acquisition author: senso5  
 Analysis author:

Company name: Sensofar S.L.  
 Date: 2020-07-08 16:45:17  
 Analysis Software Version: 1.5.0.0

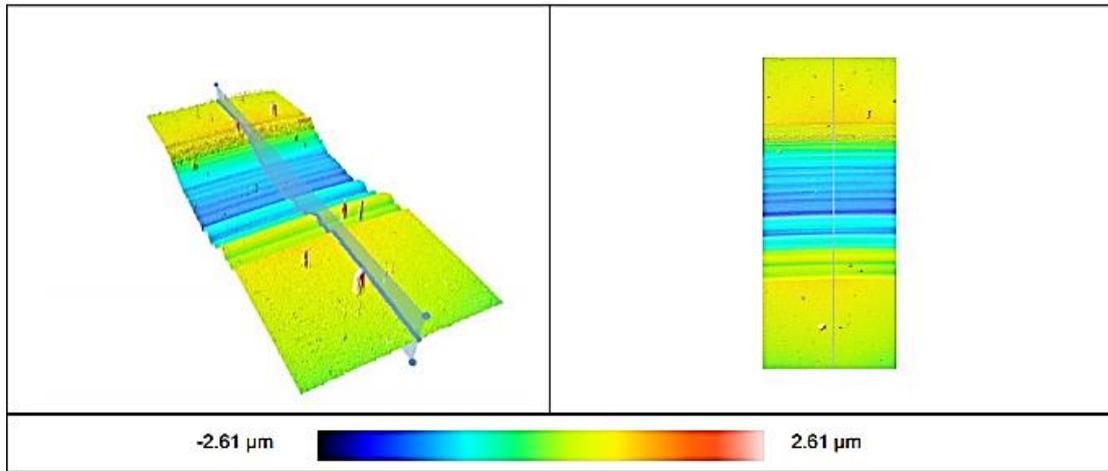
**Profile**



**Volume**

	Peak	Hole
Volume (μm <sup>3</sup> )	3982.07	662008
Area (mm <sup>2</sup> )	33935.9	841067
Max h/d (μm)	0.54634	1.9972

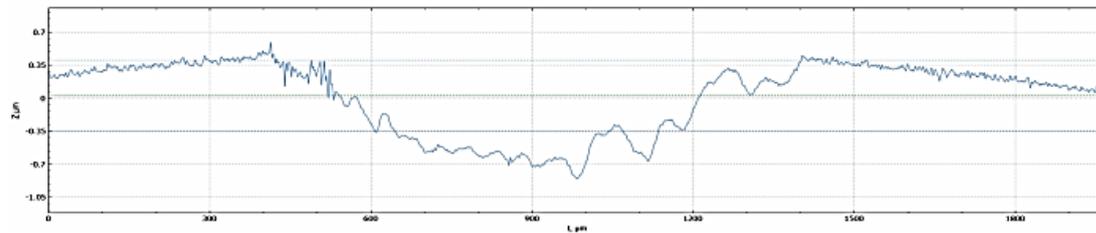
Anexo 46. Acero 1,2379 con tratamiento Dúplex. R12 Zona 2



Filename: DF01\_R12\_zona2.plx  
 Acquisition author: senso5  
 Analysis author:

Company name: Sensofar S.L.  
 Date: 2020-07-08 16:45:58  
 Analysis Software Version: 1.5.0.0

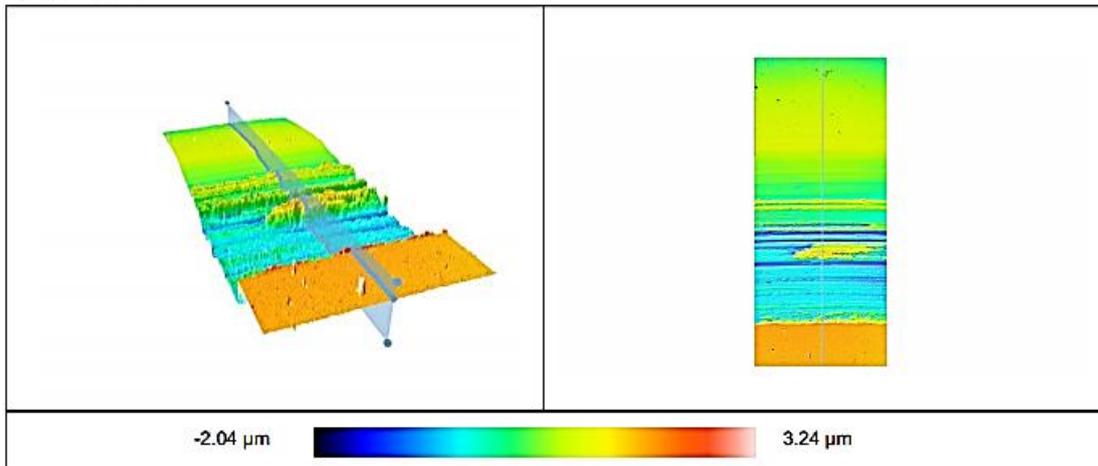
**Profile**



**Volume**

	Peak	Hole
Volume (µm <sup>3</sup> )	6715.72	449168
Area (mm <sup>2</sup> )	84343	762856
Max h/d (µm)	2.37386	1.20175

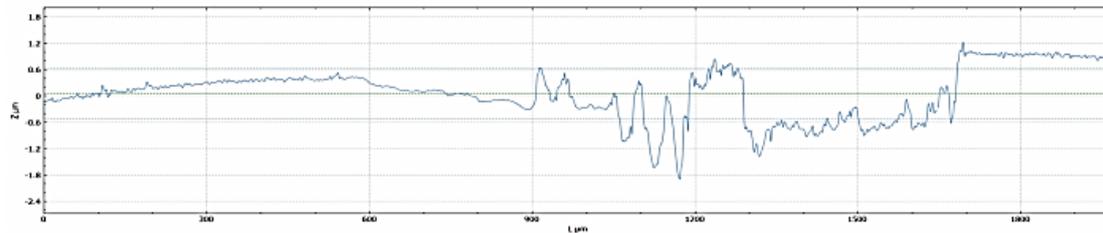
Anexo 47. Acero 1,2379 con tratamiento Dúplex. R12 Zona 3



Filename:DF01\_R12\_zona3.plux  
 Acquisition author:senso5  
 Analysis author:

Company name:Sensofar S.L.  
 Date:2020-07-08 16:47:22  
 Analysis Software Version: 1.5.0.0

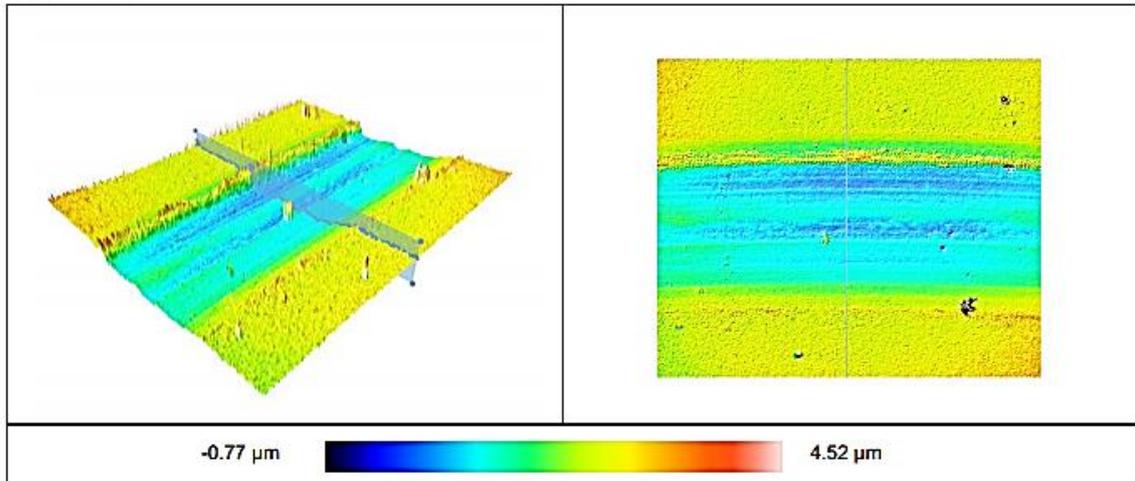
**Profile**



**Volume**

	Peak	Hole
Volume (μm <sup>3</sup> )	17129.9	863411
Area (mm <sup>2</sup> )	168341	910698
Max h/d (μm)	0.666563	2.64708

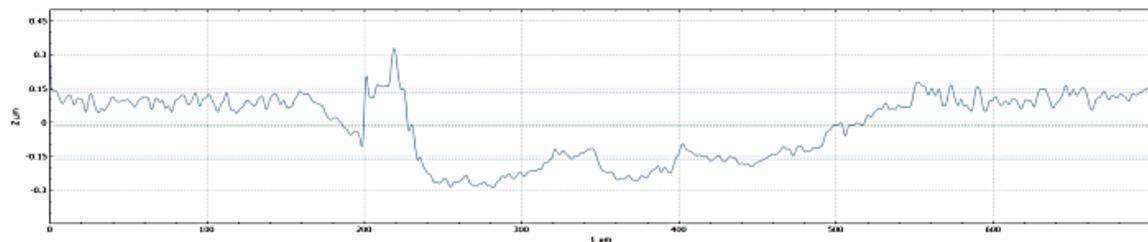
Anexo 48. Acero Vanadis4 con tratamiento Dúplex. R6 Zona 1



Filename: DV01\_R6\_zona1.plux  
 Acquisition author: senso5  
 Analysis author:

Company name: Sensofar S.L.  
 Date: 2020-07-08 16:18:24  
 Analysis Software Version: 1.5.0.0

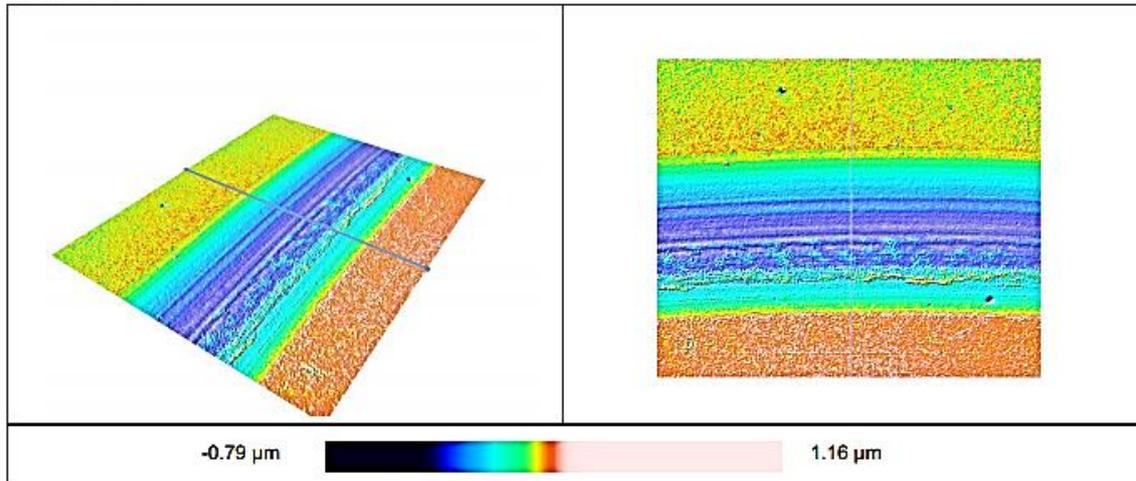
**Profile**



**Volume**

	Peak	Hole
Volume (μm <sup>3</sup> )	502.916	64322.1
Area (mm <sup>2</sup> )	8428.87	265279
Max h/d (μm)	0.502687	0.812148

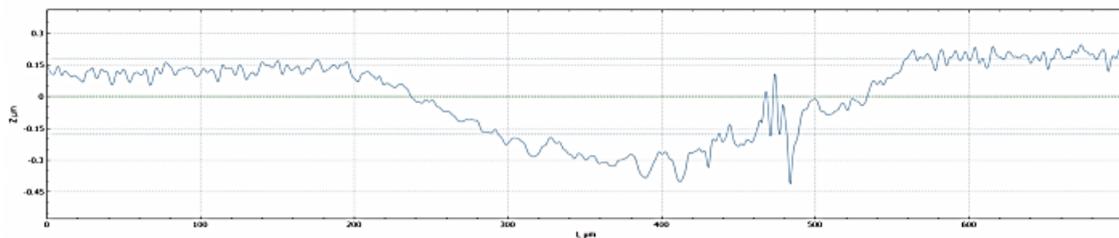
Anexo 49. Acero Vanadis4 Dúplex. R6 Zona 2



Filename: DV01\_R6\_zona2.plux  
 Acquisition author: senso5  
 Analysis author:

Company name: Sensofar S.L.  
 Date: 2020-07-08 16:19:44  
 Analysis Software Version: 1.5.0.0

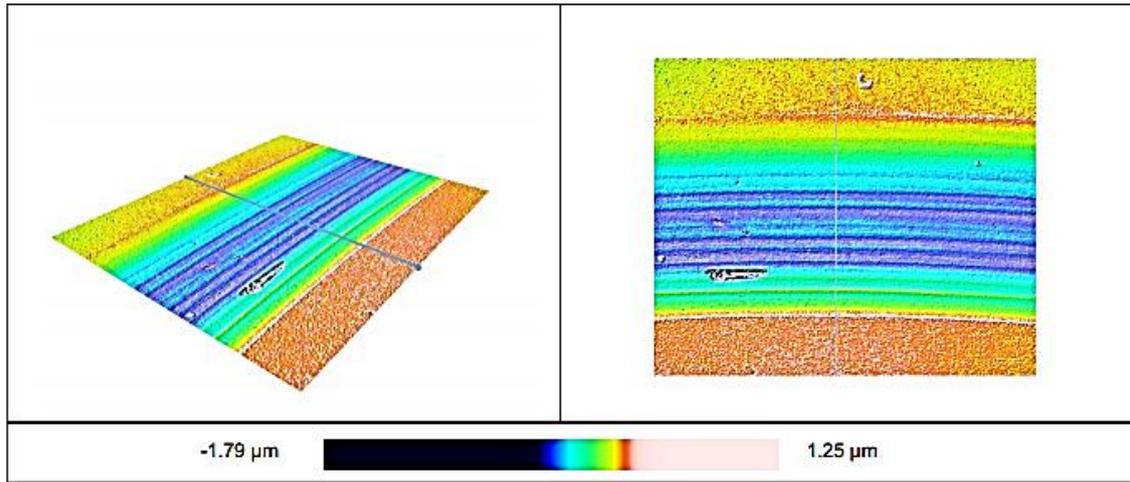
**Profile**



**Volume**

	Peak	Hole
Volume (μm <sup>3</sup> )	570.867	86999.1
Area (mm <sup>2</sup> )	20988.4	313028
Max h/d (μm)	0.488912	0.820347

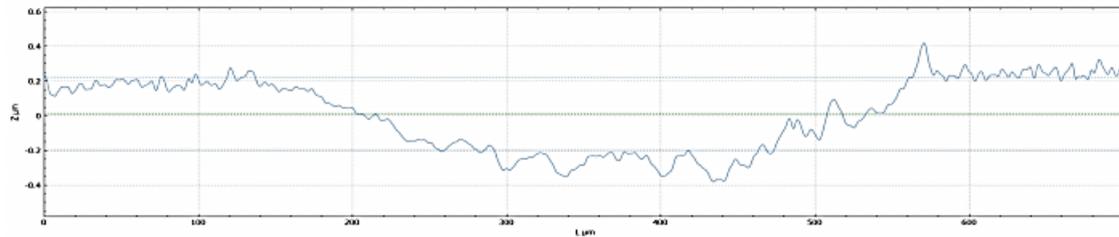
Anexo 50. Acero Vanadis4 con tratamiento Dúplex. R6 Zona 3



Filename: DV01\_R6\_zona3.plux  
 Acquisition author: senso5  
 Analysis author:

Company name: Sensofar S.L.  
 Date: 2020-07-08 16:21:07  
 Analysis Software Version: 1.5.0.0

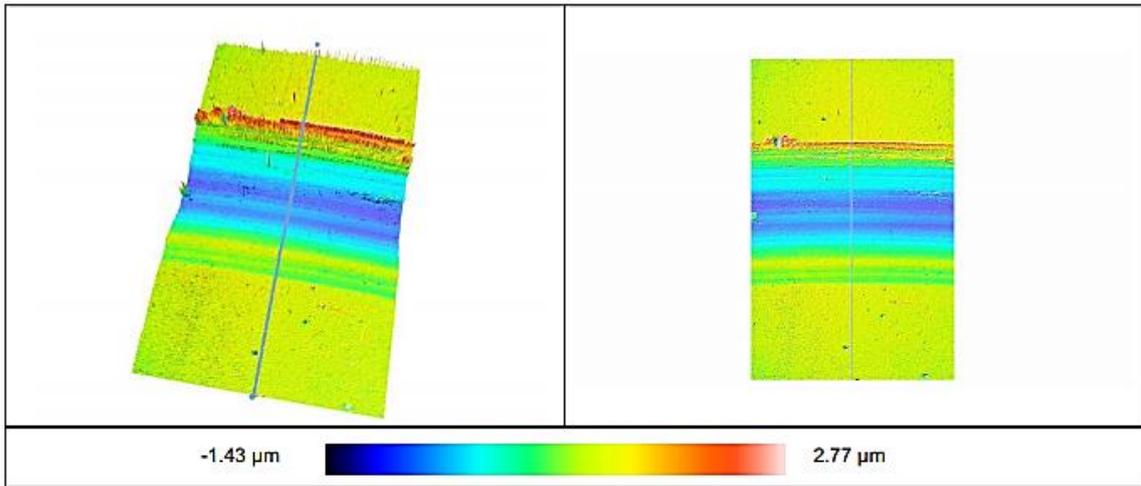
**Profile**



**Volume**

	Peak	Hole
Volume (μm <sup>3</sup> )	1337.94	119636
Area (mm <sup>2</sup> )	24013.5	358098
Max h/d (μm)	1.04089	2.00138

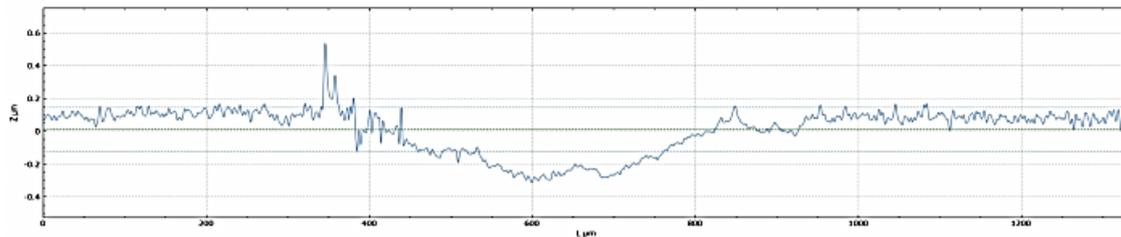
Anexo 51. Acero Vanadis4 con tratamiento Dúplex. R8 Zona 1



Filename: DV01\_R8\_zona1.plux  
 Acquisition author: senso5  
 Analysis author:

Company name: Sensofar S.L.  
 Date: 2020-07-08 16:22:13  
 Analysis Software Version: 1.5.0.0

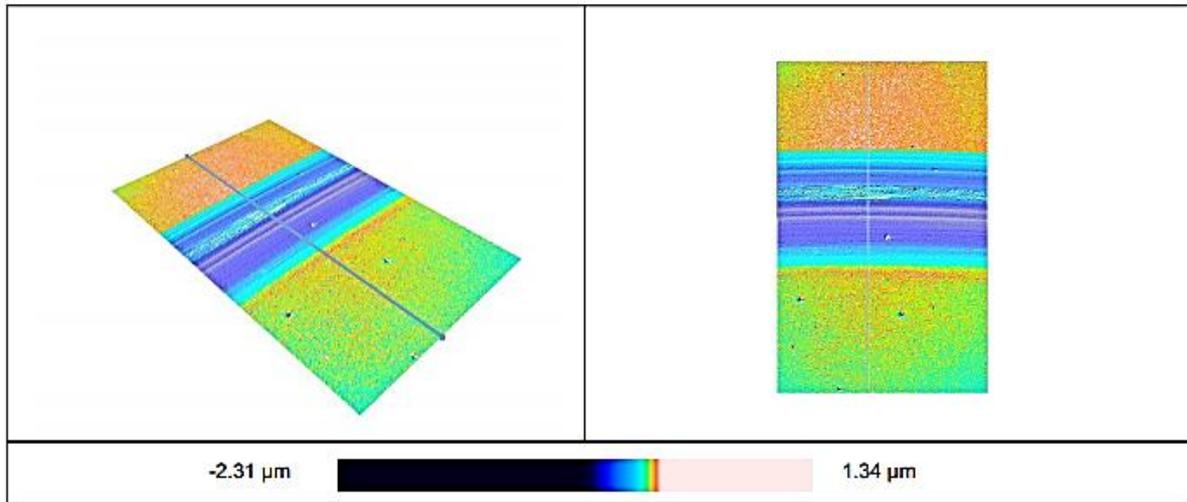
**Profile**



**Volume**

	Peak	Hole
Volume (μm <sup>3</sup> )	5466.2	92970.7
Area (mm <sup>2</sup> )	69274.5	462294
Max h/d (μm)	1.55925	0.778459

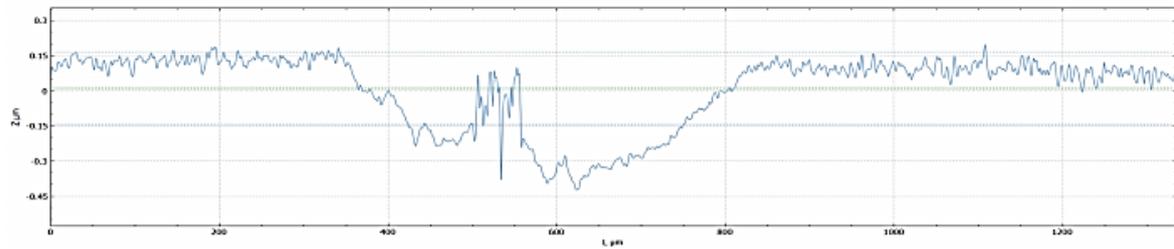
Anexo 52. Acero Vanadis4 con tratamiento Dúplex. R8 Zona 2



Filename: DV01\_R8\_zona2.plux  
 Acquisition author: senso5  
 Analysis author:

Company name: Sensofar S.L.  
 Date: 2020-07-08 16:22:53  
 Analysis Software Version: 1.5.0.0

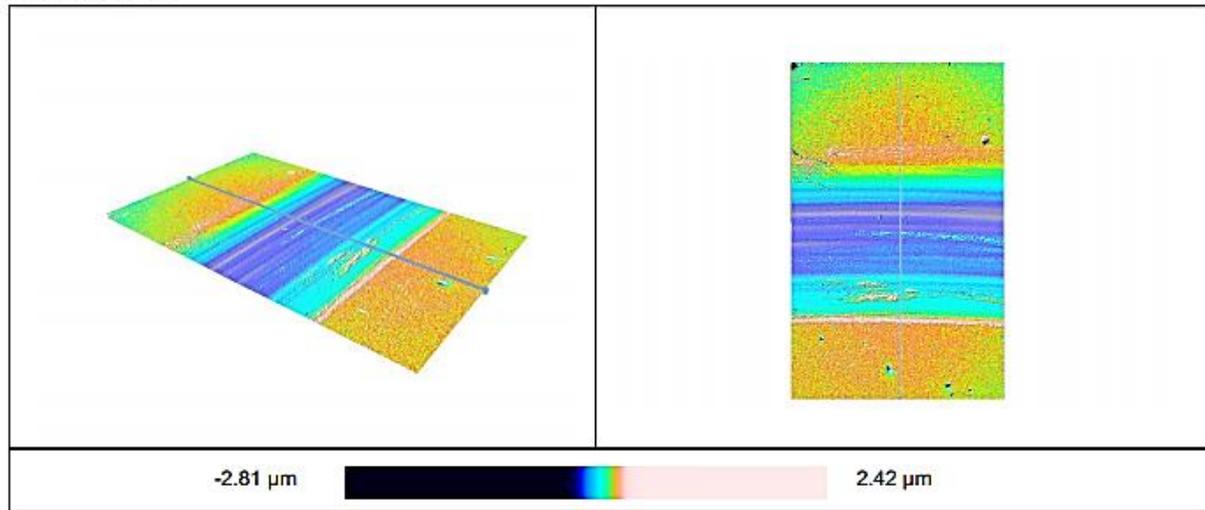
**Profile**



**Volume**

	Peak	Hole
Volume (μm <sup>3</sup> )	851.016	109684
Area (mm <sup>2</sup> )	32670.5	405933
Max h/d (μm)	0.488477	1.31992

Anexo 53. Acero Vanadis4 con tratamiento Dúplex. R8 Zona 3



Filename: DV01\_R8\_zona3.plux

Acquisition author: senso5

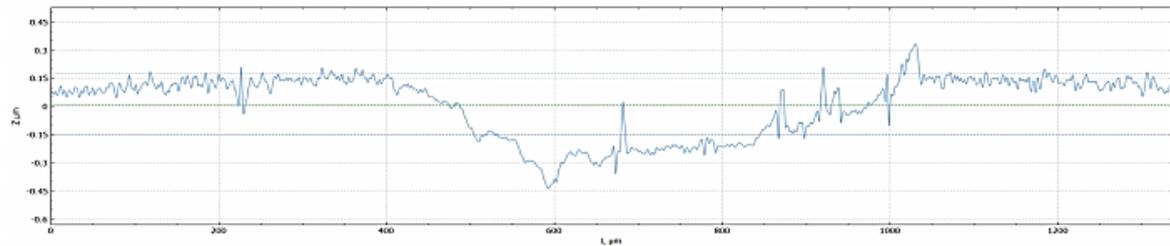
Analysis author:

Company name: Sensofar S.L.

Date: 2020-07-08 16:23:46

Analysis Software Version: 1.5.0.0

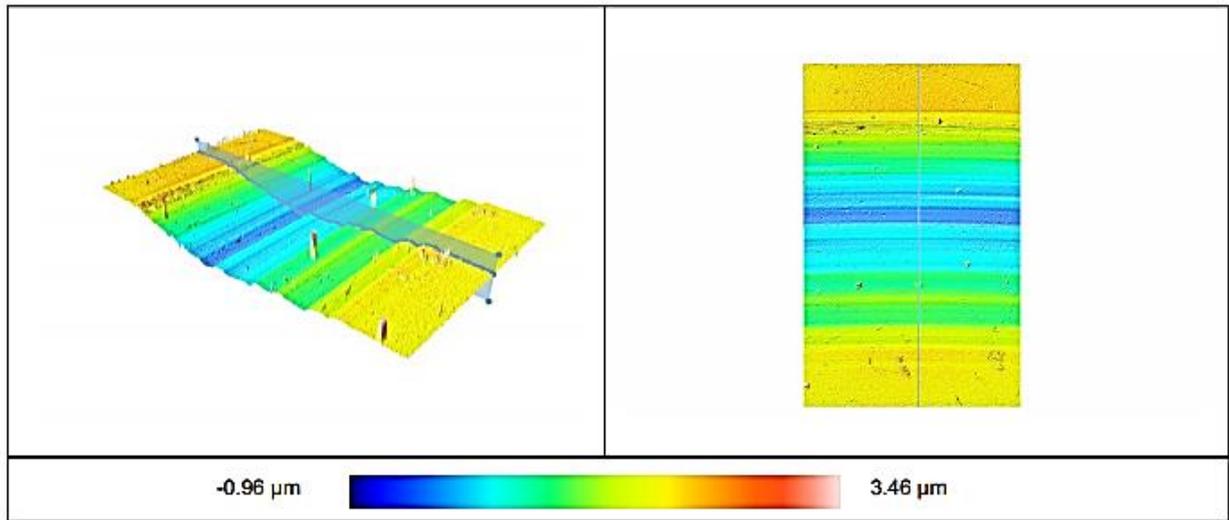
**Profile**



**Volume**

	Peak	Hole
Volume ( $\mu\text{m}^3$ )	3601.28	132302
Area ( $\text{mm}^2$ )	55489	502759
Max h/d ( $\mu\text{m}$ )	1.21073	0.788236

Anexo 54. Acero Vanadis4 con tratamiento Dúplex. R10 Zona 1



Filename: DV01\_R10\_zona1.plux

Acquisition author: senso5

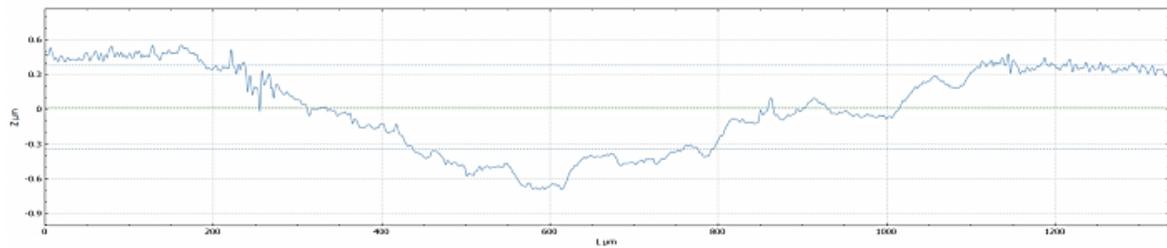
Analysis author:

Company name: Sensofar S.L.

Date: 2020-07-08 16:24:33

Analysis Software Version: 1.5.0.0

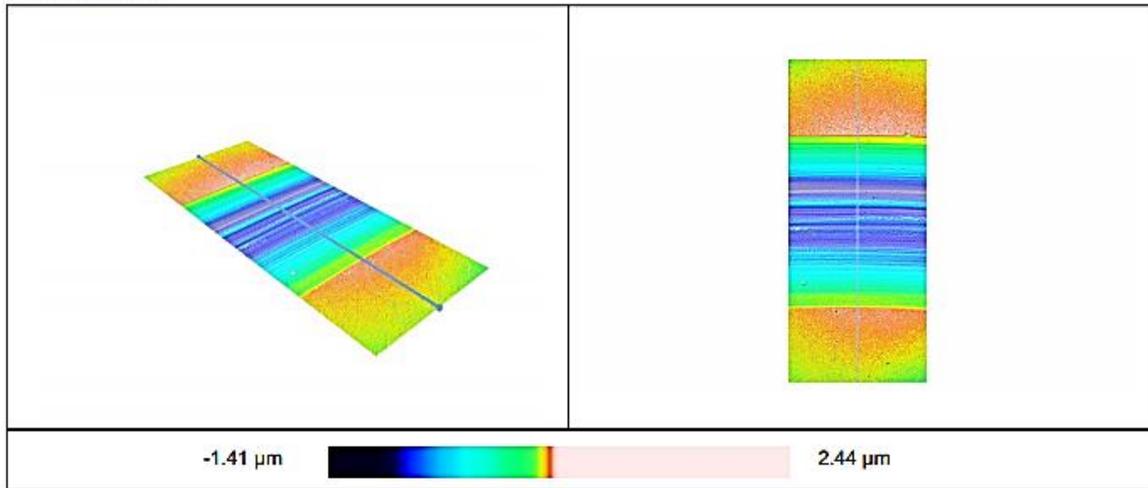
**Profile**



**Volume**

	Peak	Hole
Volume ( $\mu\text{m}^3$ )	1519.8	439927
Area ( $\text{mm}^2$ )	27051.5	775064
Max h/d ( $\mu\text{m}$ )	3.0269	1.35203

Anexo 55. Acero Vanadis4 Acero con tratamiento Dúplex. R10 Zona 2



Filename: DV01\_R10\_zona2.plux

Acquisition author: senso5

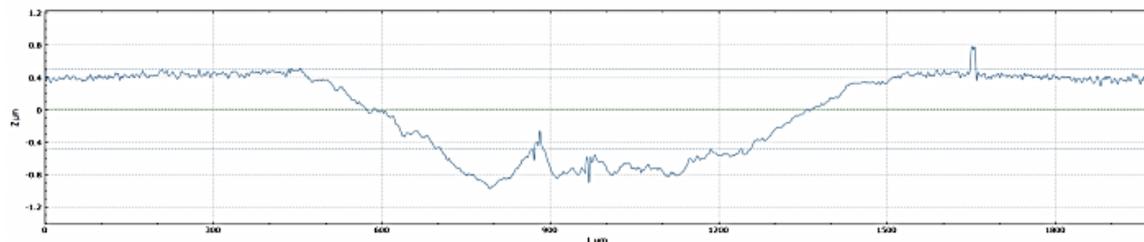
Analysis author:

Company name: Sensofar S.L.

Date: 2020-07-08 16:26:48

Analysis Software Version: 1.5.0.0

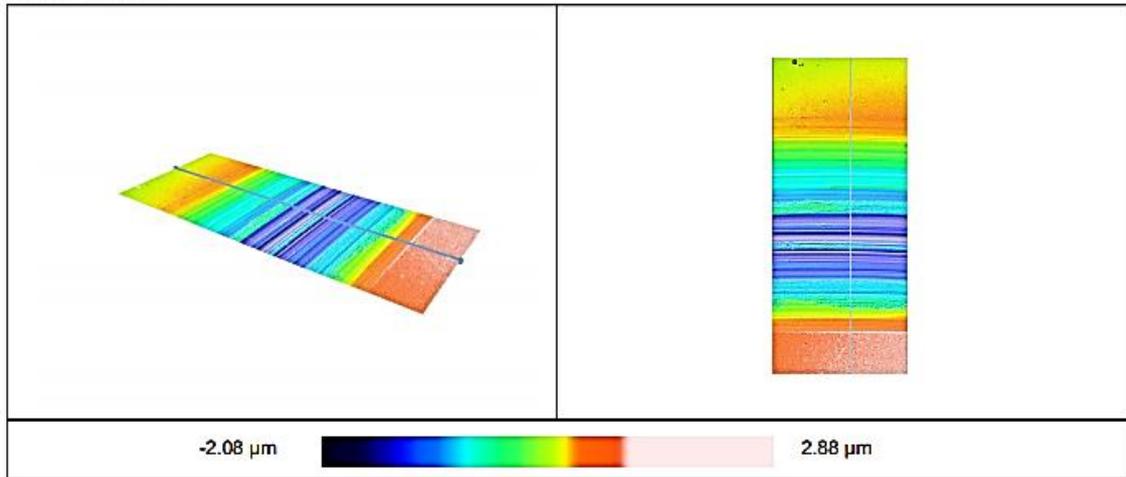
**Profile**



**Volume**

	Peak	Hole
Volume (μm <sup>3</sup> )	2238.85	675373
Area (mm <sup>2</sup> )	48186.6	879655
Max h/d (μm)	2.04289	1.51995

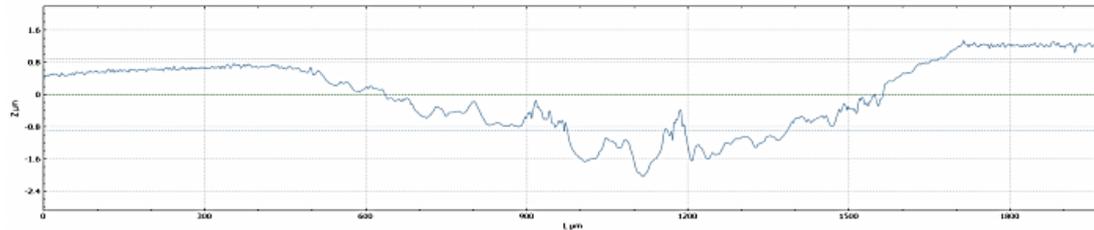
Anexo 56. Acero Vanadis4 Con tratamiento Dúplex. R10 Zona 3



Filename: DV01\_R10\_zona3.plux  
Acquisition author: senso5  
Analysis author:

Company name: Sensofar S.L.  
Date: 2020-07-08 16:28:07  
Analysis Software Version: 1.5.0.0

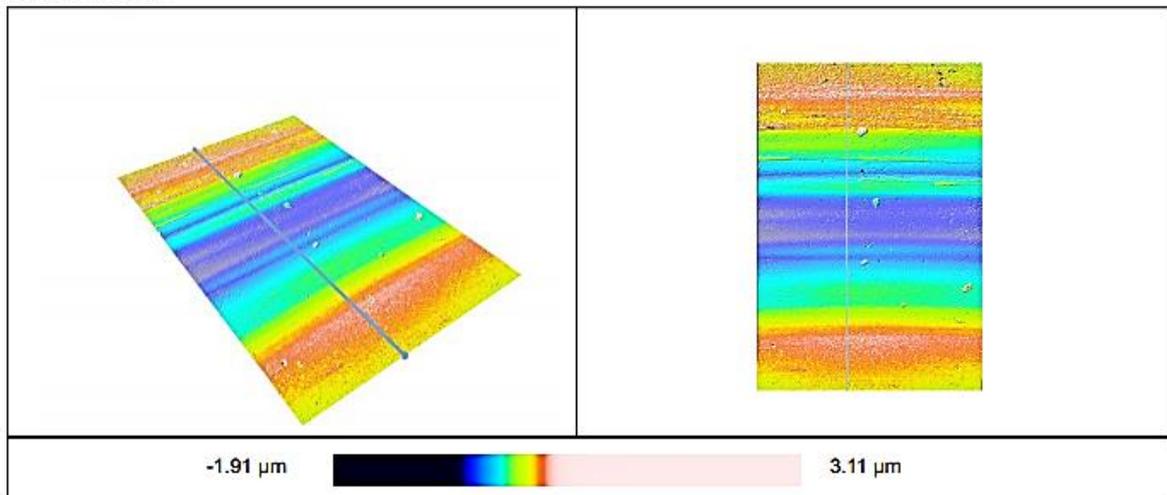
**Profile**



**Volume**

	Peak	Hole
Volume (μm <sup>3</sup> )	119.188	1.47175e+6
Area (mm <sup>2</sup> )	3367.46	1.03281e+6
Max h/d (μm)	0.26566	3.07357

Anexo 57. Acero Vanadis4 con tratamiento Dúplex. R12 Zona 1



Filename: DV01\_R12\_zona1.plux

Acquisition author: senso5

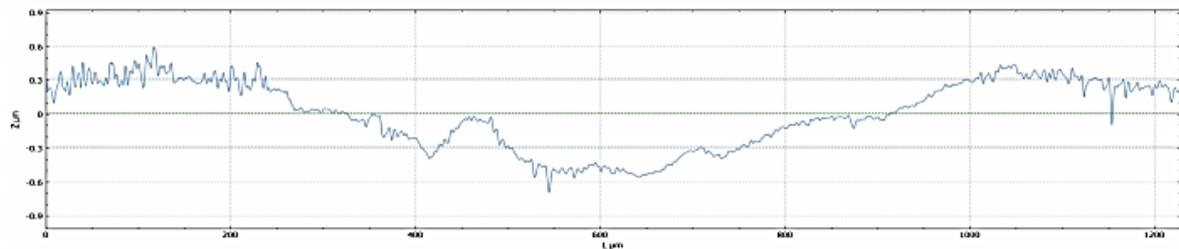
Analysis author:

Company name: Sensofar S.L.

Date: 2020-07-08 16:29:52

Analysis Software Version: 1.5.0.0

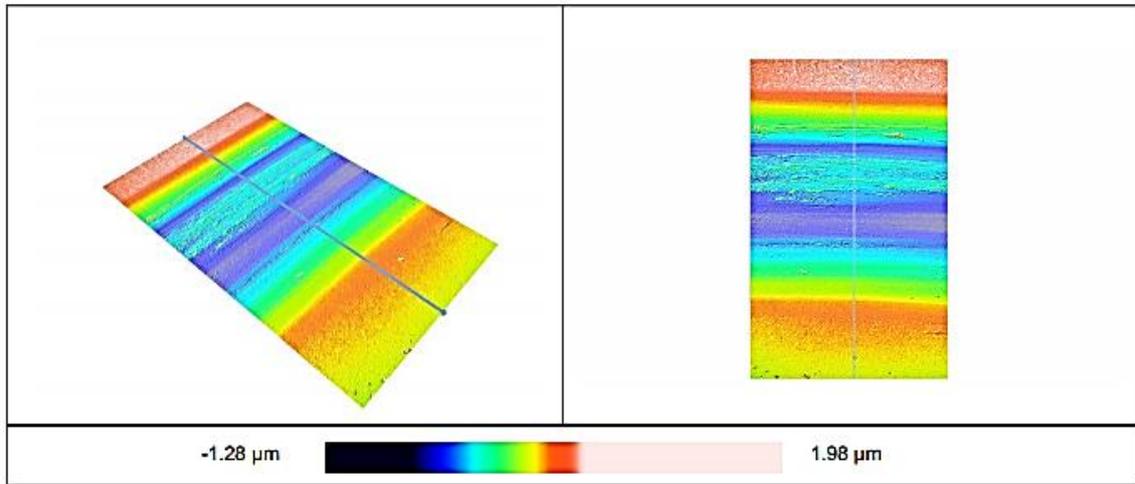
**Profile**



**Volume**

	Peak	Hole
Volume (μm <sup>3</sup> )	2717.01	310930
Area (mm <sup>2</sup> )	36194.6	668957
Max h/d (μm)	2.80751	1.53344

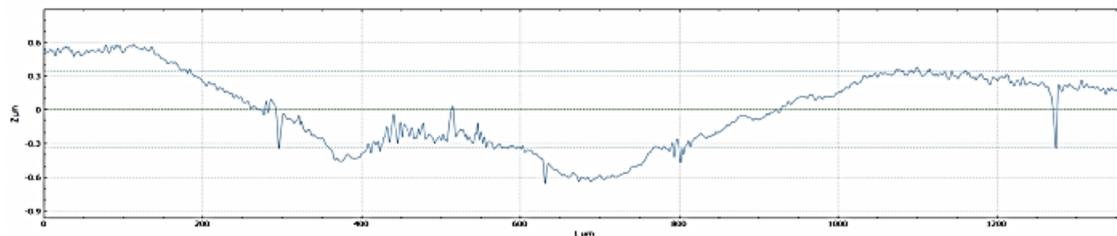
Anexo 58. Acero Vanadis4 con tratamiento Dúplex. R12 Zona 2



Filename: DV01\_R12\_zona2.plux  
 Acquisition author: senso5  
 Analysis author:

Company name: Sensofar S.L.  
 Date: 2020-07-08 16:31:14  
 Analysis Software Version: 1.5.0.0

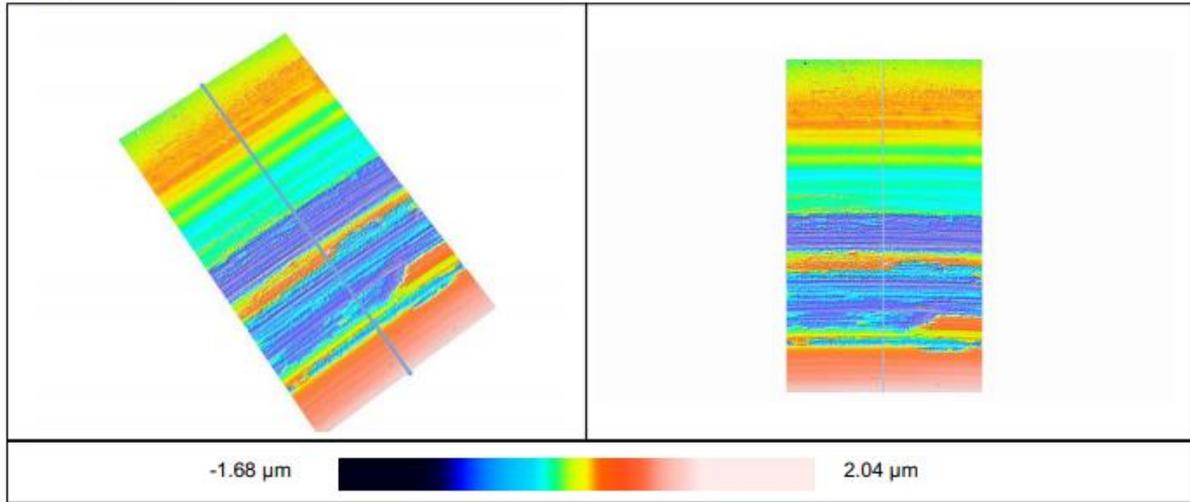
**Profile**



**Volume**

	Peak	Hole
Volume (μm <sup>3</sup> )	587.877	430396
Area (mm <sup>2</sup> )	23252.2	745532
Max h/d (μm)	0.582691	1.38271

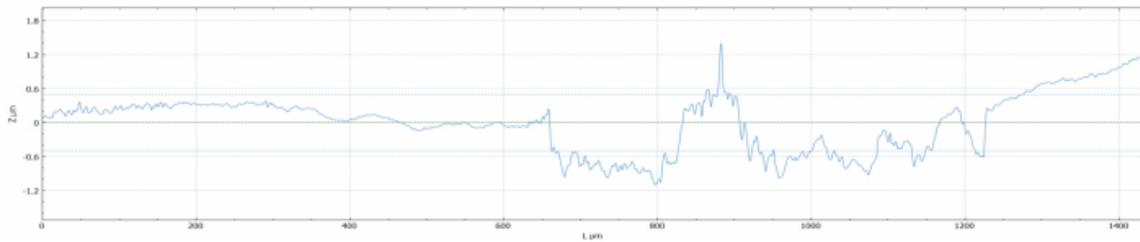
Anexo 59. Acero Vanadis4 con tratamiento Dúplex. R12 Zona 3



**Filename:** DV01\_R12\_zona3.plux  
**Acquisition author:** senso5  
**Analysis author:**

**Company name:** Sensofar S.L.  
**Date:** 2020-07-08 16:32:17  
**Analysis Software Version:** 1.5.0.0

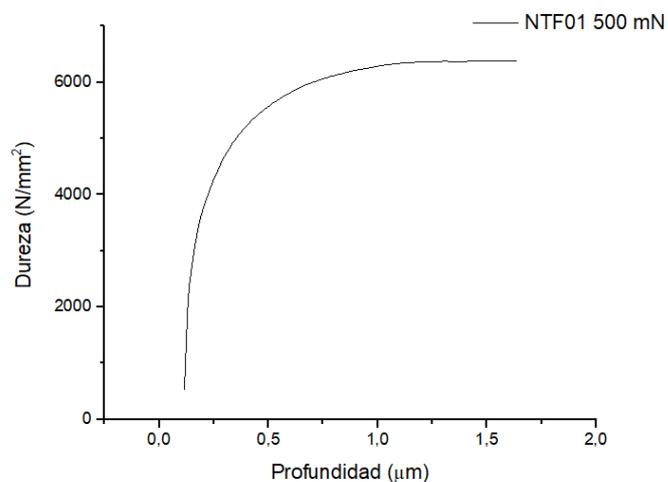
**Profile**



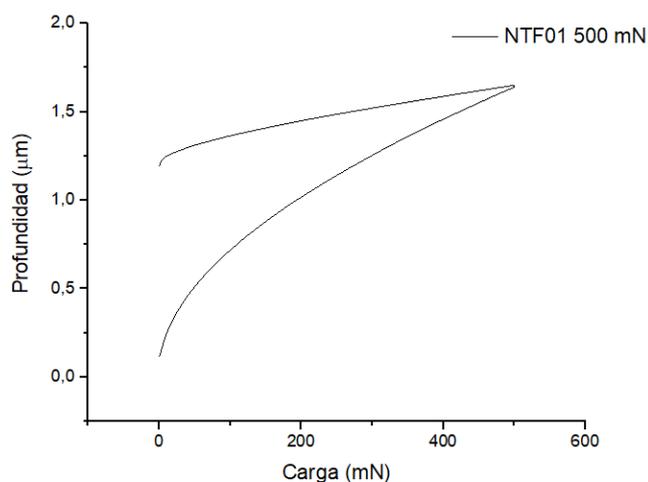
**Volume**

	Peak	Hole
Volume (μm <sup>3</sup> )	1000.86	625660
Area (mm <sup>2</sup> )	19043	818096
Max h/d (μm)	1.69858	1.9598

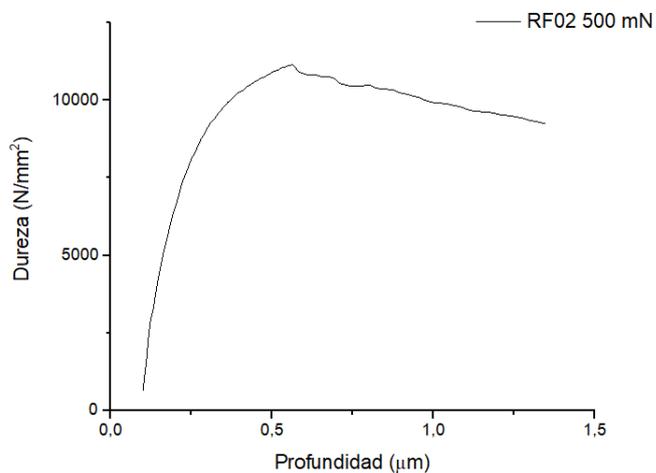
Anexo 60. Curva de dureza. Acero 1.2379 no tratado para 500 mN



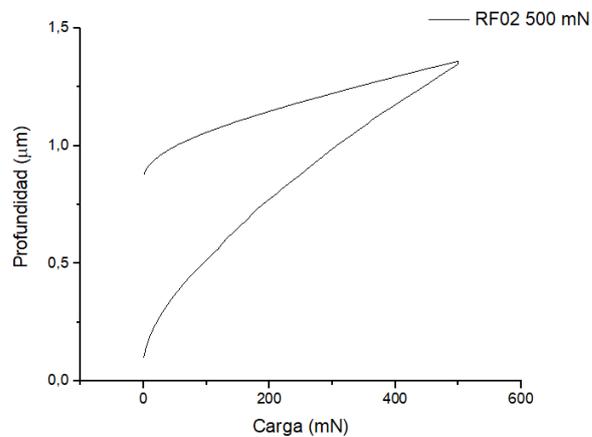
Anexo 61. Gráfica de carga y descarga. Acero 1.2379 no tratado, para 500 mN



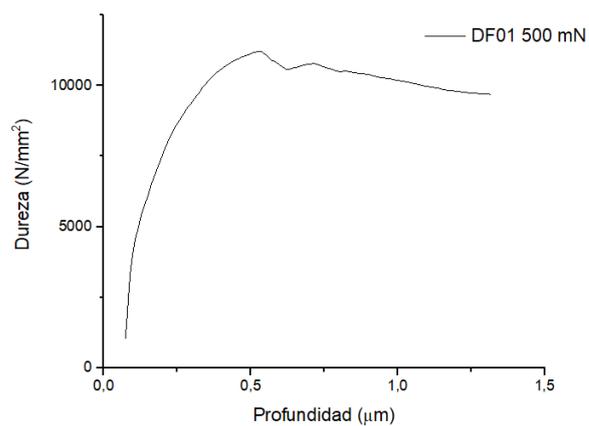
Anexo 62. Curva de dureza. Acero 1.2379 PVD para 500 mN



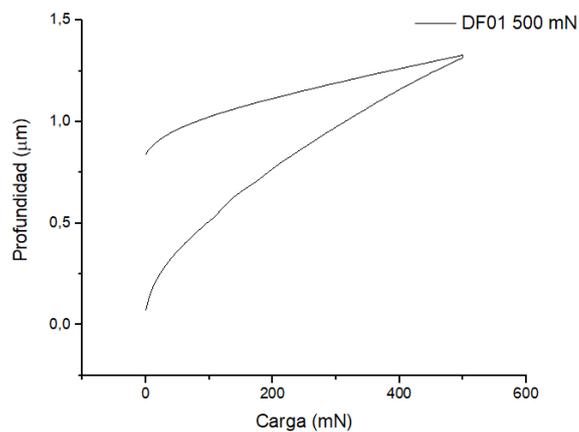
Anexo 63. Gráfica de carga y descarga. Acero 1.2379 PVD, para 500 mN



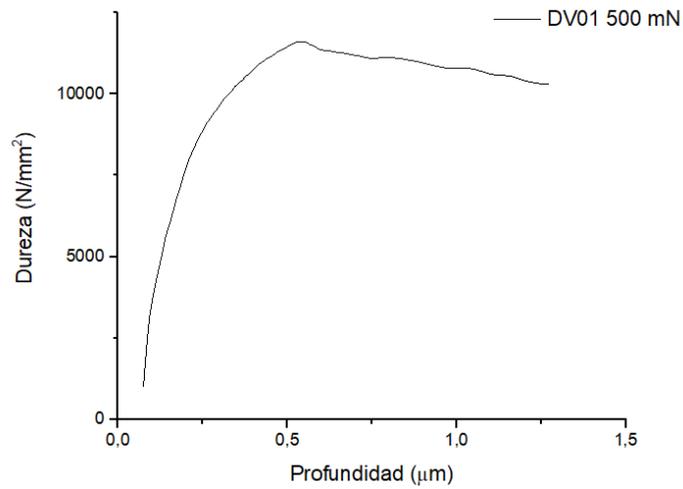
Anexo 64. Curva de dureza. Acero 1.2379 Dúplex para 500 mN



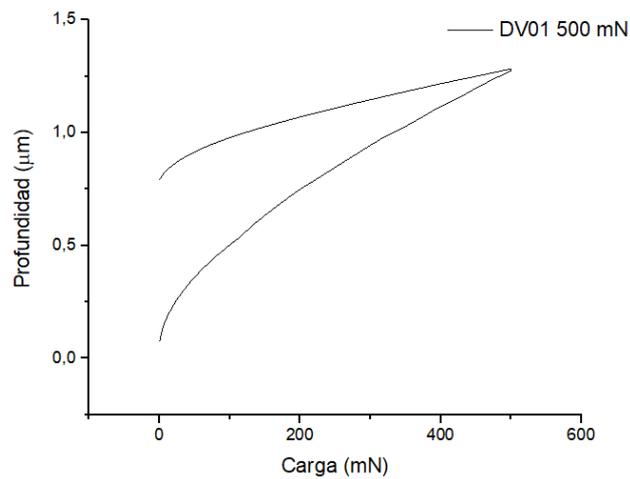
Anexo 65. Gráfica de carga y descarga. Acero 1.2379 Dúplex, para 500 mN



Anexo 66. Curva de dureza. Acero Vanadis4. Dúplex para 500 mN

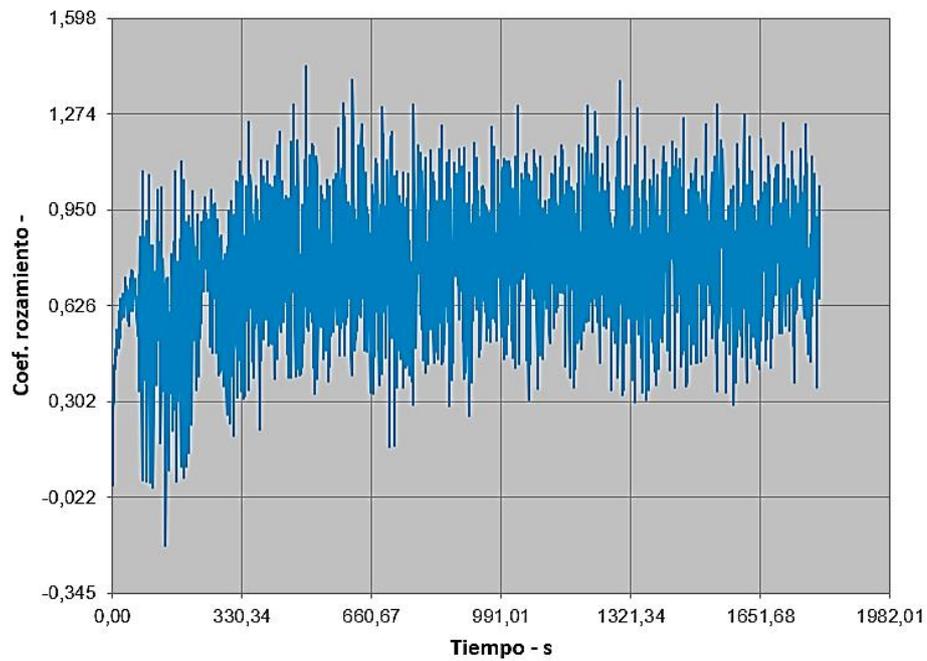


Anexo 67. Gráfica de carga y descarga. Acero Vanadis4 Dúplex, para 500 mN

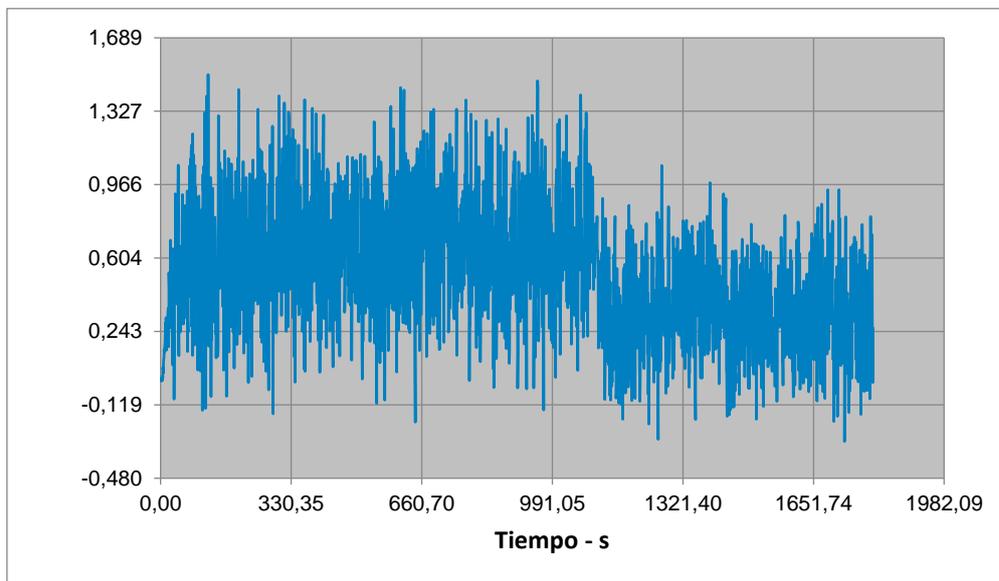


Gráficos obtenidos en el ensayo Pin on Disc

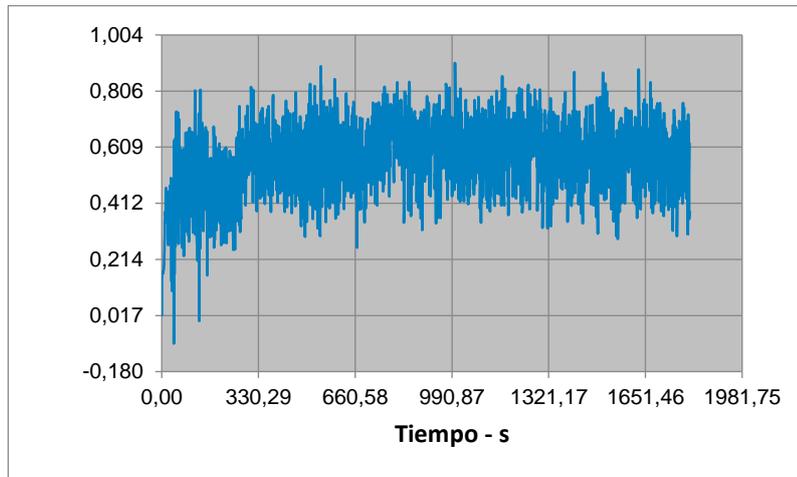
Anexo 68. Acero 1.2379 no tratado. R6



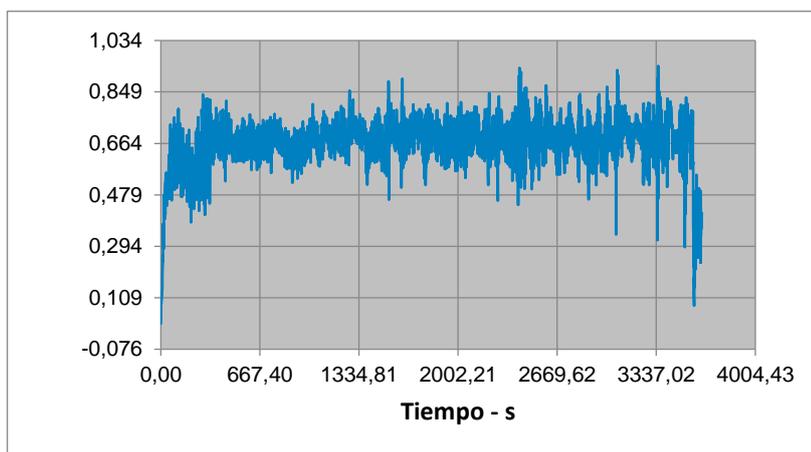
Anexo 69. Acero 1.2379, no tratado. R8



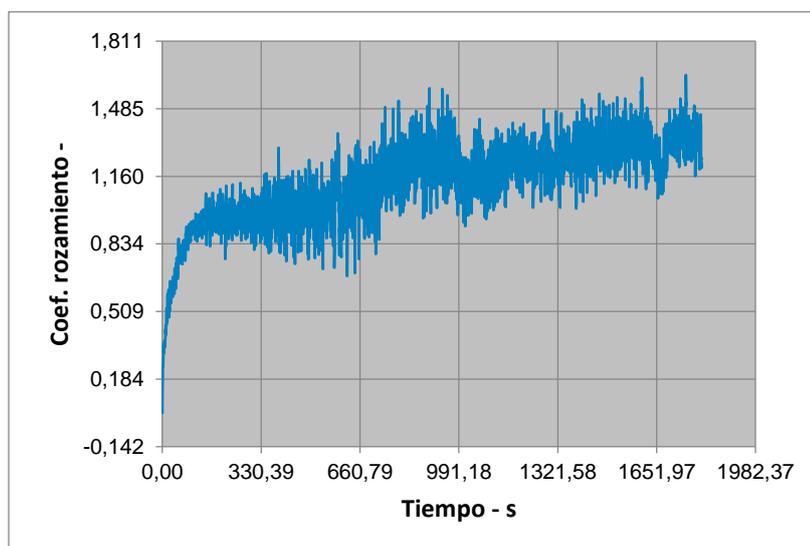
Anexo 70. Acero 1.2379, no tratado. R10



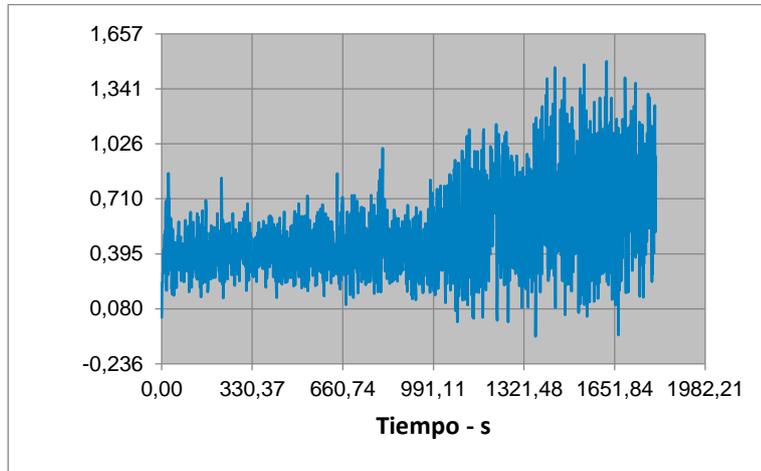
Anexo 71. Acero 1.2379, no tratado. R12



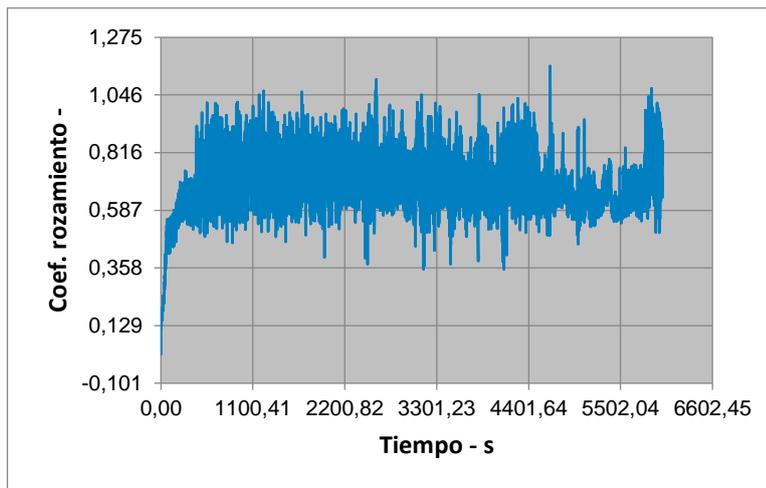
Anexo 72. Acero 1.2379, PVD. R6



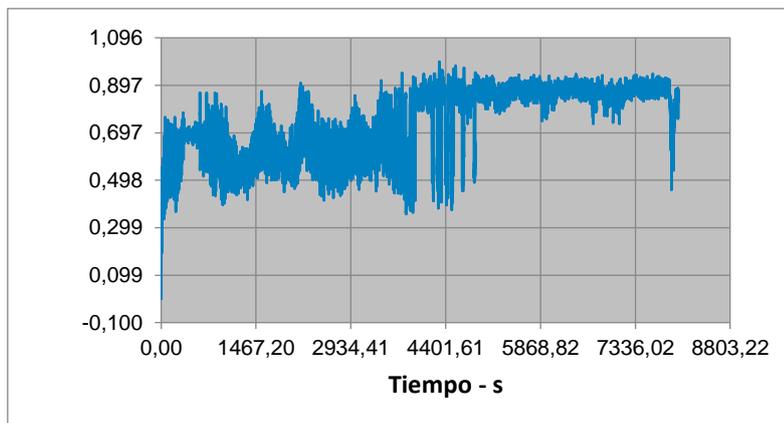
Anexo 73. Acero 1.2379, PVD. R8



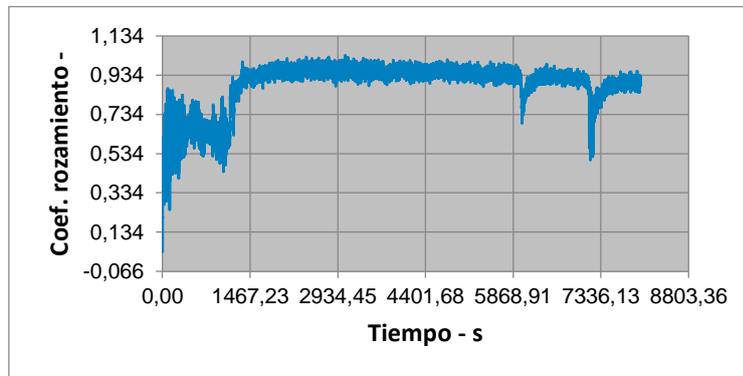
Anexo 74. Acero 1.2379, PVD. R10



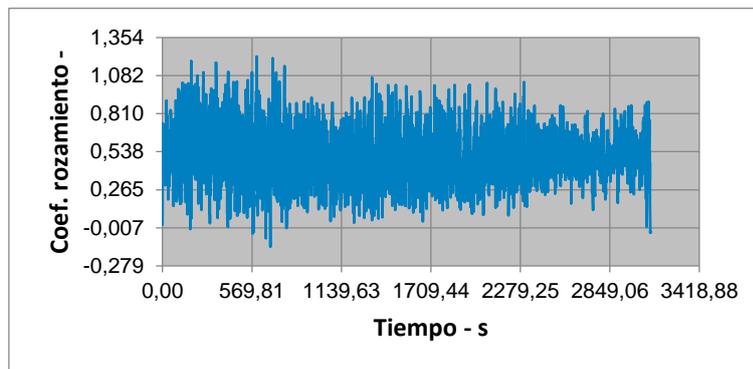
Anexo 75. Acero 1.2379, (RF02) PVD. R6



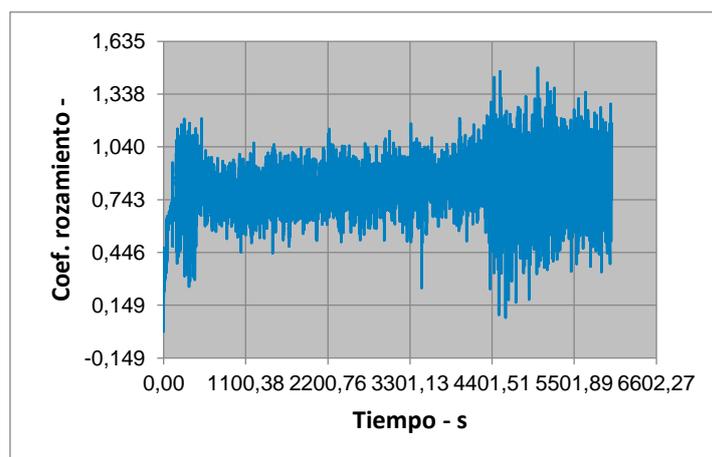
Anexo 76. Acero 1.2379, (RF02) PVD. R8



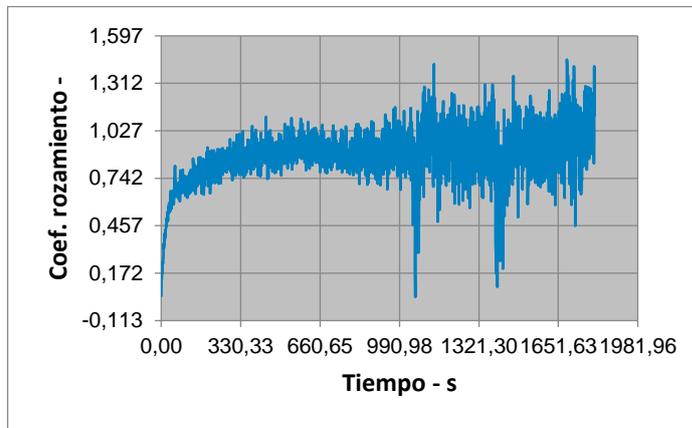
Anexo 77. Acero 1.2379, (RF02) PVD. R10



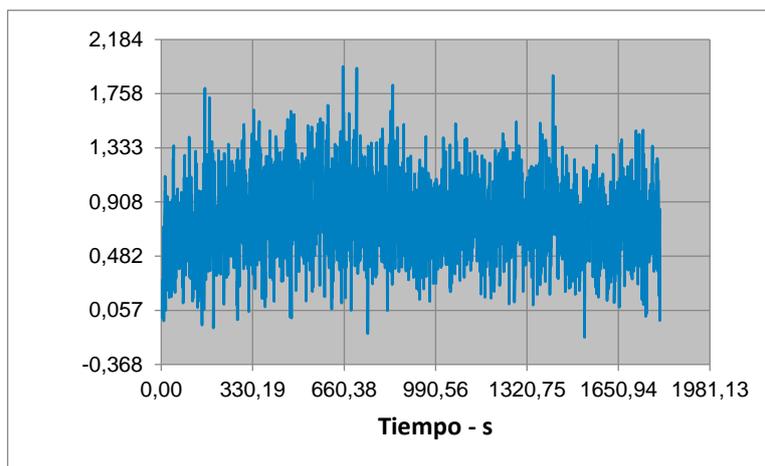
Anexo 78. Acero 1.2379, (RF02) PVD. R12



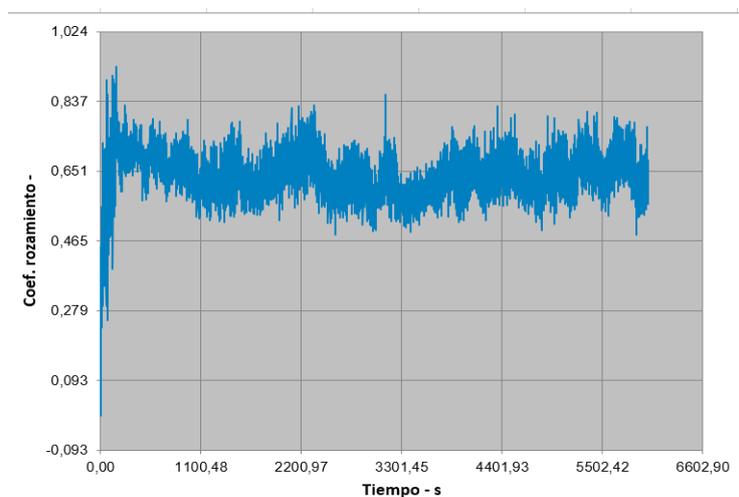
Anexo 79. Acero 1.2379, Dúplex. R6



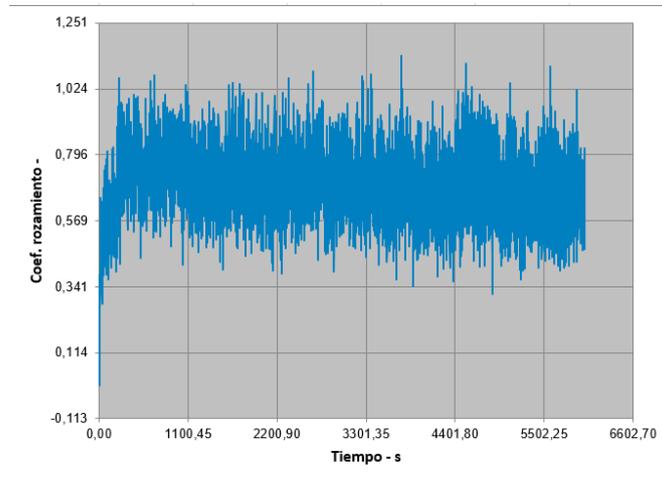
Anexo 80. Acero 1.2379, Dúplex. R8



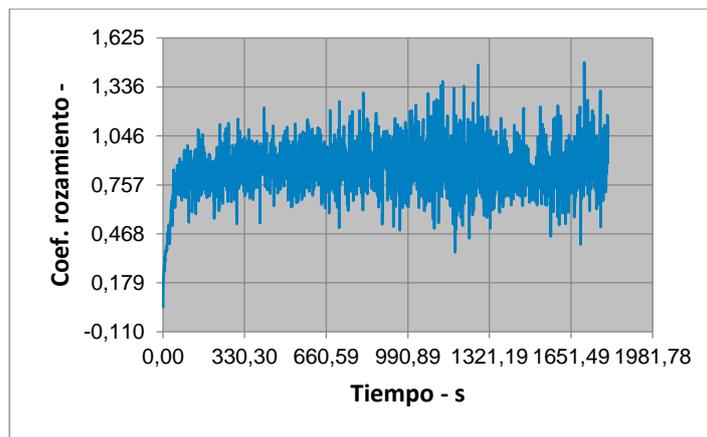
Anexo 80. Acero 1.2379, Dúplex. R10



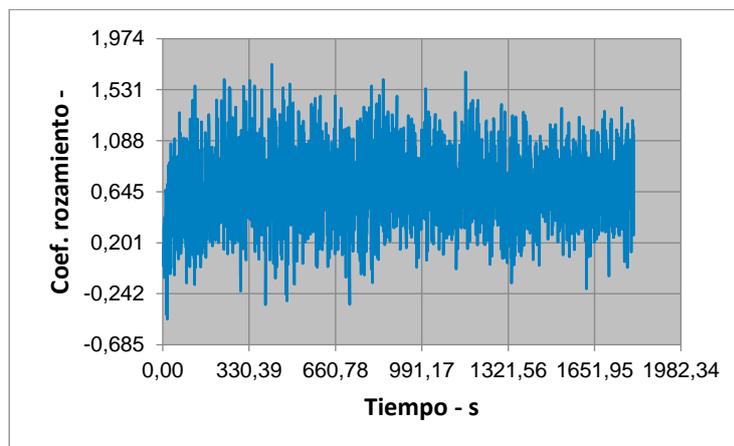
Anexo 81. Acero 1.2379, Dúplex. R12



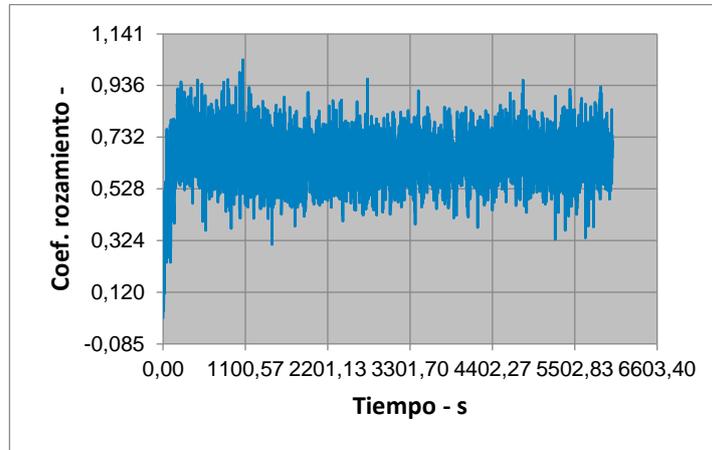
Anexo 81. Acero Vanadis4, Dúplex. R6



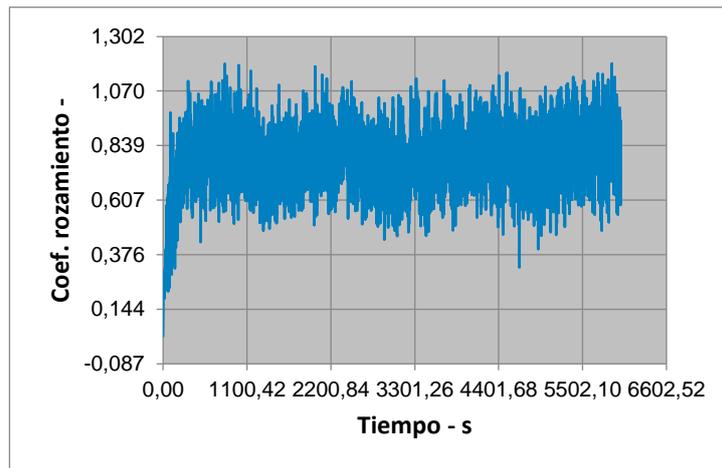
Anexo 82. Acero Vanadis4, Dúplex. R8



Anexo 83. Acero Vanadis4, Dúplex. R10



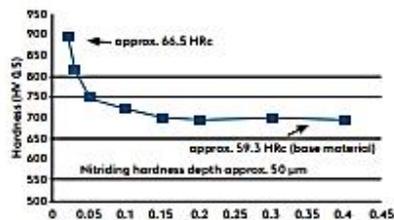
Anexo 84. Acero Vanadis4, Dúplex. R12



Anexo 85. Datos técnicos de Tratamiento Dúplex

# DUPLEX TREATMENT

The combination of a thermochemical process followed by deposition of an eifeler PVD coating is what we call "Duplex treatment".



Nitriding hardness, sample PN809, 1.2379

## PRODUCT FEATURES

- » A higher supportive effect for the hard coating, e.g. 1.2379 with 900 – 1200 HV under the hard coating. High-gloss polished finishes are preserved.
- » The ability to withstand pressure loads is significantly increased. This is particularly an advantage when working high-strength sheet metals, for example.
- » Due to a coating temperature of under 500 °C, the tools retain their high dimensional accuracy.

## APPLICATIONS

<b>Forming</b>	Tools are an application emphasis for which this procedure is now selected regularly and successfully for the forming of high-strength sheet metal materials. Duplex VARIANTIC and DUMATIC are typical examples.
----------------	--



## DUPLEX – COMBINATIONS

- \_\_\_\_\_ Duplex VARIANTIC
- \_\_\_\_\_ Duplex CrCN
- \_\_\_\_\_ Duplex TOPMATIC
- \_\_\_\_\_ Duplex CROSAL®
- \_\_\_\_\_ DUMATIC

voestalpine eifeler Coating GmbH  
 www.eifeler.com

voestalpine  
 ONE STEP AHEAD.

# VARIANTIC®

Titanium aluminium carbonitride –  
The multifunctional multilayer coating

Excellent cutting, forming, stamping and precision cutting results. The temperature resistant TiAlN underlayer, in conjunction with the hard and low-friction TiCN top layer, delivers a combination which presents clear advantages in numerous applications. In the area of cold forming in particular, excellent results are achieved when Duplex VARIANTIC is used.

## PRODUCT FEATURES

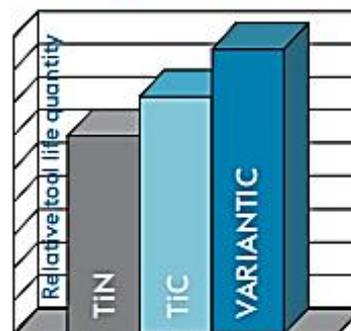
- » Can be deposited on HSS and hard metal
- » Substantial friction reduction
- » Multilayer structure
- » High wear resistance
- » Tough, hard, and temperature resistant up to 800 °C

## APPLICATIONS

<b>Cutting</b>	Reaming and milling of steels
<b>Punching and forming</b>	General applications in the area of sheet steel and cold forging; Duplex VARIANTIC recommended for high compressive stress in the tool



## TOOL LIFE QUANTITIES COMPARISON



Forming of hot rolled strip DD-13

## COATING PROPERTIES

<b>Hardness</b>	3,500 ± 500 HV
<b>Max. application temperature</b>	800 °C / 1,470 °F
<b>Coefficient of friction against steel</b>	0.2
<b>Coating thicknesses</b>	2 - 4 µm
<b>Colour</b>	antique pink



**Workpiece:**  
Hot rolled strip DD-13, 3 mm,  
280 -350 N/mm<sup>2</sup>

**Tool:**  
P11 steel, 62-63 HRc,  
Ø 170 mm x 150 mm

# TiCN

Titanium carbonitride – The complex multilayer structure coating

Our TiCN is a coating with a complex multilayer structure applied using the arc technique. Despite its great hardness, TiCN is not excessively brittle. This is necessary for numerous applications, such as in interrupted cutting operations when temperatures at the cutting edge are not excessive. Thanks to the reduced friction and enhanced hardness, the use of TiCN coatings often result in a further significant service life extension compared to TiN coated tools.

**PRODUCT FEATURES**

- » Very high hardness
- » High adhesive strength
- » Good wear resistance
- » Improved toughness
- » Low friction coefficient
- » High heat conductivity

**APPLICATIONS**

<b>Cutting</b>	Milling, turning, drilling and cutting tools for the working of high and low alloy steels. High feed rates and high cutting speeds when temperatures at the cut edges are not excessive. Highly suitable for HSS milling cutters in cooled steel machining.
<b>Forming</b>	Suitable for drawing, stamping, pressing and forming tools for the working of high and low alloy steels. Provides excellent performance with various applications in cold forming of steel and stainless steel.

**COATING PROPERTIES**

<b>Hardness</b>	3,500 ± 500 HV
<b>Max. application temperature</b>	400 °C / 750 °F
<b>Coefficient of friction against steel</b>	0.2
<b>Coating thicknesses</b>	1 - 4 µm
<b>Colour</b>	blue-grey

