# TRIBANO

2019/

20

## EFECTO DE LA TEMPERATURA EN EL COMPORTAMIENTO TRIBOLÓGICO CON LA MORFOLOGÍA DE CAPAS ANÓDICAS.

Nº Expte: IMDEEA/2019/65 Programa: PROYECTOS DE I+D EN COOPERACIÓN CON EMPRESAS

# Paquete de trabajo 7 – Caracterización y validación de recubrimientos desarrollados.

Entregable: E7.1. – Informe final de resultados completos del proyecto.

### Breve descripción.

Caracterización y determinación de los productos obtenidos, necesarios para determinar la idoneidad del proceso aplicado. El estudio de las propiedades y comportamiento estará enfocado desde el punto de vista de la obtención de capas anódicas estructuradas, orientadas, homogéneas y compactas, analizadas bajo niveles macroscópico, microscópico y nanométrico. Análisis previo y post al ensayo tecnológico tribológico, que nos reporte el conocimiento necesario de mejora.

Realizado por: AIDIMME





UNIÓN EUROPE Fondo Europeo de Desarrollo Regional

AIDIMME

### Contenido

1	Objet	tivos	8
2	Proce	edimiento	8
	2.3 F	Relación del espesor del anodizado con el tiempo:	.11
	2.4	Material base empleado en los anodizados	.12
2	Activ	vidados roalizadas	12
5	ALUV		.15
4	Cara	icterización estructural de las capas anódicas	.14
	4.1 I	Recubrimientos Industriales	.14
	4.1.1	Comparativa de temperatura y presencia de aditivo	14
	4.1.	1.1.1 Microscopía óptica (MO) de los anodizados	14
	4.1.	1.1.2 resultados de microscopía electrónica (SEM)	15
	4.1.	.1.3 Análisis de resultados por microscopía de fuerza atómica, AFM	15
	4.1.2	Comparativa de temperaturas y voltaje de anodizado más bajo:	17
	4.1.	L.2.1 Microscopía óptica (MO) de los anodizados	17
	4.1.	L.2.2 Microscopía Electrónica (SEM)	18
	4.1.	Microscopía de Fuerza Atómica (AFM) de los anodizados	18
	4.1.3	Comparativa de superficies previamente pulidas:	21
	4.1.	L.3.1 Microscopía óptica (MO)	21
	4.1.	L.3.2 Microscopía Electrónica (SEM)	21
	4.1.	L.3.3 Microscopía de Fuerza Atómica (AFM)	22
	4.2 F	Recubrimientos Desarrollados	.23
	4.2.1	Placas anodizadas a baja temperatura	23
	4.2.	2.1.1 Microscopía óptica (MO) de los anodizados	23
	4.2.	2.1.2 Microscopía electrónica (SEM) de los anodizados	24
	4.2.	2.1.3 Microscopía de Fuerza Atómica (AFM) de los anodizados	25
	4.2.2	Placas anodizadas añadiendo aditivo	26
	4.2.	2.2.1 Microscopía óptica (MO) de los anodizados	26
	4.2.	2.2.2 Microscopía electrónica (SEM) de los anodizados	27
	4.2.	2.2.3 Microscopía de Fuerza Atómica (AFM) de los anodizados	28
	4.2.3	Caracterización de las propiedades corrosivas	31
5	Cara	ncterización tribológica superficial de capas anódicas	.33
	51 (	Caracterización tribológica superficial de placas AW 1200 apodizadas temperat	
	superior	or a la ambiente.	.33
	- 	Caracterización tribológica cuporficial de placas AW 1300 apodizadas a k	i.
	tempera	caracterización tribologica superficial de placas AW 1200 anodizadas a c	.34
		Constants in the lifetime constituted as allows ANV 4200 and includes a field a	
	5.3 (	Caracterización tribologica superficial de placas AW 1200 anodizadas anadiei	ndo
	aditivo.		.34
	5.3.1	Añadiendo 10 g/l de aditivo, caracterización a temperatura ambiente	34
	5.3.2	Añadiendo 10 g/L de aditivo, caracterización a baja temperatura	35
	5.3.3	Añadiendo 20 g/L de aditivo, caracterización a temperatura ambiente	36
	5.3.4	Añadiendo 20 g/L de aditivo, caracterización a baja temperatura	37
	5.3.5	Añadiendo 30 g/L de aditivo, caracterización a temperatura ambiente	38
	5.3.6	Anadiendo 30 g/L de aditivo, caracterización a temperatura mas baja	39







	5.4	Caracterización tribológica superficial de una muestra extrusionada industrial40
	5.5 condici	Caracterización tribológica superficial de material industrial con diferentes ones de electro-pulido41
6	Care	acterización a Temperatura42
	6.1	Caracterización tribológica superficial a temperatura de 50°C42
	6.1.1	AÑADIENDO 10 G/L DE ADITIVO, CARACTERIZACIÓN A 50°C
	6.1.2	AÑADIENDO 20 G/L DE ADITIVO, CARACTERIZACIÓN A 50°C44
	6.1.3	AÑADIENDO 30 G/L DE ADITIVO, CARACTERIZACIÓN A 50°C45
	6.2	Caracterización tribológica superficial a 100°C de temperatura47
	6.2.1	AÑADIENDO 10 G/L DE ADITIVO, CARACTERIZACIÓN A 100°C
	6.2.2	AÑADIENDO 20 G/L DE ÁCIDO BÓRICO, CARACTERIZACIÓN A 100°C
	6.2.3	AÑADIENDO 30 G/L DE ADITIVO, CARACTERIZACIÓN A 100°C50
	6.3	Caracterización tribológica de material industrial a temperatura51
	6.3.1	CARACTERIZACIÓN TRIBOLÓGICA A 50°C, PIEZAS ELECTRO-PULIDAS (24V/63C, 30V/63C)
	Y AN	ODIZADAS A 22°C, 15V
	6.3.2	Caracterización tribológica a 100°C, PIEZAS ELECTRO-PULIDAS (24V/63C, 30V/63C) Y
	ANO	DIZADAS A 22°C, 15V
	6.3.3	Caracterización tribológica a 25°C en piezas de diferente temperatura de anodizado52
	6.3.4	Caracterización tribológica a 100°C en piezas de diferente temperatura de anodizado53
	6.4	Caracterización superficial de las capas anódicas, post aplicación de ensayo
	triboló	gico54
	6.4.1	Caracterización mediante microscopía óptica (MO) para la pieza electropulida a 24V/63C.
	617	54 Caracterización mediante microsconía óntica (MO) nara la nieza electronulida 201//62C
	0.4.2	55
7	Valo	pración y análisis de resultados57
	7.1	Comparación de resultados57
R	esumer	n. Conclusiones







LISTADO DE FIGURAS	
FIGURA 1 ETAPAS DEL PROCESO DE ANODIZADO CONVENCIONAL	8
Figura 2 Esquema de la etapa de anodizado	9
FIGURA 3 ETAPAS DE PRETRATAMIENTOS ANTES DE LA ETAPA DEL ANODIZADO, DONDE EXISTEN DOS LÍNEAS, CON O SIN PI	JLIDO
SUPERFICIAL	9
FIGURA 4 FASES DEL PROCESO DEL DOBLE ANODIZADO	10
FIGURA 5 VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA CON EL TIEMPO DE ANODIZADO	11
Figura 6 Variación de la velocidad de disolución ( $V_{DS}$ ) y oxidación ( $V_{OX}$ ) con el tiempo (t)	11
FIGURA 7 RELACIÓN DEL TIEMPO DE ANODIZADO CON EL ESPESOR DE LA CAPA ANÓDICA	12
FIGURA 8 CARACTERIZACIÓN POR MICROSCOPÍA ÓPTICA MO.	15
FIGURA 9 CARACTERIZACIÓN POR MICROSCOPÍA SEM. TEMPERATURA Y ADITIVO	15
FIGURA 10 CARACTERIZACIÓN AFM, 15°C / 16 V	16
FIGURA 11 CARACTERIZACIÓN AFM PIEZA 21°C/ 16V	16
FIGURA 12 CARACTERIZACIÓN AFM, SIN ADITIVO, 15°C/17V	17
FIGURA 13 CARACTERIZACIÓN AFM, CON ADITIVO, 15°C/17V	17
FIGURA 14 CARACTERIZACIÓN POR MICROSCOPÍA MO. ESTUDIO DE DISPERSIÓN DE TEMPERATURA.	18
FIGURA 15 CARACTERIZACIÓN POR MICROSCOPÍA SEM. ESTUDIO DE DISPERSIÓN DE TEMPERATURA.	18
FIGURA 16 MICROSCOPÍA DE FUERZA ATÓMICA AFM REFERENCIA 15°C/14V	19
FIGURA 17 MICROSCOPÍA DE FUERZA ATÓMICA AFM 21°C/14V	20
FIGURA 18 CARACTERIZACIÓN AFM REFERENCIA 15°C/17V.	20
FIGURA 19 CARACTERIZACIÓN POR MICROSCOPÍA MO. ESTUDIO DE DIFERENTE ELECTROPULIDO.	21
FIGURA 20 CARACTERIZACIÓN POR MICROSCOPÍA SEM. ESTUDIO DE DIFERENTE ELECTROPULIDO.	21
FIGURA 21 MICROSCOPÍA DE FUERZA ATÓMICA AFM PARA LA MUESTRA 24V/63C CON ÁREAS DE 50 Y 10	μM <sup>2</sup>
RESPECTIVAMENTE.	22
FIGURA 22 MICROSCOPÍA DE FUERZA ATÓMICA AFM PARA LA MUESTRA 30V/63C CON ÁREAS DE 50 Y 10	μM <sup>2</sup>
RESPECTIVAMENTE.	22
FIGURA 23 RELACIÓN DEL TIEMPO DE ANODIZADO CON EL ESPESOR DE LA CAPA ANÓDICA PARA EL ENSAYO EN FRIO	23
FIGURA 24 CARACTERIZACIÓN POR MICROSCOPÍA ÓPTICA DE LAS PIEZAS	24
FIGURA 25 CARCATERIZACIÓN POR MICROSCOPÍA ELECTRÓNICA SEM DE LAS PIEZAS.	25
Figura 26 Microscopía de fuerza atómica AFM para la placa 20 min frío con áreas de 50 y 10	μM <sup>2</sup>
– RESPECTIVAMENTE	25
FIGURA 27 MICROSCOPÍA DE FUERZA ATÓMICA AFM PARA LA PLACA A 10+20 MIN FRIO, CON ÁREAS DE 50 Y 10	) μM <sup>2</sup>
RESPECTIVAMENTE.	26
FIGURA 28 CARACTERIZACIÓN POR MICROSCOPÍA ÓPTICA DE LAS PIEZAS	27
FIGURA 29 CARCATERIZACIÓN POR MICROSCOPÍA ELECTRÓNICA SEM DE LAS PIEZAS.	28
FIGURA 30 MICROSCOPÍA DE FUERZA ATÓMICA AFM PARA LA PLACA A 20 MIN Y ADITIVO/20 G/L A TEMPERATURA SUPI	ERIOR
A LA AMBIENTE, CON ÁREAS DE 50 Y 10 $\mu$ m <sup>2</sup> respectivamente	28
FIGURA 31 MICROSCOPÍA DE FUERZA ATÓMICA AFM PARA LA PLACA A 20 MIN Y ADITIVO/20 G/L EN FRIO CON ÁREAS I	DE 50
Υ 10 μM <sup>2</sup> RESPECTIVAMENTE	29
FIGURA 32 MICROSCOPÍA DE FUERZA ATÓMICA AFM PARA LA PLACA A 10+20 MIN Y ADITIVO/20 G/L EN FRIO CON ÁRE	AS DE
50 γ 10 μm <sup>2</sup> respectivamente	30
FIGURA 33 CURVAS DE POLARIZACIÓN E IMPEDANCIA.	32
FIGURA 34 COEFICIENTE DE FRICCIÓN VERSUS LA VELOCIDAD (60 Y 100 RPM) Y CARGA 1.5N. SP= SIN PULIR Y P=PULIDA	۰33
FIGURA 35 COEFICIENTE DE FRICCIÓN VERSUS LA VELOCIDAD (60 Y 100 RPM) Y CARGA 2 N. SP= SIN PULIR Y P=PULIDA	34
FIGURA 36 COEFICIENTE DE FRICCIÓN VERSUS LA VELOCIDAD Y LA CARGA PARA EL ENSAYO EN FRIO	34
FIGURA 37 RELACIÓN DEL TIEMPO DE ANODIZADO CON EL ESPESOR OBTENIDO AL AÑADIR 10 G/L DE ADITIVO	35
FIGURA 38 COEFICIENTE DE FRICCIÓN Y TASA DE DESGASTE FRENTE A LA VELOCIDAD AL AÑADIR 10 G/L DE ADITIVO	35
Figura 39 Relación del tiempo de anodizado con el espesor obtenido al añadir 10 g/L de aditivo, ensa	/O EN
, , , , , , , , , , , , , , , , , , ,	36
FIGURA 40 COEFICIENTE DE FRICCIÓN Y TASA DE DESGASTE VERSUS LA VELOCIDAD CON 10 G/L DE ADITIVO. ENSAYO EN	FRÍO.
	36
FIGURA 41 RELACIÓN DEL TIEMPO DE ANODIZADO CON EL ESPESOR OBTENIDO AL AÑADIR 20 G/L DE ADITIVO	36
FIGURA 42 COEFICIENTE DE FRICCIÓN Y TASA DE DESGASTE FRENTE A LA VELOCIDAD AL AÑADIR 20 G/L DE ADITIVO	37







Figura 43 Relación del tiempo de anodizado con el espesor obtenido al añadir 20 g/L de aditivo, ensa frío.	37
FIGURA 44 COEFICIENTE DE FRICCIÓN Y TASA DE DESGASTE FRENTE A LA VELOCIDAD AÑADIENDO 20 G/L DE ADITIVO, EN	vsayo 38
FIGURA 45 RELACIÓN DEL TIEMPO DE ANODIZADO CON EL ESPESOR OBTENIDO AL AÑADIR 30 G/L DE ADITIVO	38
FIGURA 46 COEFICIENTE DE FRICCIÓN Y TASA DE DESGASTE FRENTE A LA VELOCIDAD AL AÑADIR 30 G/L DE ADITIVO	39
FIGURA 47 RELACIÓN DEL TIEMPO CON EL ESPESOR OBTENIDO AL AÑADIR 30 G/L DE ADITIVO. ENSAYO AL FRÍO.	39
FIGURA 48 COFFICIENTE DE ERICCIÓN Y TASA DE DESGASTE ERENTE A LA VELOCIDAD ORTENIDA AL AÑADIR 30 G/L DE AD	
	40
Είστισα 49 Ωρεεισιεντε σε ερισσιόν ερεντει νει οσίσασι ν σάρσα σάσα τα μιεστρά εντριισιονίασα (σιμισα) σιν σιμμ	D) /1
FIGURA 49 COEFICIENTE DE ENICIÓN EN ELINCIÓN DE LA VELOCIDAD Y LA CARCA PARA LA NIDESTRA EXTROSIONADA (POLIDA, SIN POLI	NJ.41
EICURA 50 COEFICIENTE DE ENICCIÓN EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD Y LA CARCA PARA LA PLACA 24V-05C	
FIGURA 51 COEFICIENTE DE FRICCIÓN EN FUNCION DE LA VELOCIDAD Y LA CARGA PARA LA PLACA 50V/05C	42
A TADIO 10 C LI DE ADITIVO	
ANADIR 10 G/L DE ADITIVO.	43
AÑADIR 10 G/L DE ADITIVO. ENSAYO EN FRÍO	43
FIGURA 54 COEFICIENTE DE FRICCIÓN Y TASA DE DESGASTE FRENTE A LA VELOCIDAD PARA 50°C EN PLACAS ANODIZAD	)as al
añadir 20 g/L de aditivo	44
FIGURA 55 COEFICIENTE DE FRICCIÓN Y TASA DE DESGASTE FRENTE A LA VELOCIDAD PARA 50°C EN PLACAS ANODIZAD	DAS AL
ANADIR 2U G/L DE ADITIVO. ENSAYO EN FRIO	45
FIGURA 56 COEFICIENTE DE FRICCION Y TASA DE DESGASTE FRENTE A LA VELOCIDAD PARA 50°C EN PLACAS ANODIZAE	)AS AL
añadir 30 g/L de aditivo.	46
FIGURA 57 COEFICIENTE DE FRICCIÓN Y TASA DE DESGASTE FRENTE A LA VELOCIDAD PARA 50°C EN PLACAS ANODIZAD	)AS AL
añadir 30 g/L de aditivo. Ensayo en frío	46
FIGURA 58 COEFICIENTE DE FRICCIÓN Y TASA DE DESGASTE FRENTE A LA VELOCIDAD PARA 100°C EN PLACAS ANODIZAE	)AS AL
AÑADIR 10 G/L DE ADITIVO	47
FIGURA 59 COEFICIENTE DE FRICCIÓN Y TASA DE DESGASTE FRENTE A LA VELOCIDAD PARA 100ºC EN PLACAS ANODIZAE	)AS AL
AÑADIR 10 G/L DE ADITIVO, ENSAYO EN FRÍO	48
FIGURA 60 COEFICIENTE DE FRICCIÓN Y TASA DE DESGASTE FRENTE A LA VELOCIDAD PARA 100ºC EN PLACAS ANODIZAD	)AS AL
añadir 20 g/L de aditivo	49
Figura 61 Coeficiente de fricción y tasa de desgaste para 100ºC en placas anodizadas al añadir 20 g	/L de
ADITIVO, ENSAYO EN FRÍO	49
Figura 62 Coeficiente de fricción y tasa de desgaste para 100ºC en placas anodizadas al añadir 30 g	/L de
ADITIVO	50
Figura 63 Coeficiente de fricción y tasa de desgaste para 100°C en placas anodizadas al añadir 30 g	/L de
ADITIVO, ENSAYO EN FRÍO	51
FIGURA 64 COEFICIENTE DE FRICCIÓN Y TASA DE DESGASTE CON LA VELOCIDAD A 50°C PARA LAS PIEZAS COMERC	CIALES
24V/63C y 30V/63C	52
FIGURA 65 COEFICIENTE DE FRICCIÓN Y TASA DE DESGASTE CON LA VELOCIDAD A 100°C PARA LAS PIEZAS COMERCIALES N	VEGRA
Y DORADA	52
FIGURA 66 COEFICIENTE DE FRICCION Y TASA DE DESGASTE PARA 50°C DE LAS PIEZAS A DIFERENTE TEMPERATURA Y VO	LTAJE.
Figura 67 Coeficiente de fricción y tasa de desgaste con la velocidad a 100°C para las piezas con dife	RENTE
TEMPERATURA Y VOLTAIE	53
FIGURA 68 MICROGRAFÍAS MO PARA LA PIEZA $24V/63C$ post ensayo triboi ógico a 50 y 100°C	55
FIGURA 69 MICROGRAFÍAS MO PARA LA PIEZA 30V/63C POST ENSAVO TRIBOLÓGICO A 50 Y 100°C	56
FIGURA 70 GRÁFICA COMPARATIVA DEL ESPESOR VS TIEMPO V ADITIVO	57
FIGURA 71 GRÁFICA COMPARATIVA DE LA HOMOGENEIDAD DE LA CAPA ΑΝΟΠΙCA VS VOLTA JE V ΤΕΜΡΕΡΑΤΙ ΙΡΑ	58
FIGURA 72 GRÁFICA COMPARATIVA DE LA HOMOGENEIDAD DE LA CAPA ΑΝΙÓDICA VS ΤΕΜΡΕΡΑΤΙ ΙΡΑ Υ ΑΠΙΤΙVO	58
	58
FIGURA 73 GRÁFICA DE LA EVOLUCIÓN DEL COFEICIENTE DE ERICCIÓN EN ELINCIÓN DE LA TEMPEDATURA	50 50
FIGURA 74 GRÁFICA DE LA TASA DE DESGASTE VS TEMPERATURA V VOLTAIE	 60
FIGURA 75 GRÁFICA TASA DE DESGASTE DEL ELECTROPULIDO VS TEMPERATURA	60







FIGURA 76 GRAFICA DE LA EVOLUCIÓN DE LA TASA DE DESGASTE EN FUNCIÓN DEL ADITIVO	61
FIGURA 77 GRAFICA DE LA EVOLUCIÓN DE LA TASA DE DESGASTE DEL ADITIVO VS TEMPERATURA	61







### LISTADO DE TABLAS

TABLA 1 RELACIÓN DEL TIEMPO DE ANODIZADO CON EL ESPESOR DE LA CAPA ANÓDICA.	12
TABLA 2 RELACIÓN DEL TIEMPO DE ANODIZADO CON EL ESPESOR DE LA CAPA ANÓDICA PARA EL ENSAYO EN FRÍO	23
TABLA 3 RESUMEN DE DATOS DE CORROSIÓN	32
TABLA 4 RELACIÓN DEL TIEMPO DE ANODIZADO CON EL ESPESOR OBTENIDO AÑADIENDO 10 G/L DE ADITIVO	35
TABLA 5 RELACIÓN DEL TIEMPO DE ANODIZADO CON EL ESPESOR OBTENIDO AÑADIENDO 10 G/L DE ADITIVO ENSAYO	) en frío. 35
TABLA 6 RELACIÓN DEL TIEMPO DE ANODIZADO CON EL ESPESOR OBTENIDO AÑADIENDO 20 G/L DE ADITIVO	
TABLA 7 RELACIÓN DEL TIEMPO DE ANODIZADO CON EL ESPESOR OBTENIDO AÑADIENDO 20 G/L DE ADITIVO, ENSAYO	D AL FRÍO. 37
TABLA 8 RELACIÓN DEL TIEMPO DE ANODIZADO CON EL ESPESOR OBTENIDO AÑADIENDO 30 G/L DE ADITIVO	
TABLA 9 RELACIÓN DEL TIEMPO DE ANODIZADO CON EL ESPESOR OBTENIDO AÑADIENDO 30 G/L DE ADITIVO, ENSAYO	D AL FRÍO. 39







### 1 Objetivos

- Desarrollo de capas anódicas estructurales y ordenadas, con propiedades mejoradas con respecto a las convencionales en cuanto a su comportamiento tribológico en gradientes de temperatura.
- Relacionar la generación de las capas anódicas anteriores con otros factores como corriente, tiempo, temperatura, electrolito, sellado, etc..
- Relacionar las propiedades tribológicas con la morfología y composición de las capas anódicas

### 2 Procedimiento

### 2.1 Proceso de aplicación de capas anódicas. Proceso convencional

La anodización es un proceso electrolítico que genera un crecimiento de una capa de óxido de aluminio con estructura hexagonal, prisma hexagonal, con nanoporo en el centro. Los poros formados son paralelos entre ellos y perpendiculares a la superficie del aluminio. Su estructura depende del electrolito, concentración, temperatura, intensidad, , duración, etc.



Figura 1 Etapas del proceso de anodizado convencional







TRIBANO Efecto de la temperatura en el comportamiento tribológico con la morfología de capas anódicas.



Figura 2 Esquema de la etapa de anodizado

El estado superficial del material base, interviene en el crecimiento de la capa anódica, la rugosidad es un factor importante en el ordenamiento del crecimiento de la capa anódica, de ahí que previo a la etapa de anodizado se tomen dos vías comparativas en el pretratamiento, una vía sin pulido superficial y otra con pulido superficial, químico o electropulido. El esquema nº 3 representa las etapas del pretratamiento.



Figura 3 Etapas de pretratamientos antes de la etapa del anodizado, donde existen dos líneas, con o sin pulido superficial.



### 2.2 Proceso de aplicación de capas anódicas. Proceso doble anodizado

Debido a que en el ordenamiento de las capas anódicas interviene de forma significativa el estado superficial, como mejora de dicho estado superficial, se realiza un doble anodizado, realizando un primer anodizado, cuya capa crecerá en función del estado superficial del aluminio.

Una vez generada una primera capa de anodizado, se elimina para dejar la superficie del aluminio con una rugosidad ordenada, es decir, dejamos la superficie con los puntos del crecimiento de la capa anódica, los cuales están de forma ordenada en la superficie.

Realizamos una segunda anodización, cuya capa crece a partir de los puntos anteriores, lo que beneficia un crecimiento más ordenado, generando capas más compactas y ordenadas. El esquema nº 4 representa las fases del doble anodizado.



Figura 4 Fases del proceso del doble anodizado.







### 2.3 Relación del espesor del anodizado con el tiempo:

Para estudiar el crecimiento del espesor del anodizado con el tiempo, se varió el tiempo de anodizado, desde 10 a 60 min, con incrementos de 10 en 10 minutos. También se realizó una muestra de doble anodizado: Un primer anodizado de 10 min, seguida de la eliminación de la capa superficial de anodizado con disolución fosfocrómica durante 5-10 min, para finalizar con un segundo anodizado durante 20 min (muestra 10+20).

En primer lugar se observó el aumento de la temperatura conforme transcurre el tiempo de anodizado. Este aumento de la temperatura es debido al efecto Joule (el paso de corriente a través de los poros), que produce un desprendimiento de calor durante el proceso de anodizado.



Figura 5 Variación de la temperatura con el tiempo de anodizado.

El aumento de la temperatura en el proceso de anodizado, aumenta la velocidad de disolución de los iones de la capa de oxido de aluminio  $(Al_2O_3)$ , sin afectar la velocidad de oxidación, como se muestra en la Figura 5.



Figura 6 Variación de la velocidad de disolución ( $V_{dis}$ ) y oxidación ( $V_{ox}$ ) con el tiempo (t).

En la Figura 7 y Tabla 1 Relación del tiempo de anodizado con el espesor de la capa anódica. se puede observar como varía el espesor ( $\mu$ m) (obtenido mediante análisis metalográfico con el





### TRIBANO

Efecto de la temperatura en el comportamiento tribológico con la morfología de capas anódicas.

microscopio óptico), de la capa de aluminio anodizado con respecto al tiempo. El espesor aumenta hasta los 30 min para luego disminuir, lo que concuerda con el comportamiento descrito en la Figura 5.



En la Figura 5 se observa que un aumento del tiempo de anodizado acompañado de un aumento de la temperatura, aumenta la velocidad de disolución de los iones anodizados y por ende se reduce el espesor de la capa de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Se ha reportado que trabajar a una temperatura de anodización más baja, permite un mejor control de la formación de la capa de óxido de aluminio<sup>1</sup>. Debido a ello, en los siguientes ensayos se trabaja bajo control de la temperatura y se comparan los resultados obtenidos.

### 2.4 Material base empleado en los anodizados.

Como material base empleado en los anodizados, se emplearon varias aleaciones de productos de forja (norma EN 573-3:2014). En primer lugar, una aleación con Magnesio para el desarrollo industrial, EN AW 5005 (EN AW AlMg1), en formato lámina, pieza conformada.

Para los desarrollos en laboratorio se emplearon probetas laminares, placa de 50x100 mm, de aluminio sin alear, EN AW 1200 (EN AW Al 99.0), así como aluminio de extrusión de aleaciones AlMgSi, EN AW 6060 (EN AW AlMgSi).

Material	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Ga
Placa	0,102	0,75	0,003	0,008	0,002	0,001	0,094	0,041	0,020
Extrusión	0,429	0,179	0,011	0,031	0,472	0,002	0,001	0,008	0,012







### 3 Actividades realizadas

### 3.1 Caracterización estructural de las capas desarrolladas

Se han llevado a cabo tareas de caracterización del recubrimiento desarrollado tanto desde un punto de vista microestructural como de medición de las propiedades corrosivas. Para ello se ha desarrollado análisis basados en:

→ Caracterización superficial de las capas anódicas, pre y post aplicación de ensayo tribológico, puesto que el estado superficial influye de manera significativa en el crecimiento de la capa anódica.

→ Morfología de las capas anódicas a nivel superficial, mediante la caracterización por microscopía óptica (MO) y electrónica (SEM).

→ Caracterización de la morfología de las capas anódicas a escala nanométrica mediante microscopia de fuerza atómica (AFM).

→ Caracterización de las propiedades corrosivas de las capas anódicas, mediante técnicas electroquímicas, espectroscopia de impedancia (EIS), y curvas de polarización.

### 3.2 Caracterización tribológica superficial de capas anódicas

Caracterización de las propiedades tribológicas de las capas anódicas mediante equipos de tribología (pin on disc), en donde se ha obtenido tanto el coeficiente de fricción como la tasa de desgaste del sistema. El sistema se basa en un desgaste por deslizamiento aplicando variabilidad de carga y de velocidad de recorrido, evaluando así el desgate a temperatura ambiente. Se caracteriza también la morfología de mecanismos de desgaste predominante en los análisis desarrollados.

### 3.3 Caracterización a temperatura

Caracterización de las capas anódicas al comportamiento tribológico con variabilidad de la temperatura, teniendo en cuenta los resultados de la variabilidad de carga y velocidad anteriores. De la misma forma que en la etapa anterior se caracteriza la morfología del mecanismo de desgaste predominante.

### 3.4 Valoración y análisis de resultados

Esta es una tarea final de resultados, fruto de un compendio de datos obtenidos en etapas anteriores y analizadas en esta. Tarea de Valoración y análisis de los resultados teniendo en cuenta los valores encontrados después de las caracterizaciones.







### 4 Caracterización estructural de las capas anódicas.

Se ha realizado la caracterización de los recubrimientos comerciales y desarrollados en laboratorio, desde un punto de vista microestructural.

### 4.1 Recubrimientos Industriales

### 4.1.1 COMPARATIVA DE TEMPERATURA Y PRESENCIA DE ADITIVO

Dentro de este apartado se compararon diversas condiciones del proceso de anodizado, en lo que se refiere a la temperatura de aplicación, tensión aplicada y presencia de aditivo, sobre aleación AW5005. En primer lugar se realizó una comparativa de temperatura, para un mismo voltaje, así como con y sin presencia de aditivo, en las condiciones siguientes:

1.- Comparativa entre temperatura:

- ✓ Temperatura 15°C/16V espesor 3,8 micras
- ✓ Temperatura 21°C/16V espesor 3
- espesor 3,5 micras
- 2.- Comparativa aditivo:
  - ✓ Sin aditivo: Temperatura 15°C/17V espesor 4,1 micras
  - ✓ Con aditivo: Temperatura 15°C/17V espesor 4.2 micras

### 4.1.1.1 MICROSCOPÍA ÓPTICA (MO) DE LOS ANODIZADOS











### 4.1.1.2 RESULTADOS DE MICROSCOPÍA ELECTRÓNICA (SEM)



### 4.1.1.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS POR MICROSCOPÍA DE FUERZA ATÓMICA, AFM







### 4.1.1.3.1 <u>Referencia 15°C/ 16 V</u>



### 4.1.1.3.2 <u>Referencia 21°C/ 16 V</u>



### 4.1.1.3.3 Sin aditivo, 15°C/ 17V











Con estos valores parece que a igual voltaje, la capa anódica es más homogénea a la temperatura de 21°C que a 15°C. Por otra parte, el añadir aditivo mejora la homogeneidad de la capa anódica.

### 4.1.2 COMPARATIVA DE TEMPERATURAS Y VOLTAJE DE ANODIZADO MÁS BAJO:

Dentro de esta apartado se manejaron condiciones parecidas a las anteriores, pero bajando el voltaje a 14V, y manteniendo la temperatura de 15 y 21°C, así como una condición de una leve subida del voltaje, temperatura 15°C y 17 Voltios, con espesores entre 4-5 micras.

### 4.1.2.1 MICROSCOPÍA ÓPTICA (MO) DE LOS ANODIZADOS







4.1.2.2 MICROSCOPÍA ELECTRÓNICA (SEM)



4.1.2.3 MICROSCOPÍA DE FUERZA ATÓMICA (AFM) DE LOS ANODIZADOS















Toperafia Sµm² /Ra: 10.13 mm roje y 9.98 mm verde

Figura 17 Microscopía de fuerza atómica AFM 21°C/14V

La homogeneidad de la capa anódica parece que mejora al bajar el voltaje, aunque si lo bajamos mucho, puede tener zonas de mas diversidad.







### 4.1.3 COMPARATIVA DE SUPERFICIES PREVIAMENTE PULIDAS:

Con motivo de ver la influencia del estado superficial, también se caracterizaron muestras con la superficie pretratadas previamente, mediante un pulido electroquímico, electro-pulido, con dos tensiones diferentes, 24 y 30 V, a un misma temperatura, 63°C. El proceso de anodizado posterior se realizó a 15 V y 22°C. Los espesores son de 15 y 5 micras respectivamente.

### 4.1.3.1 MICROSCOPÍA ÓPTICA (MO)



### 4.1.3.2 MICROSCOPÍA ELECTRÓNICA (SEM)





### 4.1.3.3 MICROSCOPÍA DE FUERZA ATÓMICA (AFM)





Topografía 50µm<sup>2</sup>/Ra: 18,21 nm rojo y 19,32 nm verde



Topografía 10µm<sup>2</sup>/Ra: 14,38 nm rojo y 6,69 nm verde



Figura 21 Microscopía de fuerza atómica AFM para la muestra 24V/63C con áreas de 50 y 10  $\mu$ m<sup>2</sup> respectivamente.



Topografía 50μm<sup>2</sup>/Ra: 142 nm rojo y 191 nm verde





Topografía 10µm<sup>2</sup>/Ra: 12,60 nm rojo y 10,59 nm verde



Figura 22 Microscopía de fuerza atómica AFM para la muestra 30V/63C con áreas de 50 y 10 µm<sup>2</sup> respectivamente.







Parece que la regularidad de la superficie esta beneficiada a menor voltaje de electropulido..

### 4.2 Recubrimientos Desarrollados

En base a los resultados anteriores, se desarrollaron recubrimientos en línea a los analizados, en aleación AW 1200, con tiempos de 10, 20, 30 y 10+20 minutos en la aplicación del anodizado, jugando con las condiciones de aplicación, además de tener en cuenta el estado superficial del aluminio, y el añadir aditivo, que en este caso hemos elegido un aditivo base ácido bórico.

### 4.2.1 PLACAS ANODIZADAS A BAJA TEMPERATURA.

Se realizo el anodizado controlando la temperatura de la celda electrolítica en un rango entre 17 hasta 24 °C, para tiempos de 10, 20, 30 min y una placa de doble anodizado de 10+20min. Los espesores obtenidos fueron similares a los que se consiguieron en el apartado anterior. Se pueden observar en la Tabla 2 y la Figura 23.



Figura 23 Relación del tiempo de anodizado con el espesor de la capa anódica para el ensayo en frio.

# 10 min (200X) 10 min (1000X) 10 min (200X) 20 min (1000X)

### 4.2.1.1 MICROSCOPÍA ÓPTICA (MO) DE LOS ANODIZADOS









### 4.2.1.2 MICROSCOPÍA ELECTRÓNICA (SEM) DE LOS ANODIZADOS











### 4.2.1.3 MICROSCOPÍA DE FUERZA ATÓMICA (AFM) DE LOS ANODIZADOS







Topografía 50µm²/Ra: 238 nm rojo y 213 nm verde



Topografía 10μm<sup>2</sup>/Ra: 167 nm rojo y 136 nm verde

d - 175



Figura 26 Microscopía de fuerza atómica AFM para la placa 20 min\_frío con áreas de 50 y 10  $\mu$ m<sup>2</sup> respectivamente.



Topografía 50µm²/Ra: 225 nm rojo y 160 nm verde

Topografía 10μm<sup>2</sup>/Ra: 128 nm rojo y 109 nm verde



Figura 27 Microscopía de fuerza atómica AFM para la placa a 10+20 min frio, con áreas de 50 y 10  $\mu m^2$  respectivamente.

La aplicación de un doble anodizado, mejora la homogeneidad de la superficie.

### 4.2.2 PLACAS ANODIZADAS AÑADIENDO ADITIVO.

Con el objetivo de mejorar propiedades de las capas anódicas, se añade a la celda electrolítica un aditivo para mejorar la estructura de la capa anódica, en nuestro caso se ha utilizado un aditivo base ácido bórico en diferentes proporciones, 10, 20 y 30 g/l.

### 4.2.2.1 MICROSCOPÍA ÓPTICA (MO) DE LOS ANODIZADOS











4.2.2.2 MICROSCOPÍA ELECTRÓNICA (SEM) DE LOS ANODIZADOS











### 4.2.2.3 MICROSCOPÍA DE FUERZA ATÓMICA (AFM) DE LOS ANODIZADOS



Topografía 50µm<sup>2</sup>/Ra: 252 nm rojo y 234 nm verde





Topografía 10μm<sup>2</sup>/Ra: 203 nm rojo y 205 nm verde





Figura 30 Microscopía de fuerza atómica AFM para la placa a 20 min y aditivo/20 g/L a temperatura superior a la ambiente, con áreas de 50 y 10 μm<sup>2</sup> respectivamente.









Topografía 50µm²/Ra: 192 nm rojo y 186 nm verde





Topografía 10μm<sup>2</sup>/Ra: 67 nm rojo y 48 nm verde



Figura 31 Microscopía de fuerza atómica AFM para la placa a 20 min y aditivo/20 g/L en frio con áreas de 50 y 10  $\mu m^2$  respectivamente.



Topografía 50µm²/Ra: 80 nm rojo y 122 nm verde





Topografía 10µm<sup>2</sup>/Ra: 49 nm rojo y 40 nm verde











Figura 32 Microscopía de fuerza atómica AFM para la placa a 10+20 min y aditivo/20 g/L en frio con áreas de 50 y  $10 \ \mu m^2$  respectivamente.

En el anodizado con presencia de aditivo, la homogeneización de la superficie es mejor con una menor temperatura de aplicación, así como también mejora con un doble anodizado.







### 4.2.3 CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES CORROSIVAS.

Para completar las caracterizaciones, se comprobaron las propiedades corrosivas mediante técnicas electroquímicas, espectrocospia de impedancia (EIS) y curvas de polarización.



Tabla 3 Resumen de datos de corrosión.						
Referencia	E corrosión (V)	I corrosión (A)	J corrosión	Rate corrosión		
			(A/cm <sup>2</sup> )	(mm/year)		
10+20 m bórico frio	-0.49	1.41 E-10	3.72 E-11	4.06 E-7		
10+20 m frio	-0.58	2.06 E-10	5.43 E-11	5.91 E-07		
20 m bórico frio	-0.56	1.66 E-10	4.36 E-11	4.75 E-7		
20 m bórico	-0.71	336 E-10	883 E-11	962 E-07		
20 m frio	-0.60	8.78 E-10	23.1 E-11	2.52 E-07		
30 m bórico frio	-0.38	0.018 E-10	0.047 E-11	0.051 E-07		
30 m bórico	-0.47	0.093 E-10	2.44 E-11	2.66 E-07		

Figura 33 Curvas de polarización e impedancia.

Como se desprende de la tabla 3, el mejor comportamiento lo tendría la referencia de 30 minutos con bórico (30 m bórico), mejorando dicho comportamiento cuando el anodizado es a temperatura más baja, proceso en frio, donde el espesor también influye. El empleo del aditivo, también parece que mejora el comportamiento corrosivo.

Como resumen se podría indicar que el comportamiento corrosivo mejora con el tiempo (espesor), temperaturas más bajas, con la presencia del aditivo, y con el doble anodizado.







### 5 Caracterización tribológica superficial de capas anódicas

# 5.1 Caracterización tribológica superficial de placas AW 1200, anodizadas temperatura superior a la ambiente.

Se estudió el coeficiente de fricción de las muestras a diferentes velocidades (60 rpm y 100 rpm), variando también la carga aplicada 1,5 N y 2 N.

En la Figura 34 , se muestran los resultados utilizando como carga 1,5 N para velocidades de 60 y 100 rpm. Se puede observar que el menor coeficiente de fricción para la carga de 1.5 N se obtiene para el doble anodizado 10+20 a 100 rpm.



Figura 34 Coeficiente de fricción versus la velocidad (60 y 100 rpm) y carga 1,5N. SP= sin pulir y P=pulida

En la Figura 35 se observan los resultados del coeficiente de fricción utilizando 2 N de carga. En éste caso se observa que los menores coeficientes de fricción son obtenidos para la placa pulida de 20 min y la de 40 min a 60 rpm, siendo el espesor en ambas placas parecidos. Se tiene que tener en cuenta que las mediad superiores a 1 deben ser analizadas por separado por si hubiera algún fallo de la medida, y por lo tanto no se tienen muy en cuenta.









Figura 35 Coeficiente de fricción versus la velocidad (60 y 100 rpm) y carga 2 N. SP= sin pulir y P=pulida

# 5.2 Caracterización tribológica superficial de placas AW 1200 anodizadas a baja temperatura.

Se estudiaron los coeficientes de fricción para velocidades de 60 y 100 rpm y cargas de 1,5 y 2 N a temperaturas de 17-23 °C. En la Figura 36 se observa que los menores coeficientes de fricción se obtienen para la placa de 30 min a la velocidad de 60 rpm y 1.5 N, además de las del doble anodizado, 10+20 min.



Figura 36 Coeficiente de fricción versus la velocidad y la carga para el ensayo en frio.

# 5.3 Caracterización tribológica superficial de placas AW 1200 anodizadas añadiendo aditivo.

### 5.3.1 AÑADIENDO 10 G/L DE ADITIVO, CARACTERIZACIÓN A TEMPERATURA AMBIENTE







En una primera fase se añadió 10 g/L de aditivo a la disolución de ácido sulfúrico y se anodizaron placas a 10, 20, 30 min y doble anodizado (10+20 min), se registró la temperatura y se midieron los espesores., Tabla 4 y Figura 37



Se realizaron pruebas con el tribómetro a las placas anteriores utilizando 1,5 N de carga y velocidades de 60 y 100 rpm, Los resultados se muestran en la Figura 38. Las mayores tasas de desgaste se obtienen para la placa anodizada por 10 min para ambas velocidades (60 y 100 rpm), posiblemente como consecuencia del bajo espesor de la misma (3µm), y las menores para 10+20 min.



Figura 38 Coeficiente de fricción y tasa de desgaste frente a la velocidad al añadir 10 g/L de aditivo.

### 5.3.2 AÑADIENDO 10 G/L DE ADITIVO, CARACTERIZACIÓN A BAJA TEMPERATURA

Seguidamente se realizó el mismo ensayo con el electrolito a temperaturas más bajas de la ambiental 17-23°C. Los espesores obtenidos se pueden observar en la Tabla 55, y Figura 39.



TRIBANO

Efecto de la temperatura en el comportamiento tribológico con la morfología de capas anódicas.



Por último, se estudiaron los coeficientes de fricción utilizando 1,5 N de carga y velocidades de 60 y 100 rpm. En la Figura 40 podemos observar que los coeficientes de fricción para 10 min parecen ser más altos, así como su tasa de desgaste. La distancia recorrida en todos los casos ha sido de 100 m en desgaste lineal, sólo las placas realizadas a 10 min de anodizado desgastaron la capa anódica antes de alcanzar los 100 m dispuestos por el ensayo.

### 5.3.3 AÑADIENDO 20 G/L DE ADITIVO, CARACTERIZACIÓN A TEMPERATURA AMBIENTE

Se añadieron 20 g/L de aditivo a la celda electrolítica y se anodizaron las placas a temperatura 25-36 °C. Se midieron los espesores (ver Tabla 66 y Figura 41).

12

Ê<sup>10</sup>

Tabla 6 Relación del tiempo de anodizado con el espesor obtenido añadiendo 20 g/L de aditivo.

Tiempo anodizado / min	Espesor / µm	oesor (r			
10 20	3 6				
30 10+20	13 9	10	20 Tiemp	30 o (min)	10+20
		Figure 41 Deleción de	۔ ام محمد مدار ا		

Figura 41 Relación del tiempo de anodizado con el espesor obtenido al añadir 20 g/L de aditivo.

Se realizaron pruebas con el tribómetro para medir el coeficiente de fricción. Se utilizó una carga de 1.5 N y velocidades de 60 rpm y 100 rpm para cada placa. Los valores del coeficiente de fricción se observan en la Figura 42. Los menores coeficientes de fricción se obtuvieron para las placas anodizadas a tiempos de 20 y 10+20 min cuando se utiliza 60 rpm y para 30 min cuando es a 100 rpm. Lo que concuerda con los bajos valores de tasa de desgaste de 0,07 x10<sup>-6</sup>





y 0,18 x10<sup>-6</sup> g/Nxm para las combinaciones 30 min/100 rpm y 10+20 min/60 rpm respectivamente. Sólo la placa anodizada durante 10 min para ambas velocidades desgastó su capa de óxido de aluminio antes de transcurrir los 100 m.



Figura 42 Coeficiente de fricción y tasa de desgaste frente a la velocidad al añadir 20 g/L de aditivo.

### 5.3.4 AÑADIENDO 20 G/L DE ADITIVO, CARACTERIZACIÓN A BAJA TEMPERATURA.

Se realizó un ensayo igual al anterior, pero a menor temperatura 17-23 °C. Los espesores de la capa anódica medidos se muestran en la Tabla 7 y la Figura 43





Figura 43 Relación del tiempo de anodizado con el espesor obtenido al añadir 20 g/L de aditivo, ensayo al frío.









Figura 44 Coeficiente de fricción y tasa de desgaste frente a la velocidad añadiendo 20 g/L de aditivo, ensayo en frío.

En la Figura 44 se pueden observar los coeficientes de fricción obtenidos después de aplicar una carga de 1,5 N. Los valores más bajos de fricción se obtuvieron para las combinaciones 10+20 min/60 rpm y 30 min/100 rpm. En concordancia, todas la tasas de desgaste fueron muy bajas  $\approx 0,13 \times 10^{-6}$  g/Nxm, excepto para la placa realizada a 10 min y 60 rpm con tasa de desgaste de 8,66 x10<sup>-6</sup> g/Nxm. De igual forma la placa anodizada durante 10 min se desgastó antes de alcanzar los 100 m para ambas velocidades (35m/60rpm y 50m/100rpm).

### 5.3.5 AÑADIENDO 30 G/L DE ADITIVO, CARACTERIZACIÓN A TEMPERATURA AMBIENTE

Se añadió al electrolito 30 g/L de aditivo, y se anodizaron las placas de forma similar a las anteriores. Los espesores se pueden ver en la Tabla 8 Relación del tiempo de anodizado con el espesor obtenido añadiendo 30 g/L de aditivo. y Figura 45.



Figura 45 Relación del tiempo de anodizado con el espesor obtenido al añadir 30 g/L de aditivo.

Se realizaron pruebas con el tribómetro para medir el coeficiente de fricción. Se utilizó una carga de 1.5 N a velocidades de 60 rpm y 100 rpm para cada placa. En la Figura 46 se puede







observar que aunque los coeficientes de fricción son muy parecidos para todas las placas, la tasa de desgaste en general es baja y para todos los casos ronda un valor cercanos a 0,29 x10<sup>-6</sup> g/Nxm, excepto para la placa a 10 min medida a 100 rpm, para ésta última el desgaste de la capa ocurrió a los 25 m.



Figura 46 Coeficiente de fricción y tasa de desgaste frente a la velocidad al añadir 30 g/L de aditivo.

### 5.3.6 AÑADIENDO 30 G/L DE ADITIVO, CARACTERIZACIÓN A TEMPERATURA MAS BAJA.

Los espesores obtenidos se muestran en la Tabla 9 y la Figura 47



El comportamiento tribológico se muestra en la Figura 48. Se utilizó una carga de 1.5 N a velocidades de 60 rpm y 100 rpm para cada placa. Para la medida a 60 rpm el menor coeficiente de fricción se obtuvo para la placa a 20 min, mientras que a 100 rpm para 10+20 min. Sin embargo la menor tasa de desgaste la presenta la placa a 20 min y 10+20 min realizada a 60 rpm. Todas las placas se midieron durante 100 m sin señales de haber desgastado la capa de anodizado antes de dicha distancia.





Figura 48 Coeficiente de fricción y tasa de desgaste frente a la velocidad obtenida al añadir 30 g/L de aditivo, ensayo al frío.

# 5.4 Caracterización tribológica superficial de una muestra extrusionada industrial

Se tomó una muestra de aluminio de extrusión industrial, con motivo de evaluar una superficie y aleación diferente, AW 6060, la cual esta dividida en dos partes, una con una superficie pulida (P) y otra con una superficie no pulida (NP). Se anodizaron las dos partes durante 20 min. Y se analizó el espesor mediante análisis metalográfico con el microscopio óptico, observando valores de 10 y 9  $\mu$ m respectivamente.

Se realizaron pruebas con el tribómetro a 60 rpm y 100 rpm, utilizando cargas de 1,5 y 2 N. Los resultados se observan en la Figura 49. Los menores coeficientes de fricción se han obtenido para la parte pulida, 0,42, con carga de 2N y velocidad de 100 rpm. La menor tasa de desgaste se corresponde con la parte pulida para ambas cargas y 100 rpm.









Coeficiente fricción vs velocidad

Figura 49 Coeficiente de fricción frente velocidad y carga para la muestra extrusionada (pulida, sin pulir).

# 5.5 Caracterización tribológica superficial de material industrial con diferentes condiciones de electro-pulido.

Se ha realizado la caracterización tribológica en la superficie de una placa anodizada de aluminio a 22°C y 15V, con electro-pulido de 24 V a 63°C, con cargas de 1,5 y 2 N para 60 y 100 rpm.



Figura 50 Coeficiente de fricción en función de la Velocidad y la carga para la placa 24v-63C.

En la Figura 50 se puede observar que el menor coeficiente de fricción se obtiene cuando se utiliza la carga de 1,5 N y 60 rpm con valor de 0,50. Se tiene que tener en cuenta que las mediad superiores a 1 deben ser analizadas por separado por si hubiera algún fallo de la medida, y por lo tanto no se tienen muy en cuenta.



Por otro lado, se ha realizado la caracterización tribológica en la superficie de una placa anodizada a 22°C y 15V, pero con electro-pulido a 30V y 63°C, bajo las mismas condiciones que la anterior.



Figura 51 Coeficiente de fricción en función de la Velocidad y la carga para la placa 30V/63C

En la Figura 51 se observa que los valores de los coeficientes de fricción son mayores para la placa electro-pulida a 30V/63C que para la placa 24V/63C. El menor coeficiente de fricción, 0,90, se obtiene utilizando una carga de 2 N a 100 rpm. Se tiene que tener en cuenta que las mediad superiores a 1 deben ser analizadas por separado por si hubiera algún fallo de la medida, y por lo tanto no se tienen muy en cuenta.

### 6 Caracterización a Temperatura

En el presente apartado se valora como afecta la temperatura al comportamiento tribológico de las capas anódicas. Específicamente se observa el coeficiente de fricción y tasa de desgaste de las capas anódicas realizadas al añadir diferentes proporciones ácido bórico a la celda electrolítica.

### 6.1 Caracterización tribológica superficial a temperatura de 50°C

La caracterización tribológica se realiza a 50°C de temperatura para las placas de anodizado añadiendo 10, 20 y 30 g/L de aditivo en la disolución de ácido sulfúrico para tiempos 10, 20, 30 min y doble anodizado (10+20 min), para 1,5 N de carga, velocidades de 60 y 100 rpm y temperatura de horno de 50  $\pm$  10°C. A continuación se presentan los resultados según la cantidad de aditivo añadido.

### 6.1.1 AÑADIENDO 10 G/L DE ADITIVO, CARACTERIZACIÓN A 50°C.

Los coeficientes de fricción fueron medidos a 50°C para las placas con 10 g/L de aditivo anodizadas durante 10, 20, 30 min y doble anodizado (10+20 min).









Figura 52 Coeficiente de fricción y tasa de desgaste frente a la velocidad para 50°C en placas anodizadas al añadir 10 g/L de aditivo.

En la Figura 52se observa que todos los valores de coeficiente de fricción son mayores que los obtenidos para las mismas placas a temperatura ambiente. Los valores de coeficiente de fricción tienden a acercarse a 0,80 para ambas velocidades. Sin embargo, la tasa de desgaste está relacionada estrechamente con el espesor de las placas, si ordenamos de mayor a menor el desgaste junto con los espesores obtenidos con anterioridad tenemos: 10 min  $(3\mu m) > 10+20 min (7\mu m) > 20 min (9\mu m) > 30 min (14\mu m), para ambas velocidades.$ 

Adicionalmente se realizó la caracterización tribológica a 50°C para las placas anodizadas con control de temperatura (ensayo en frío).



Figura 53 Coeficiente de fricción y tasa de desgaste frente a la velocidad para 50°C en placas anodizadas al añadir



10 g/L de aditivo. Ensayo en frío.

En la Figura 53 se observa que los coeficientes de fricción para 100 rpm de velocidad tienen valores cercanos a 0,72. Cuando se utiliza 60 rpm, se cumple que a menor tiempo de anodizado obtenemos mayor valor del coeficiente de fricción y viceversa. La tasa de desgaste para todos los casos es menor de 1 excepto para la placa de 10 min a 100 rpm.

### 6.1.2 AÑADIENDO 20 G/L DE ADITIVO, CARACTERIZACIÓN A 50°C

Se ha realizado la caracterización tribológica a 50°C para las placas anodizadas durante 10, 20, 30, y 10+20 min utilizando 20 g/L de aditivo en la celda electrolítica.

En la Figura 54 se muestran los valores de coeficiente de fricción y tasa de desgaste frente a la velocidad para las placas, utilizado 1,5N de carga, velocidades de 60 y 100 rpm, y 50  $\pm$  10°C de temperatura.

Los menores coeficientes de fricción se obtienen para las placas a 20 min de anodizado (0,72/60rpm y 0,69/100rpm). Sin embargo, las placas realizadas durante 10 y 20 min tienen las mayores tasas de desgaste, posiblemente debido a que poseen un menor espesor (3 y 6µm respectivamente). La capa de óxido de aluminio para las placas de 10 y 20 min se desgastó antes de alcanzar los 200 m de distancia radial, mientras que las placas a 30 min y 10+20 min presentan una baja tasa de desgaste de la capa de anodizado durante los 200 m de distancia, para éstas condiciones.



Figura 54 Coeficiente de fricción y tasa de desgaste frente a la velocidad para 50°C en placas anodizadas al añadir 20 g/L de aditivo.

En la Figura 55 se observa que los valores de coeficientes de fricción son ligeramente más bajos que los reportados en el ensayo anterior. La tasa de desgaste es mayor para la placa con menor espesor y disminuye en el siguiente orden: 10 min ( $3\mu$ m) > 20 min ( $8\mu$ m) > 10+20 min





 $(9\mu m) > 30 min (13\mu m)$ . Bajo las condiciones del ensayo las placas de 10 y 20 min desgastaron la capa de anodizado antes de alcanzar los 200 m de distancia radial.



Figura 55 Coeficiente de fricción y tasa de desgaste frente a la velocidad para 50°C en placas anodizadas al añadir 20 g/L de aditivo. Ensayo en frío.

### 6.1.3 AÑADIENDO 30 G/L DE ADITIVO, CARACTERIZACIÓN A 50°C

Se caracterizaron las placas obtenidas al añadir 30 g/L de aditivo al proceso de anodizado. Se midieron los valores de coeficiente de fricción y tasa de desgaste frente a la velocidad para las placas anodizadas a 10, 20, 30 y 10+20 min.

El mayor valor de coeficiente de fricción se obtiene para la placa 10 min/100rpm. Se debe mencionar que las placas anodizadas a 20 min y 10+20 min tienen igual espesor (7  $\mu$ m). Sin embargo, la placa 10+20 min presenta menores tasa de desgaste para ambas velocidades que la placa de 20 min (ver Figura 56 ), posiblemente por el crecimiento más ordenado de la capa de óxido de aluminio durante el doble anodizado. Sólo la placa de 30 min para ambas velocidades y la placa 10+20 a 100 rpm presentan una baja tasa de desgaste de la capa de anodizado durante los 200 m de distancia radial.









Figura 56 Coeficiente de fricción y tasa de desgaste frente a la velocidad para 50°C en placas anodizadas al añadir 30 g/L de aditivo.

En la Figura 57 observamos los valores de coeficiente de fricción y tasa de desgate para las placas anodizadas utilizando 30 g/L de aditivo y control de la temperatura (ensayo en frío).

Al igual que en el caso anterior, las placas anodizadas a 20 min y doble anodizado 10+20 min presentan el mismo espesor ( $6\mu$ m). Se observan coeficientes de fricción muy cercanos en todas las variables, entorno a los 0,7 – 0,8, pero se observan diferencias en cuanto a la tasa de desgaste, siendo las menores tasas para las condiciones de 20 m y 10+20 m. Respecto a la tasas de desgaste en las mismas condiciones, pero bajando la temperatura de anodizado, disminuye el desgaste.



Figura 57 Coeficiente de fricción y tasa de desgaste frente a la velocidad para 50°C en placas anodizadas al añadir



30 g/L de aditivo. Ensayo en frío.

### 6.2 Caracterización tribológica superficial a 100°C de temperatura.

La caracterización tribológica se realiza a temperatura de 100°C para las placas de anodizado realizadas utilizando 10, 20 y 30 g/L de aditivo en la disolución de ácido sulfúrico durante 10, 20, 30 min y doble anodizado (10+20 min), utilizando 1,5 N de carga, velocidades de 60 y 100 rpm y temperatura de horno de 100  $\pm$  10°C

### 6.2.1 AÑADIENDO 10 G/L DE ADITIVO, CARACTERIZACIÓN A 100°C

Se añadió 10 g/L de aditivo a la disolución de ácido sulfúrico y se anodizaron placas a 10, 20, 30 min y doble anodizado (10+20 min). La temperatura de anodizado varió de 25 a 38°C.

En la Figura 58 se observa como varía el coeficiente de fricción y la tasa de desgaste para las placas anodizadas en función de la velocidad. Los valores de coeficiente de fricción no superan en ningún caso los 0,82 y el orden descendiente de la tasa de desgaste coincide con el aumento del espesor del óxido de aluminio en las placas: 10 min (3µm) > 10+20 min (7µm) > 20 min (9µm) > 30 min (14µm), para ambas velocidades.

Las placas con espesor menor de  $7\mu$ m desgastan la capa anódica antes de transcurrir el tiempo y distancia del ensayo. Para la placa a 10 min la capa de anodizado se desgasta a 59 m y 19 m cuando se utiliza velocidades de 60 rpm y 100 rpm, respectivamente.



Figura 58 Coeficiente de fricción y tasa de desgaste frente a la velocidad para 100°C en placas anodizadas al añadir 10 g/L de aditivo.

De la misma manera, se obtuvo el coeficiente de fricción y la tasa de desgaste a 100°C, utilizando las placas anodizadas a temperatura controlada (17-24°C, ensayo en frío).





En la Figura 59 se observa que los coeficientes de fricción tienen valores entre 0,69 y 0,84. Además, los mayores valores de desgaste se ha obtenido para la placa a 10 min  $(9x10^{-6} \text{ y } 6x10^{-6} \text{ g/Nxm} \text{ para } 60 \text{ y } 100 \text{ rpm}$  de velocidad respectivamente), debido posiblemente al bajo espesor de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (3µm).



Figura 59 Coeficiente de fricción y tasa de desgaste frente a la velocidad para 100ºC en placas anodizadas al añadir 10 g/L de aditivo, ensayo en frío.

### 6.2.2 AÑADIENDO 20 G/L DE ÁCIDO BÓRICO, CARACTERIZACIÓN A 100°C

En ésta sección se ensayan las placas anodizadas durante 10, 20, 30, y 10+20 min utilizando 20g/L de ácido bórico en la celda electrolítica.

En la Figura 60 se muestran los valores de coeficiente de fricción y tasa de desgaste frente a la velocidad para las placas. Para todos los casos el valor del coeficiente de fricción es muy cercano a 0,8. Además, la mayor tasa de desgaste (6 x  $10^{-6}$  g/Nxm), se obtiene para la placa de 10 min y 100 rpm, para la cual, la capa de anodizado se desgasta completamente a los 11 m.

Todas las placas desgastan completamente la capa de  $Al_2O_3$  antes de la culminación del ensayo (200m de distancia radial), excepto la placa a 30 min para ambas velocidades y la placa de 10+20 min con 60 rpm.









Figura 60 Coeficiente de fricción y tasa de desgaste frente a la velocidad para 100ºC en placas anodizadas al añadir 20 g/L de aditivo.

La Figura 61 contiene los valores de coeficiente de fricción y tasa de desgaste frente a la velocidad para las placas anodizadas con control de temperatura (entre 17 a 24°C, ensayo en frío), en presencia de 20 g/L de aditivo.

Los mayores valores de desgaste se obtienen para la placa de 10 min (8 x  $10^{-6}$  y 5 x  $10^{-6}$  g/Nxm para 60 y 100 rpm respectivamente).

Bajo las condiciones del ensayo la menor tasa de desgaste se obtiene para la placa a 30 min para ambas velocidades. Adicionalmente a la placa de 30 min, la placa de 20 min/100 rpm no desgasta la capa de anodizado durante el ensayo (200 m de distancia radial).



Figura 61 Coeficiente de fricción y tasa de desgaste para 100ºC en placas anodizadas al añadir 20 g/L de aditivo, ensayo en frío.



### AÑADIENDO 30 G/L DE ADITIVO, CARACTERIZACIÓN A 100°C 6.2.3

Se añadió un total de 30 g/L de aditivo, obteniendo las placas de manera similar que en los ensayos anteriores.

El la Figura 62 se muestran los valores de coeficiente de fricción y tasa de desgaste frente a la velocidad para las placas anodizadas a 10, 20, 30 y 10+20 min, se ha utilizado 1,5N de carga, velocidades de 60 y 100 rpm, y 100 ± 10°C de temperatura.

Se ha obtenido el mismo valor de espesor para las placas a 20 min y doble anodizado 10+20 min (7µm), como posible consecuencia los valores del coeficiente de fricción para las placas a 20 min y 10+20 min para ambas velocidades 60 y 100 rpm son muy similares.

El valor de la tasa de desgaste es mayor para la placa a 10 min para ambas velocidades. Los bajos espesores de las placas a 10, 20 y 10+20 min hacen que para las condiciones del ensayo la capa de anodizado se desgaste en todos estos casos antes de culminar la distancia radial de 200m.



Figura 62 Coeficiente de fricción y tasa de desgaste para 100ºC en placas anodizadas al añadir 30 g/L de aditivo.

En la Figura 63 observamos los valores de coeficiente de fricción y tasa de desgate para las placas anodizadas utilizando 30 g/L de aditivo y control de la temperatura (ensayo en frío).

Los coeficientes de fricción tienen valores entre 0,62 y 0,79, pero se observa que las tasas de desgaste van en orden descendente desde la placa de 10 min > 20 min > 10+20 min. Al igual que en el caso anterior las placas anodizadas a 20 min y doble anodizado 10+20 min presentan el mismo espesor (6µm). Es decir, que la placa de doble anodizado 10+20 min se desgasta menos que la placa de 20 min a pesar de tener el mismo espesor, posiblemente debido a un



mejor ordenamiento y estructuración de la capa de óxido de aluminio en el proceso de doble anodizado.



Figura 63 Coeficiente de fricción y tasa de desgaste para 100°C en placas anodizadas al añadir 30 g/L de aditivo, ensayo en frío.

### 6.3 Caracterización tribológica de material industrial a temperatura.

# 6.3.1 CARACTERIZACIÓN TRIBOLÓGICA A 50°C, PIEZAS ELECTRO-PULIDAS (24V/63C, 30V/63C) Y ANODIZADAS A 22°C, 15V.

En la Figura 64 se muestran los valores de coeficiente de fricción y tasa de desgaste en función de la velocidad 60 y 100 rpm. La caracterización se realizó a  $50 \pm 10^{\circ}$ C, utilizando una carga de 1,5 N.

Los coeficientes de fricción son menores para el caso de la pieza 24V/63C ( $\cong 0,6$ ) en comparación con la pieza 30V/63C ( $\cong 0,7$ ), lo que se ve reflejado en las menores tasas de desgaste obtenidas para la pieza 24V/63C a ambas velocidades. Sin embargo, las tasas de desgaste de la pieza 30V/63C son sólo ligeramente mayores a los de la pieza 24V/63C.









Figura 64 Coeficiente de fricción y tasa de desgaste con la velocidad a 50°C para las piezas comerciales 24V/63C y 30V/63C.

# 6.3.2 CARACTERIZACIÓN TRIBOLÓGICA A 100°C, PIEZAS ELECTRO-PULIDAS (24V/63C, 30V/63C) Y ANODIZADAS A 22°C, 15V.

En la Figura 65 se muestran los valores de coeficiente de fricción y tasa de desgaste en función de la velocidad 60 y 100 rpm. La caracterización se realizó a  $100 \pm 10^{\circ}$ C, utilizando una carga de 1,5 N.

Los coeficientes de fricción obtenidos para la caracterización tribológica a 100°C son de alrededor a 0,7 para la pieza 24V/63C y de 0,6-0,8 para la pieza 30V/63C. En consecuencia se obtienen menores tasas de desgaste para la pieza 24V/63C y valores de hasta 6 x  $10^{-6}$  g/Nxm para la pieza 30V/63C a 60 rpm.



Figura 65 Coeficiente de fricción y tasa de desgaste con la velocidad a 100ºC para las piezas comerciales negra y dorada.

### 6.3.3 CARACTERIZACIÓN TRIBOLÓGICA A 25°C EN PIEZAS DE DIFERENTE TEMPERATURA DE ANODIZADO.

En la Figura 66 se muestran los coeficientes de fricción y tasas de desgaste de las piezas anodizadas a 15°C/14V, 21°C/14V, y otra pieza a 15°C/17V.







Figura 66 Coeficiente de fricción y tasa de desgaste para 50°C de las piezas a diferente temperatura y voltaje.

### 6.3.4 CARACTERIZACIÓN TRIBOLÓGICA A 100°C EN PIEZAS DE DIFERENTE TEMPERATURA DE ANODIZADO.

En la Figura 67 se muestran los coeficientes de fricción y tasas de desgaste de las piezas morada 15°C\_14V, morada 21°C\_14V, y otra pieza a 15°C/17V.



Figura 67 Coeficiente de fricción y tasa de desgaste con la velocidad a 100°C para las piezas con diferente temperatura y voltaje.







# 6.4 Caracterización superficial de las capas anódicas, post aplicación de ensayo tribológico

Se ha realizado la caracterización por medio de microscopía óptica a las piezas electropulidas 24V/63C y 30V/63C post aplicación del ensayo tribológico a 50 y 100°C.

# 6.4.1 CARACTERIZACIÓN MEDIANTE MICROSCOPÍA ÓPTICA (MO) PARA LA PIEZA ELECTROPULIDA A 24V/63C.

El ensayo tribológico se ha realizado a la placa 24V/63C a 50 y 100°C, 1,5N de carga y velocidades de 60 y 100 rpm.

Figura 68 se pueden observar las micrografías MO para la placa 24V/63C. En todos los casos se observan ranuras paralelas y continuas en dirección de la pista de desgaste, debidas a deformación plástica. Las placas presentan desgaste cohesivo debido a la microabrasión en la dirección del deslizamiento, excepto para el ensayo a 50°C y 60 rpm que exhibe un desgaste inferior que en el resto de los casos.

La pista de deslizamiento aumenta de 283 a 632  $\mu$ m en la porción mas ancha del desgaste cuando la velocidad radial aumenta de 60 a 100 rpm a 50°C. Para 100°C la pista de desgaste es de alrededor  $\cong$  700  $\mu$ m para ambas velocidades.

Los ensayos tribológicos muestran a un aumento x200, que la capa anódica de la placa 24V/63C presenta microfisuras, es quebradiza para las condiciones del ensayo (excepto para 50°C/60rpm), desprendiendo partículas fuera de la zona de contacto y siguiendo el movimiento hacia adelante de la bola de acero











Figura 68 Micrografías MO para la pieza 24V/63C post ensayo tribológico a 50 y 100°C

# 6.4.2 CARACTERIZACIÓN MEDIANTE MICROSCOPÍA ÓPTICA (MO) PARA LA PIEZA ELECTROPULIDA 30V/63C.

En la Figura 69 se muestran las micrografías para el ensayo tribológico de la pieza 30V/63C a 50 y 100°C, 1,5N de carga y velocidades de 60 y 100 rpm.











Figura 69 Micrografías MO para la pieza 30V/63C post ensayo tribológico a 50 y 100°C

En todos los casos se muestra la existencia de microfisuras y desprendimiento de partículas de desgaste que se propagan fuera de la zona de contacto en ambos lados de la dirección de deslizamiento siguiendo el movimiento hacia adelante de la bola de acero. También se observan las líneas debidas a la deformación plástica de las capas compactadas.

Para ambas temperaturas con x200 de aumento y 100 rpm de velocidad, se observa como la capa se descascara. El ancho de la pista de deslizamiento para la placa 30V/63C aumenta con el aumento de velocidad y con el aumento de temperatura.

Las tasas de desgaste para la pieza 30V/63C fueron mayores que las tasas de desgaste para la pieza 24V/63C bajo las condiciones estudiadas.







### 7 Valoración y análisis de resultados

### 7.1 Comparación de resultados

En la Figura 70 se compara el espesor en función del tiempo y del aditivo, como se desprende de dicha gráfica, el espesor crece de forma casi lineal con el tiempo. En el caso de 20 o 10+20 minutos, el espesor se mantiene, ya que el tiempo final de anodizado es el mismo.

En cuanto a la presencia de aditivo, no mejora el aumento del espesor, en todo caso parece que la velocidad de crecimiento de la capa anódica es menor.



Figura 70 Gráfica comparativa del espesor vs tiempo y aditivo.

En la Figura 71 se representa la comparativa de la homogeneidad de la capa anódica vs temperatura y aditivo. Vemos que para un mismo voltaje, a temperaturas más frías, del orden de los 15°C, el valor es menor, indicativo de menor porosidad. Lo mismo ocurre cuando se añade aditivo, la porosidad también es menor que sin aditivo. Si bajamos el voltaje por debajo de 15V, también parece que afecta a la porosidad, empieza a aumentar.

Así mismo, una superficie electro-pulida también favorece a una menor porosidad, donde un aumento en el voltaje del electro-pulido, influye en una mayor porosidad.



### TRIBANO

Efecto de la temperatura en el comportamiento tribológico con la morfología de capas anódicas.

Figura 71 Gráfica comparativa de la homogeneidad de la capa anódica vs voltaje y temperatura.

En la Figura 72 se representa la homogeneidad de la capa anódica comparando en función de la temperatura y aditivo. Se observa que el valor disminuye con una menor temperatura, así como con la presencia del aditivo.



Figura 72 Gráfica comparativa de la homogeneidad de la capa anódica vs temperatura y aditivo..

En la Figura 73 se representa el grado de corrosión de las placas anodizadas en diferentes condiciones. A menores valores de voltaje, menos resistente a la corrosión, observando que la resistencia a la corrosión mejora con el espesor, con menor temperatura, con presencia de aditivo, y con el doble anodizado.



Figura 73 Gráfico de la corrosión vs condición de anodizado

En la Figura 74 se representa la evolución del coeficiente de fricción en función de la temperatura de servicio, donde podemos observar que el coeficiente de fricción se mantiene



más o menos lineal para igual temperatura, siendo menor a temperatura ambiente, subiendo cuando se eleva la temperatura, aunque parecen paralelos a temperatura de 50 y 100 °C.

Por otra parte, cuando se comparan valores de coeficiente de fricción entre condiciones con o sin aditivo, el coeficiente de fricción mejora con aditivo, así como más regular para la adición del 2% de aditivo.



Figura 74 Gráfica de la evolución del coeficiente de fricción en función de la temperatura.

En la Figura 75 se representa la tasa de desgaste en función de la temperatura y voltaje de aplicación, así como en función del aumento de temperatura en servicio. Vemos que la tasa de desgaste aumenta considerablemente al pasar de 25 a 100 °C en servicio, observando a su vez que el aumento de la temperatura en el anodizado, afecta aumentando el desgaste. También un pequeño cambio de voltaje afecta en el desgaste, en ese caso al subir de 14 a 17V, aumenta ligeramente el desgaste.









Figura 75 Gráfica de la tasa de desgaste vs temperatura y voltaje..

En la Figura 76 se representa la tasa de desgaste para las placas con electropulido previo, observando que la placa con electropulido a mayor voltaje presenta mayor desgaste.



Figura 76 Gráfica tasa de desgaste del electropulido vs temperatura..

En la Figura 77 se refleja la tasa de desgaste a 25 °C con 60 y 100 rpm en función de la presencia de aditivo, el aditivo mejora la tasa de desgaste, y la cantidad de 20 g/l, el la de menor tasa de desgaste.









Figura 77 Grafica de la evolución de la tasa de desgaste en función del aditivo.

En la Figura 78 se representa la tasa de desgaste para diferentes cargas de aditivo vs temperatura de servicio. Vemos que la menor tasa de desgaste se produce con carga de 20 g/l de aditivo, reduciéndose a su vez para 30 minutos y 10+20 minutos, lo que indica que el doble anodizado mejora con respecto a un solo anodizado.



Figura 78 Grafica de la evolución de la tasa de desgaste del aditivo vs temperatura.







### **Resumen.** Conclusiones

- El espesor de la capa anódica desciende al aumentar la temperatura, para un mismo voltaje.
- En general al aumentar la densidad de corriente del anodizado, aumentaría el espesor y porosidad, para una misma temperatura, si se baja la temperatura, la porosidad disminuye.
- El espesor en piezas a 15°C tienen un espesor levemente superior a las de 21°C, teniendo el mismo voltaje, siendo un rango bastante optimizado.
- Al trabajar a temperaturas más bajas, 15°C 21°C, mejora la homogeneidad y reparto de la porosidad, es más regular. La temperatura afecta a la velocidad de disolución, aumenta con la temperatura, también al tamaño de poro, que aumenta con la temperatura, sobre todo a partir de los 30-35°C, donde el espesor disminuye.
- La homogeneidad de la capa anódica mejora a menor temperatura para un mismo voltaje, teniendo en cuenta un rango de voltaje, ya que una subida o baja de ese rango de voltaje, influye en la homogeneidad. La presencia del aditivo también mejora la homogeneidad de la capa anódica. Una superficie pulida, también mejora la homogeneidad de la capa anódica.
- La homogeneidad está relacionada con la porosidad, tamaños de poros más pequeños, lo que influye en el coeficiente de fricción y tasa de desgaste.
- El coeficiente de fricción disminuye con la homogeneidad de la capa anódica, de ahí que disminuye con la presencia de aditivo, una temperatura de anodizado menor, superficie pulida y también con el doble anodizado.
- La tasa de desgaste está influenciada con la temperatura de anodizado, mayor a mayor temperatura. Es menor con una superficie pulida. También mejora con la presencia de aditivo y doble anodizado.
- Los ensayos tribológicos a temperaturas altas, muestran que la tasa de desgaste aumenta considerablemente, pero que la presencia de aditivo y doble anodizado lo mejora de forma significativa.
- Por otra parte, hemos visto que la presencia de aditivo en una proporción del 2%, es la que mejores resultados han dado.
- El comportamiento corrosivo mejora con el tiempo (más espesor), temperaturas más bajas, con presencia del aditivo, y con el doble anodizado.
- Las huellas del desgaste presentan microfisuras debido a la presencia de tensiones de corte durante la prueba de fricción, siendo un desgaste por deformación de la capa anódica, descamación con microcracking.





