

APLICACIÓN TRANSVERSAL SOBRE CALIDAD SUPERFICIAL EN INGENIERÍA DE FABRICACIÓN
TRANSVERSAL APPLICATION ON SURFACE QUALITY CONTROL IN MANUFACTURING ENGINEERING

G. Guerrero-Vaca*
O. Rodríguez-Alabanda*
J. C. Melero-Bolaños
E. Trujillo-Flores

me1guvag@uco.es (*G. Guerrero-Vaca), orodriguez@uco.es (*O. Rodríguez-Alabanda, corresponding autor),

Escuela Politécnica Superior (Universidad de Córdoba)

Abstract

A series of physical mouldings have been manufactured and coated: rectangular plates of Al-Mg, with different polymeric materials that have allowed including different points of view in the the engineering of surfaces that are contemplated in the subjects involved in this project. On these models it has been possible to measure, to verify, to propose studies, reports, etc., and has developed activities academically directed and works by competences.

Keywords: polymeric coatings; surface quality; AL-Mg3.

Resumen

Se ha fabricado y recubierto una serie de moldes físicos: chapas rectangulares de Al-Mg, con distintos materiales poliméricos que han permitido abarcar distintos puntos de vista de la ingeniería de superficies que se contemplan en las asignaturas implicadas en este proyecto. Sobre estos modelos se ha podido medir, verificar, proponer estudios, informes, etc., y se ha desarrollado actividades académicamente dirigidas y trabajos por competencias.

Palabras clave: recubrimientos poliméricos; calidad superficial; AL-Mg3.

1. INTRODUCCIÓN

En los procesos de fabricación resulta de gran importancia valorar la textura de los acabados de las piezas fabricadas. Las técnicas para fabricar piezas, elementos de máquinas, útiles, etc., dedican especial atención al acabado superficial. Los diseñadores de estos procesos, a su vez, deben de tener en cuenta en su documentación técnica los valores de la rugosidad. En el diseño de máquinas es, de igual modo, de especial valor, la calidad superficial, pues está relacionada con el coeficiente de rozamiento, desgaste, fricción, deslizamiento, ajuste, etc. En definitiva, en diversos campos del conocimiento de la producción o fabricación mecánica existe la necesidad estudiar la rugosidad y los parámetros que la definen. En algunas asignaturas del Grado en Ingeniería Mecánica como son Ingeniería de Fabricación, Procesos de Fabricación Metrología y Control de Calidad, Cálculo y Diseño de Máquinas, Ingeniería de Materiales, etc., estudian la influencia del acabado superficial. En este contexto, este trabajo, plantea una actividad académica transversal, pues afecta a una gran cantidad de asignaturas, en la que se muestren los conceptos de acabado superficial y la relación con alguno de los contenidos que se desarrollan en las distintas asignaturas. También se ha desarrollado parcialmente la actividad en la asignatura de Ingeniería de Fabricación de los Grados de Ingeniería Electrónica e Ingeniería Eléctrica.

Además en ingeniería mecánica, existen multitud de elementos mecánicos que son tratados y recubiertos superficialmente con objeto de adecuarse a las especificaciones de diseño. Podríamos citar desde cualquier elemento de transmisión mecánica: árbol de transmisión, ejes, engranajes, pares cinemáticos, cadenas de transmisión, hasta elementos relacionados con la unión de partes: tornillos, roblones, remaches... o todo tipo de elementos mecánicos como frenos, embragues, levas, volantes de inercia, etc.

Esta actividad ha englobado varias de las líneas de acción prioritarias contempladas en el Plan de innovación docente del curso 2015/2016 como:

- Las actividades académicamente dirigidas
- El trabajo por competencias

2. OBJETIVOS

El objetivo de este proyecto ha sido desarrollar una actividad docente coordinada entre distintas asignaturas del Grado de Mecánica, del Grado de Electricidad y Grado de Electrónica. Los docentes del área de conocimientos de Ingeniería de los Procesos de Fabricación del Departamento de Mecánica de la Universidad de Córdoba han sido los coordinadores y responsables de la actividad.

Se ha fabricado y recubierto una serie de moldeos físicos con distintos materiales poliméricos que han permitido abarcar distintos puntos de vista que se contemplan en las asignaturas implicadas en este proyecto. Sobre estos modelos se ha podido medir, verificar, proponer estudios, informes, etc.

Durante el desarrollo de las asignaturas implicadas en este proyecto se han propuesto una serie de sesiones prácticas coordinadas por el profesor responsable, en cada caso. Estas prácticas han dado lugar a informes y a la realización de una actividad final sobre propiedades, características y aplicaciones de los recubrimientos s en el ámbito mecánico, eléctrico y electrónico. Estas sesiones prácticas han sido:

- Caracterización dimensional de las chapas. (Ingeniería de Fabricación).
- Caracterización superficial. Determinación de los valores de rugosidad R_a , R_z y R_q (Procesos de Fabricación, Metrología y Control de Calidad).
- Determinación del espesor de recubrimiento. (Ingeniería de Fabricación).
- Caracterización de dureza del recubrimiento. (Ingeniería de Fabricación).

Otro objetivo obtenido ha sido potenciar la coordinación docente entre los responsables de las distintas asignaturas implicadas. De igual modo se ha dotado al alumno de una referencia física a través de un modelo común, que ha permitido visualizar lo mismo en distintos ámbitos, mejorando competencias transversales de análisis y síntesis, de resolución de problemas y de puesta en práctica de conocimientos teóricos.

3. METODOLOGÍA

Para realizar los ensayos sobre calidad superficial se han elegido probetas de aluminio, placas rectangulares, sobre las cuales se han aplicado una serie de recubrimientos poliméricos alcanzando distintas texturas.

La aplicación de los recubrimientos en las distintas probetas se ha realizado por contratación externa a una empresa de experiencia en este ámbito.

Se han estudiado texturas con recubrimientos de diversos tipos de polímeros fluorados después de haber sido aplicados, en su estado inicial: listas para su uso, y tras el ataque mediante un chorreado, es decir, desgastadas tras un ataque artificial por abrasión mecánica.

3.1 DESCRIPCIÓN DE LA EXPERIENCIA

Los recubrimientos fluoro-poliméricos tienen una amplia aplicación en elementos que requieran unas determinadas propiedades antiadherentes, baja fricción, alto desmoldeo, alto deslizamiento. Son recubrimientos utilizados en diversos sectores industriales: alimentación, industria mecánica, industria química, industria de transformación de plásticos, etc.

Se han definido los parámetros a estudiar en estas texturas aplicadas y se ha propuesto la posible influencia que podría tener estos valores desde el punto de vista de su utilidad final.

El manejo de estos conceptos permite y permitirá (algunas asignaturas serán cursadas en años académicos posteriores al presente) profundizar y obtener una visión integral sobre la calidad superficial en las ingenierías de ámbito industrial.

En las asignaturas implicadas en el área de Ingeniería de Procesos de Fabricación (véase Tabla 1), el docente ha propuesto una guía detallada con los objetivos y las acciones a desarrollar, los criterios de calificación, la fecha y modo de entrega y todos los detalles para la realización de una actividad o un informe sobre calidad superficial. La actividad transversal comienza en la asignatura de Ingeniería de Fabricación (2º curso) y termina en Procesos de Fabricación Metrología y Control de Calidad (4º curso).

Tabla 1. Asignaturas implicadas y tareas relacionadas.

Asignaturas del Grado en Ingeniería Mecánica	Curso y cuatrimestre	Conceptos en Guía docente	Tareas
Ingeniería Fabricación	2º Curso. 2º Cuatr.	Tema 4. Medición dimensional: instrumentos básicos	Manejo de equipos de metrología dimensional
Cálculo y Diseño de Máquinas	3er Curso. 1er Cuatr.	3.2 Cojinetes de fricción. 3.3 Cojinetes de rodadura (rodamientos).	Estudio de la relación acabado superficial/fricción
Ingeniería de Materiales	3er Curso. 1er Cuatr.	Selección de materiales para ingeniería.	Materiales, su estado y la influencia en los acabados superficiales
Dibujo Técnico	3er Curso. 1er Cuatr.	B.12. Indicaciones de los estados superficiales en los Dibujos objeto y campo de aplicación (UNE 1037-83, ISO 1302)	Expresión gráfica de los estados superficiales
Procesos de Fabricación Metrología y Control de Calidad	4º Curso. 1er Cuatr.	Tema 4. Medida de la calidad superficial.	Parámetros de rugosidad y manejo del rugosímetro

3.2 MATERIALES Y MÉTODOS

Se ha tratado como sustrato la aleación de aluminio magnesio AlMg3, designado por la norma UNE EN-AW 5754. Presenta buena conformabilidad, excelente resistencia a la corrosión y a altas temperaturas, gran dureza, buena manejabilidad, buena soldabilidad, bajo peso. Es empleada habitualmente en la industria de la alimentación, particularmente en panificación y afines.

Tabla 2. Propiedades mecánicas del AlMg3.

Propiedades mecánicas	
Límite Elástico Rp0,2	80 MPa
Carga de Rotura	190 MPa
Elongación A50	12 %
Dureza HBW	(2,5/62,5)

El recubrimiento utilizado es un fluoro-polímero PTFE suministrado por la marca comercial Whitford y fue aplicado sobre sustratos de AlMg3, EN-AW 5754. Sobre esta superficie se ha aplicado un recubrimiento multicapa que ha consistido en un primer (o recubrimiento inferior) definido como XYLAN XLR 17-080 y después se le aplica sobre éste un top (o recubrimiento superior) definida como XYLAN XLR 17-353/D9172. En conjunto este producto es un recubrimiento rico en PTFE.



Figura 1. Esquema de recubrimiento multicapa de PTFE.

El revestimiento Eterna es un excelente recubrimiento antiadherente con base de PTFE que se caracteriza por su alto desmoldeo, larga vida y facilidad de aplicación. Las muestras son placas de aluminio-magnesio rectangulares de 140x120 mm² de 1,2 mm de espesor. Estas muestras fueron suministradas por la empresa Tecnimacor, S.L.

Para la medición de la rugosidad de la superficie se ha usado un equipo de medida Mitutoyo SJ-201 (véase Figura 2) donde se miden parámetros de rugosidad relevantes, seleccionando la longitud básica de muestreo y la longitud de evaluación.



Figura 2. Rugosímetro Mitutoyo SJ-201.

Los parámetros usados para la medida de rugosidad han sido los siguientes:

Desviación media aritmética, R_a . Es el parámetro más general para definir el acabado superficial. Se define como la media de los valores absolutos de las ordenadas $Z(x)$, comprendida en la longitud de muestreo, si dicha área (franja elemental del perfil de rugosidad, $|Z|dx$), la dividimos por la longitud de muestreo (L), tendremos el parámetro R_a , definiéndolo como:

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |Z| dx$$

Suele expresarse en μm y para su determinación se calcula su valor en cada una de las longitudes básicas comprendidas en una longitud de exploración y se calcula la media de todos ellos.

Desviación media cuadrática, R_q . El parámetro indica la media cuadrática de los valores absolutos de la ordenada $Z(x)$, comprendida en una longitud básica o de muestreo.

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L Z^2 dx}$$

Frente a la media aritmética, presenta la ventaja de que es más sensible a las alturas ocasionales que aparecen en el perfil, por considerar el cuadrado de las irregularidades.

Máxima altura de perfil, R_z . Suma de la máxima altura del pico, Z_p y de la máxima profundidad del valle, Z_v , comprendida en una longitud básica. Donde se calculará por.

$$R_z = R_p + R_v$$

Donde R_p y R_v , son la máxima altura de pico y de valle, respectivamente.

Se han seguido dos procedimientos para la determinación del espesor y pérdida de espesor del recubrimiento.

Medida directa. Se ha usado un instrumento para la medición de espesor mediante una sonda conectada a una interfaz. Se han realizado lecturas del recubrimiento sobre el sustrato y, posteriormente tras el chorreado. La diferencia muestra la pérdida de espesor. El instrumento usado es *Fischer MPOR-FP* representado en la Figura 3.



Figura 3. Medida de espesor *Fischer MPOR-FP*.

Cálculo de espesor por pérdida de masa. Para este método se pesaron todas las muestras en una balanza *Gibertini Crystal 200CAL* (véase Figura 4) antes de ser chorreadas y después se midieron los pesos de las muestras tras ser chorreadas.



Figura 4. Balanza *Gibertini Crystal 200CAL*.

Realizando una estimación de la densidad del polímero y conociendo la superficie chorreada se puede determinar la pérdida de espesor.

$$\rho = \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{\Delta m}{S \cdot \Delta e}$$

Siendo Δm la pérdida de masa, S la superficie chorreada y definiendo la pérdida de espesor como Δe , ésta última se puede estimar como sigue:

$$\Delta e = \frac{\Delta m}{S \cdot \rho}$$

El chorreado, también conocido como "sand blasting" o arenado, utiliza todo tipo de abrasivos, entre ellos: sílice, vidrio, óxido de aluminio, partículas de acero e incluso materiales orgánicos como el bicarbonato o la cáscara de nuez, entre otros. Es un método frecuente debido a su bajo coste y a la gran diversidad de piezas con distintas geometrías sobre las que se puede actuar.

La Figura 5 muestra la cabina de chorreado que se ha usado Sandblast Cabinet CAT-990. Se trata de un equipo de uso manual que proyecta el abrasivo por un sistema de succión. El equipo está dotado de una "pistola" por la que se proyecta el abrasivo, una cabina cerrada en la que se ubican las piezas a tratar y una serie de elementos de reglaje: manómetro de presión, pedal de accionamiento, entre otros. La cabina está dotada de un filtro de mangas y un extractor para eliminar el polvo. Esta cabina usa el efecto Venturi por el cual cuando el aumento de velocidad es muy grande se producen presiones negativas y si en este punto del conducto se introduce el abrasivo se mezclará con el aire y será proyectado contra la muestra.



Figura 5. Cabina de chorreado Sandblast Cabinet CAT-990.

Para poder tener uniformidad en el chorreado se fabricó una estructura (Figura 6) para fijar la pistola de chorreado, de este modo se pudieron fijar las variables de distancia y ángulo.



Figura 6. Estructura para cabina de chorreado

5. RESULTADOS OBTENIDOS

El desarrollo de este proyecto ha consistido en la preparación de diversas placas de aluminio magnesio de EN-AW5754 H32 sobre las que se han aplicado los recubrimientos fluoropoliméricos que han permitido ser utilizadas para desarrollar las actividades e informes que se han descrito con los resultados que se describen a continuación.

5.1 ESPECÍMENES TOMADOS COMO MUESTRA

La Tabla 3 presenta las dimensiones de cada una de las muestras o especímenes empleados en este trabajo:

Tabla 3. Dimensiones de las muestras de sustrato de AlMg3.

RESULTADOS			
Muestra	Ancho [mm]	Largo [mm]	Largo tratado [mm]
1	30,10	75,50	44,00
2	30,80	73,54	43,50
3	29,40	75,50	46,84
4	28,80	74,62	43,58
5	25,40	73,48	50,30
6	29,72	74,50	43,32
7	28,50	73,34	43,84
8	29,58	73,60	47,00
9	28,78	73,80	44,82
10	28,20	73,40	45,40
11	24,74	71,68	41,44
12	31,42	75,50	41,18
13	29,72	72,86	49,30
14	30,00	71,32	48,60
15	30,20	75,68	46,00
16	29,68	74,80	51,00
17	28,80	74,72	36,12
187	29,34	72,42	42,16

5.2 CONDICIONES EN EL PROCESO DE CHORREADO

La Tabla 4 presenta las condiciones de trabajo y abrasivos empleados en esta tarea:

Tabla 4. Condiciones de aplicación del chorreado.

	Tipo de abrasivo	PRESIÓN (MPa)	TIEMPO (s)	DISTANCIA (mm)	ANGULO (Grados)
MUESTRA 2.2	Bicarbonato	0,3	25	300	135°
MUESTRA 2.5	Bicarbonato	0,3	26	300	135°
MUESTRA 2.6	Bicarbonato	0,3	15	300	135°
MUESTRA 4.3	Marrón	0,2	10	300	135°
MUESTRA 4.5	Marrón	0,1	40	300	135°
MUESTRA 4.6	Marrón	0,1	30	300	135°

5.3 MEDICIÓN DE LA RUGOSIDAD

La Tabla 5 presenta los valores de los diferentes parámetros de rugosidad medidos en los especímenes empleados en el trabajo:

Tabla 5. Valores de rugosidad medidos.

	Tipo de abrasivo	Inicial			Final		
		R _a (μm)	R _z (μm)	R _q (μm)	R _a (μm)	R _z (μm)	R _q (μm)
MUESTRA 2.2	Bicarbonato	1,34	7,55	1,74	7,12	38,21	8,44
MUESTRA 2.5	Bicarbonato	1,14	6,34	1,43	6,27	35,23	7,66
MUESTRA 2.6	Bicarbonato	1,30	6,23	1,57	5,49	36,16	6,81
MUESTRA 4.3	Marrón	1,30	7,12	1,60	4,42	32,21	5,70
MUESTRA 4.5	Marrón	1,50	7,73	1,84	4,18	27,75	5,22
MUESTRA 4.6	Marrón	1,41	7,54	1,77	3,89	28,57	5,00

5.4 MEDICIÓN DE ESPESOR

La Tabla 7 presenta los valores correspondientes a la pérdida o disminución del espesor de cada uno de los especímenes una vez chorreados y tras ser sometidos a la acción de la solución ácida:

Tabla 6. Disminución de espesor medida.

RESULTADOS			
Muestra	Δz chorreado [μm]	Δz ácido [μm]	Δz total [μm]
1	0,2640	11,1245	11,3885
2	0,1177	8,9317	9,0494
3	0,2255	11,2314	11,4566
4	0,6049	6,5599	7,1648
5	0,2679	1,3828	1,6507
6	0,1656	2,4337	2,5993
7	0,3987	15,1001	15,4988
8	0,1225	11,7244	11,8469
9	0,2982	5,3750	5,6732
10	0,1771	2,0308	2,2079
11	0,2068	1,7882	1,9950
12	0,3232	4,7403	5,0636
13	0,2463	12,3305	12,5768
14	0,2493	13,6946	13,9438
15	0,1750	8,3501	8,5251
16	0,2703	15,2168	15,4870
17	0,2169	18,6172	18,8341
18	0,2039	2,2271	2,4311
19	0,2113	9,3811	9,5924
20	0,1421	17,7028	17,8449
21	0,2239	7,9572	8,1811
22	0,2136	1,6828	1,8964

5.5 MEDICIÓN DEL PESO

La Tabla 7 presenta los valores de los diferentes pesos medidos en los especímenes, antes del chorreado, después del chorreado y tras el ataque con la solución ácida:

Tabla 7. Medición del peso de los especímenes.

RESULTADOS			
Muestra	Peso inicial [g]	Peso chorreado [g]	Peso ácido [g]
1	13,5390	13,5372	13,4930
2	13,4781	13,4773	13,4414
3	12,6819	12,6804	12,6340
4	12,7879	12,7840	12,7593
5	10,9643	10,9628	10,9575
6	12,9765	12,9754	12,9660
7	12,5030	12,5005	12,4439
8	12,9473	12,9465	12,8976

6. UTILIDAD

La realización de este proyecto ha permitido a los alumnos implicados él (hay que recordar que algunas actividades y asignaturas tienen carácter optativo) establecer las características y propiedades básicas de un recubrimiento superficial: indicadores de calidad superficial, espesor de recubrimiento, pérdida por desgaste, etc...

Además, estos alumnos han desarrollado un análisis crítico sobre las expectativas de aplicabilidad de los recubrimientos seleccionados en función de los datos obtenidos así como de las características de éstos. Han podido adquirir las destrezas suficientes para saber interpretar las propiedades más importantes de un recubrimiento industrial, propiedades que están relacionadas con su calidad superficial. También han desarrollado competencias específicas para poder establecer las especificaciones de diseño de un recubrimiento industrial.

7. CONCLUSIONES

Como resultado de este proyecto los alumnos han generado y generaran diversos informes y trabajos que tienen un nexo común y que permite mejorar el sentido de continuidad a asignaturas que se imparten en distintos cursos académicos. Todos estos aspectos están ligados en la disciplina conocida como calidad superficial en la ingeniería de superficies.

Los equipos que permiten los diversos ensayos sobre estas materias están disponibles en los diversos espacios para realizar las prácticas de estas asignaturas y lo estarán en sucesivos cursos académicos. La actividad ha sido un vector para ponerlos a punto, en algún caso, o para poder utilizarlos desde otro ámbito tecnológico poco desarrollado.

Los alumnos han podido familiarizarse con los aspectos técnicos y prácticos de los recubrimientos industriales y durante las sesiones teóricas de las distintas asignaturas se ha podido hacer especial hincapié en las aplicaciones de estos recubrimientos.

El manejo y conocimiento de estos equipos ha dado pie a la propuesta y desarrollo de dos TFG relacionados con la calidad superficial.

La actividad ha permitido activar habilidades de los alumnos, referidas a la enseñanza en competencias, así como el aprendizaje a través de actividades académicamente dirigidas.

8. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

PUERTOLAS J.A., RIOS R., CASTRO M., CASALS J.M.. "Tecnología de superficies en materiales". Síntesis, 2010.

GONCALVES DOS SANTOS, A. M. *Medida del grado de anti-adherencia de recubrimientos repelentes*. Trabajo Fin de Grado, Universidad de Granada, 2015.

PAZ GÓMEZ. G. *Estudio de repelencia al agua y análisis topográfico de recubrimientos antiadherentes superhidrofóbicos*. Trabajo fin de máster Universidad de Granada. 2016.

TRUJILLO FLORES E., GUERRERO VACAS G. *Bloque I: Metrología, Tolerancias y Verificación*, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Córdoba, 2015.

DUPONT.Teflon®AF. Disponible en web:

<http://www.dupont.com/Teflon_Industrial/en_US/assets/downloads/h44587.pdf>, Consultado: 25-04-2016.

TECNIMACOR S. L. Granallado y Chorreado. Disponible en web:

<<http://www.tecnimacor.es/productos/granallado-y-chorreado>>. Consultado: 12-5-16.

ASTM D3359-09. Standard test methods for measuring adhesion by tape test.ASTM International, 2009.

UNE-48269:1995. Pinturas y barnices. Dureza de película. Método del lápiz. AENOR. Madrid. 1995.

UNE-EN 573-3:2009. Aluminio y aleaciones de aluminio. Composición química y forma de los productos de forja. Parte 3: Composición química y forma de los productos. 2009

UNE-EN ISO 148-1:2009. Materiales metálicos. Ensayo de flexión por choque con péndulo Charpy. Parte 1: Método de ensayo. AENOR. Madrid. 2009

UNE-EN ISO 2409:2007. Pinturas y barnices. Ensayo de corte por enrejado. AENOR. Madrid. 2007

UNE-EN ISO 2808:2007. Pinturas y barnices. Determinación del espesor -de película. AENOR. Madrid. 2007

UNE-EN ISO 4287:1999. Especificación geométrica del producto GPS. Calidad superficial: Método del perfil. Términos, definiciones y parámetros del estado superficial. AENOR. Madrid. 1999