

## Determinación de Estrategias de Mecanizado Tres Ejes de Superficies Cónavas y Convexas en Aluminio EN-AW-7075n

### Determination of machining strategies in Three Axes of Concave and Convex surfaces in Aluminum EN-AW-7075n

Luis Christian Juiña<sup>1</sup>, Villacis Arce Richard Xavier<sup>2</sup>, Chanataxi Gualotuña Juan Gabriel<sup>2</sup>  
Victor Hugo Cabrera<sup>1</sup>, Nancy Veronica Moreno<sup>1</sup>, Christian Alexander Anrango<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador ( {ljuina, vcabrera, nmoreno} @ups.edu.ec )

<sup>2</sup>Universidad Politécnica Salesiana, Quito – ( {rvillacisa, jchanataxig} @est.ups.edu.ec )

#### Resumen

El presente proyecto técnico describe los parámetros en un Centro de Mecanizado vertical controlado por Ordenador EMCO Concept Mill 260, para mejorar la rugosidad superficial en una muestra de Aluminio EN-AW-7075 en superficies cónavas y convexas variando las Estrategias, los RPM, el Avance y el Paso. Con el software Autodesk Inventor se procede con el dibujo de las probetas con medidas de 25mm de ancho, 25mm alto y 25mm de profundidad para su posterior programación en Autodesk Inventor HSM. Mediante el método estadístico Taguchi, que consiste en un arreglo ortogonal de 27 pruebas y tres niveles, es aplicado para la determinación de rugosidades, se verifica y valida mediante el método ANOVA.

Se determinó que los factores como el Avance y la Estrategia afectan de una manera considerable al estudio en las superficies cónavas mientras que el factor como el Paso influye significativamente al estudio de las superficies convexas.

Estos modelos dan como resultados rugosidades de  $0.251\mu\text{m}$  en la muestra optima, obteniendo una mejora del 2.47% para superficies cónavas mientras que para las superficies convexas es de  $0.375\mu\text{m}$  en la muestra optima con una mejora del 1.1%.

#### Abstract

This technical project gets the efficiency in a Vertical Machining Center controlled by the EMCO Concept Mill 260 Computer, in order to improve the surface roughness in an EN-AW-7075 Aluminum sample in concave and convex surfaces by varying the Strategies. The parameters to be considered are RPM, linear speed and cutting depth. The study based on the software Autodesk Inventor and Autodesk Inventor HSM. The tests are carried out in the CNC laboratories and data is taken. Taguchi statistical method is applied to determine roughness, verified and validated using the ANOVA method. The method consists on an orthogonal arrangement of 27 tests and three levels.

It was determined that concave surfaces were affected by the linear speed and the machining strategy. On the other hand, convex surfaces were influenced by cutting depth factor.

The roughness obtained was  $0.251\mu\text{m}$  in the optimum sample. The finish surface has an improvement of 2.47% for concave surfaces. The roughness obtained in concave surfaces was  $0.375\mu\text{m}$  with an improvement of 1.1%.

#### Palabras clave:

Arreglo ortogonal, Método Taguchi, ANOVA, Rugosidad

#### Keywords:

Orthogonal arrangement, Taguchi Method, ANOVA, Rugosity

#### Introducción

Las aleaciones de aluminio de la serie 7000 tienen aplicaciones importantes dentro de la industria metalmeccánica en la elaboración de matrices para moldes de plásticos para procesos de extrusión de soplado y estiro-soplado, debido a su peso ligero asociado, alta resistencia y buenas características al maquinar. El aluminio 7075 T6 es la aleación de aluminio de mayor resistencia, posee una alta tenacidad a la fractura y un crecimiento de grietas con baja fatiga [1]. Las propiedades del aluminio hacen que este metal y sus aleaciones sean los más económicos y atractivos para una amplia variedad de usos: apariencia, capacidad de fabricación, propiedades físicas, propiedades mecánicas y resistencia a la corrosión [2].

El mecanizado se utiliza para convertir piezas fundidas, piezas forjadas o bloques preformados de metal en formas deseadas, con el tamaño y el acabado especificados para cum-

plir con los requisitos de diseño [3]. Los programas de diseño CAD (Diseño asistido por computador) van de la mano con los procesos CAM (Manufactura Asistida por Computador) y CAE (Ingeniería Asistida por Computador) facilitando su operación en la innovación de los mismos permitiendo desarrollar elementos mucho más complejos.

En la actualidad el proceso CNC (Control Numérico Computarizado) hacen que las maquinas herramientas sean más fáciles de operar con la interfaz CAD/CAM. El proceso CNC con maquinado multiejes empleando fresa de punta esférica es utilizado para la obtención de formas complejas [4], [5], las cuales están generalmente conformadas por combinaciones de superficies de curvatura cero, positiva y negativa [6], y esto dependerá de la geometría del producto final.

Los productos mecanizados se evalúan mediante diversas características físicas, entre ellas el acabado superficial. La rugosidad es un índice ampliamente utilizado para determinar la calidad de la superficie, que generalmente se mide fuera de línea cuando el componente ya está mecanizado. Es utilizado como un requisito técnico en el diseño de productos mecánicos y de consumo [9].

Dentro del estudio de las rugosidades en superficies planas para un aluminio AA5083, mediante el método de Taguchi, se determinó que los parámetros como la velocidad de corte, velocidad de avance, tiene mayor incidencia en la rugosidad superficial, y la trayectoria de la herramienta y los parámetros del proceso de profundidad de corte en la rugosidad superficial de mecanizado tienen un bajo efectos de incidencia [7].

En los procesos de fresado con herramienta de punta esférica se determina que la trayectoria scallop en el avance actúa con mayor eficiencia para obtener niveles de rugosidades bajos [8].

Según estudios generados por Quintana, la influencia de las características geométricas del corte de la fresa esférica afecta en la rugosidad superficial teórica obtenida [10].

Los efectos que se producen por la velocidad de corte, la profundidad de corte, el avance, y diámetro de la herramienta utilizando el Método Taguchi da como resultado que todos los factores a excepción del diámetro de la herramienta influyen notablemente en el acabado superficial [11].

Esta investigación se enfoca y evalúa las variables: velocidad de corte (RPM), avance y estrategia, para determinar la incidencia que tienen en superficies cóncavas y convexas en aluminio EN-AW-7075, mediante el método de Taguchi. No obstante, existen otros factores que influyen en el acabado tales como: fluidos de corte, desgaste de la herramienta y tratamientos termo-químicos, los cuales no son parte de este estudio.

### Materiales y Métodos

#### Centro de mecanizado

La máquina que se utiliza para realizar las pruebas es el Centro de Mecanizado vertical controlado por Ordenador EMCO Concept Mill 260, como se aprecia en la Figura 1.



Figura 1. Centro de mecanizado. [13]

Las principales características del centro de mecanizado se aprecian en la **Tabla 1**.

#### Rugosímetro

Para la medición de la rugosidad se hicieron una serie de tomas en los laboratorios de metrología, con el rugosímetro marca MITUTOYO SJ-210 en las probetas, como se aprecia en la **Figura 2**.



Figura 2. Rugosímetro MITUTOYO SJ-210. [12]

#### Aluminio EN-AW-7075

El aluminio es el segundo elemento metálico más abundante en la tierra, convirtiéndose en un buen competidor económico desde el final del siglo XIX. El surgimiento de importantes desarrollos industriales, hizo que la demanda de este material sea beneficioso enormemente para crecimiento en la producción industrial [2].

#### Propiedades del Aluminio EN-AW-7075

El aluminio es un material no tóxico el cual es usado cotidianamente para envases de alimentos y bebida, su acabado superficial suele ser suave y brillante [2].

Tabla 1: Características del Centro de Mecanizado [14]

Ámbito de trabajo		
Recorrido longitudinal (X)	[mm]	350
Recorrido longitudinal (Y)	[mm]	250
Recorrido longitudinal (Z)	[mm]	300
Distancia del husillo-superficie de la mesa (min. Max)	[mm]	120-420

En la **Tabla 2** se puede observar las características mecánicas principales para el aluminio EN-AW-7075.

**Tabla 2:** Características del Aluminio EN-AW-7075 [2].

Características mecánicas		
Resistencia a la tensión	MPa	570
Límite de elasticidad	MPa	505
Dureza	HB (Brinell)	130-160
Resistencia a la fractura	MPa	330
Límite a la fatiga	MPa	160
Módulo de elasticidad	GPa	71,5

**Herramienta**

La herramienta que se usó para este proceso fueron fresas de punta esféricas de carburo diseñadas de esta manera para el trabajo en superficies cóncavas y convexas]

**Características de la herramienta**

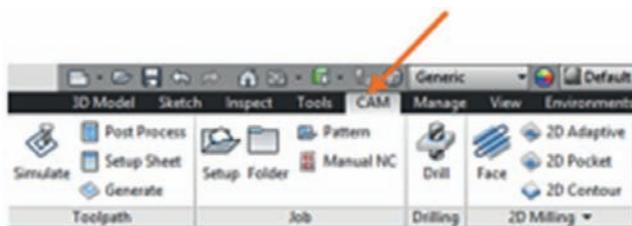
Para la ejecución del trabajo técnico se utiliza una herramienta para el desbaste de 8mm de diámetro y otra para el acabado de 5mm de diámetro y las especificaciones se pueden ver en la **Tabla 3**.

**Tabla 3:** Características de la herramienta [15].

Fresas de carburo 4 flancos Marca HTC TOOL		
	Acabado	Desbaste
OAL:	63 mm	50 mm
LOC:	19 mm	16 mm
DIA:	8 mm	5 mm

**Programación y Simulación en Autodesk Inventor HSM.**

Para la creación del dibujo se programa el mecanizado en la pestaña CAM en el mismo Inventor, como se aprecia en la **Figura 3**.

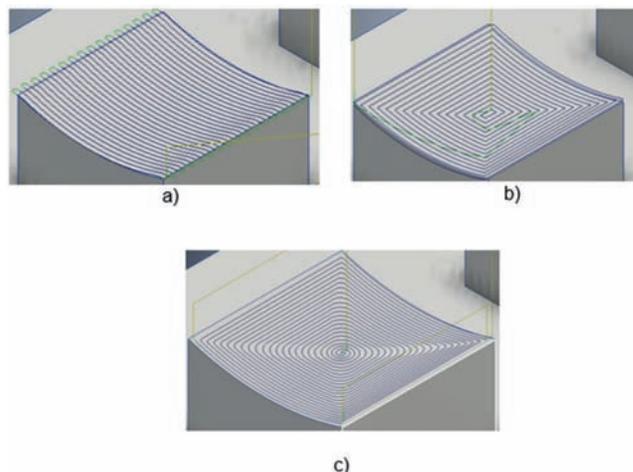


**Figura 3.** Panel de Inventor HSM

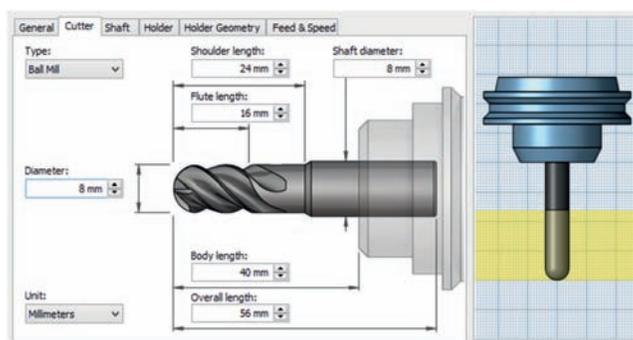
Las trayectorias utilizadas para el maquinado son: SCALLOP, PARALLEL Y MORPHED SPIRAL, que son las herramientas que se acoplan a la geometría del experimento y se encuentran disponibles en el software (**Figura 4**).

Se crea la herramienta:

- Fresa de punta esférica de ø8mm de carburo HKS, para el desbaste.
- Fresa de punta esférica de ø5mm de carburo HKS, para el acabado, como se aprecia en la **Figura 5**.

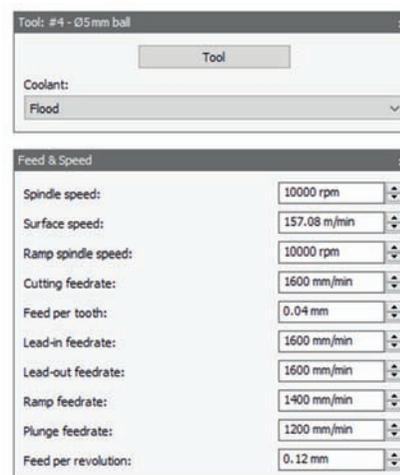


**Figura 4.** Estrategias a) Parallel, b) Scallop, c) Morphed Spiral



**Figura 5.** Entorno para crear la Herramienta.

Seleccionar la geometría a mecanizar modificando los parámetros según el arreglo que se tome por el método estadístico TAGUCHI, como se puede apreciar en la **Figura 6**.



**Figura 6.** Parámetros de mecanizado

Post-procesar al código G con la extensión Siemens-840d.cps – Siemens SINUMERIK 840D y determinar si existen errores, observar la codificación, como se aprecia en la **Figura 7**.

```

1 ; % N 10001 MPF
2 N10 ; T6 D=5 CR=2.5 - ZMIN=-4.498
3 N11 G90 G94
4 N12 G71
5 N13 G64
6 N14 G17
7 N15 G0 SUPA Z0 D0
8
9 N16 ; Morphed Spirall
10 N17 M9
11 N18 T6 D6
12 N19 M6
13 N20 S10000 M3
14 N21 G54
15 N22 G0 X-44.536 Y45.186
16 N23 G0 Z15
17 N24 M8
18 N25 G0 Z-2.496
19 N26 G1 Z-3.998 F2000
20 N27 G17
21 N28 G1 X-44.543 Y45.184 Z-4.084
22 N29 G1 X-44.564 Y45.175 Z-4.169
    
```

Figura 7. Inventor HSM, Código G

**Método TAGUCHI**

Esta metodología determina fácilmente los parámetros óptimos de un proceso.

El método es aplicado en tres partes principales como son el sistema, parámetro y tolerancia de diseño como se observa en la Figura 8.

En el diseño del sistema se determinan los factores que afectan la característica de calidad y niveles, que requiere conocimientos técnicos en ciencia e ingeniería. El diseño de parámetros es la parte más importante del método debido a que se determinan los niveles óptimos de los factores llevándose a cabo experimentos de confirmación. El diseño de tolerancia determina el rango de confirmación, se acepta el método si la media de las pruebas está en el intervalo, logrando una optimización con suficiente precisión [16].

$$DF = (n_1 - 1) \times n_f + (n_1 - 1) \times (n_1 - 1) \times n_i \tag{1}$$

Donde  $n_1$  es el número de niveles de cada factor igual a 3,  $n_f$  es el número de factores usados en el proyecto técnico igual a 4 y  $n_i$  es el número de interacciones igual a 3. Como se tiene un DF=20 se busca un arreglo ortogonal que cumpla con los factores y niveles adecuados para el experimento. Se usa un arreglo ortogonal L7 con DF=26, consta de 27 filas, 13

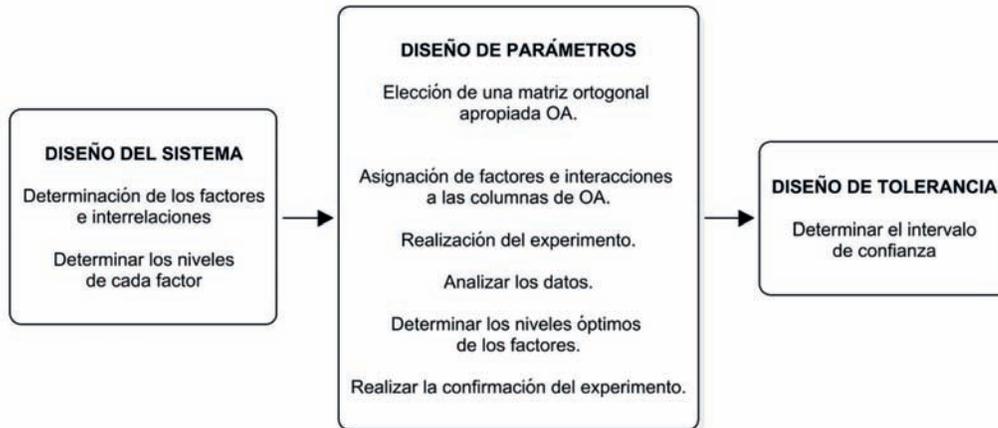


Figura 8. Etapas del método Taguchi. [16]

columnas y 3 interacciones, como se muestra en la Figura 9. La matriz estadística ejecuta 27 ensayos para cada una de las 3 estrategias mecanizado empleadas.

**Método ANOVA**

Anova es una técnica estadística estándar llamada análisis de varianza, utilizado para proveer una medida de confianza, ésta técnica analiza la variabilidad de datos obteniéndose una confianza que es medida a través de la varianza [17].

*Grados de Libertad*

$$DF_{Total} = \text{Número de Pruebas} - 1 \tag{2}$$

$$\text{Parafactores } DF = \text{Número de niveles} - 1 \tag{3}$$

$$\text{Para el error } DF_e = DF_{Total} - DF_{Factores} \tag{4}$$

Prueba N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	A	B	AXB	AXB	C	AXC	AXC	BXC	D	DXC	BXC	DXC	DXC
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3
4	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	3
5	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	1
6	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2
7	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	2
8	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3
9	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1
10	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
11	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1
12	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	2
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	3
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	1
16	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	1
17	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	2
18	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3
19	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2
20	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3
21	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1
22	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	1
23	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2
24	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	3
25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	3
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2

Figura 9. Arreglo Ortogonal

*Varianza*

$$V = \frac{\text{Suma de cuadrados}}{\text{Grados de libertad}} = \frac{S}{DF} \tag{5}$$

**Suma de los cuadrados totales**

$$ST = S - C.F \tag{6}$$

$$ST = \sum_{i=1}^n y_i^2 - \left(\frac{1}{n}\right) * \left[\sum_{i=1}^n y_i\right]^2 \tag{7}$$

**Razón de Varianza**

$$F = \frac{V}{e} \tag{8}$$

**Porcentaje de Influencia**

$$P = S * \frac{100}{ST} \tag{9}$$

**Predicción de rugosidad superficial óptima**

$$R_{opt} = A + B + C + D - 3 * R_{mean} \tag{10}$$

El último paso del método Taguchi es encontrar un intervalo de confianza para la media pronosticada mediante la Ecuación

$$CI = \sqrt{F(1, DFe) * Ve \left[ \frac{1}{N_{ef}} + \frac{1}{R} \right]} \tag{11}$$

**Obtención de datos**

Para determinar cada uno de los factores, se toma en cuenta los parámetros más incidentes en el estudio a realizarse. Los parámetros iniciales se establecen según la especificación técnica del material basada en el rango de trabajo (Tabla 4).

**Tabla 4:** Especificaciones de fresado [18]

Factores	Rango de mecanizado
Velocidad de Corte (m/min)	300 - 500
RPM (rev/min)	RPM = (Vc * 1000)/(pi()*D) = 9500 - 16000
Avance (mm/min)	Avance = fz * RPM * Z = 286 - 3183
Paso (mm)	0,03 - 0,1

En este estudio se ha tomado como factores significativamente incidentes en el mecanizado de superficies curvas la trayectoria de la herramienta, las revoluciones por minuto (RPM), avance y el paso, siendo variables que afectan directamente en el maquinado con una profundidad de corte de 0,2 mm constante. En la Tabla 5 se muestra los factores y niveles principales tomados en cuenta para el estudio.

**Tabla 5:** Factores y niveles seleccionados

Factores	Niveles		
	1	2	3
A Estrategia	Parallel	Scallop	Morphed Spiral
B RPM (rev/min)	10000	9000	8000
C Avance (mm/min)	2000	1800	1600
D Paso (mm)	0,03	0,07	0,1

Aplicando el método Taguchi que consiste en un arreglo ortogonal y tomando en cuenta los factores más influyentes se logra una combinación en la que se va a poder determinar los niveles y factores más relevantes que influyen para superficies cóncavas y convexas, como se muestra en la Tabla 6 los parámetros más incidentes en esta investigación.

**Tabla 6:** Factores influyentes en el mecanizado

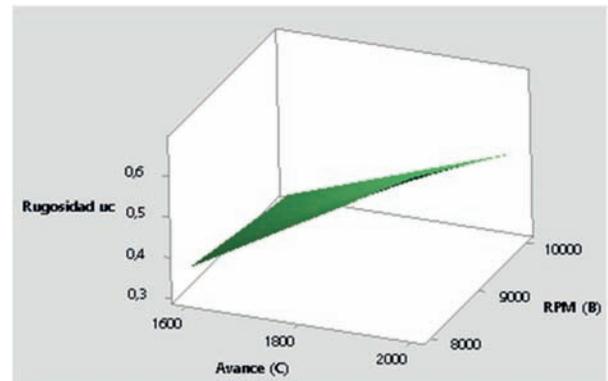
Factores	Cóncava	Convexa
Estrategia (A)	21,68%	-
RPM (rev/min) (B)	-	-
Avance (mm/min) (C)	34,52%	-
Paso (mm) (D)	-	33,902%

**Resultados y Discusión**

En la tabla 7 y en la tabla 8 se detalla la menor rugosidad obtenida en el mecanizado de superficies cóncavas y convexas respectivamente.

En base al método Taguchi, de los datos obtenidos en la Tabla 7 y Tabla 8 se establece coeficientes del algoritmo de predicción de rugosidad óptima de la Ecuación 10.

En la Figura 10 se verifica la gráfica 3D de rugosidad vs avance vs RPM, en una estrategia Morhped Spiral con su respetiva ecuación de regresión aritmética en superficies cóncavas.



**Figura 10.** Rugosidad vs Avance y RPM con estrategia Morhped Spiral en superficies cóncavas

La ecuación (12) permite establecer una rugosidad teórica con la estrategia óptima antes mencionada mediante la variación de parámetros.

$$R_z = -2,49 + 0,00194 * C + 0,000204 * B \tag{12}$$

En la Figura 11 se verifica la gráfica 3D de rugosidad vs avance y RPM, en una estrategia Scallop con su respetiva ecuación de regresión aritmética en superficies cóncavas. La ecuación (13) permite establecer una rugosidad teórica con la estrategia óptima antes mencionada mediante la variación de parámetros.

$$R_z = 1,073 - 6,47 * D - 0,000353 * C + 0,00403 * D * C \tag{13}$$

Tabla 7: Menor rugosidad en superficies cóncavas

N° Prueba	(A) Estrategia	(B) RPM (rev/min)	(C) Avance (mm/min)	(D) Paso (mm)	R1 (μm)	R2 (μm)	R3 (μm)	R promedio (μm)
21	Morphed Spiral	10000	1600	0,07	0,280	0,293	0,277	0,283

Tabla 8: Menor rugosidad en superficies convexas

N° Prueba	(A) Estrategia	(B) RPM (rev/min)	(C) Avance (mm/min)	(D) Paso (mm)	R1 (μm)	R2 (μm)	R3 (μm)	R promedio (μm)
2	Parallel	10000	1800	0,07	0,280	0,284	0,286	0,283

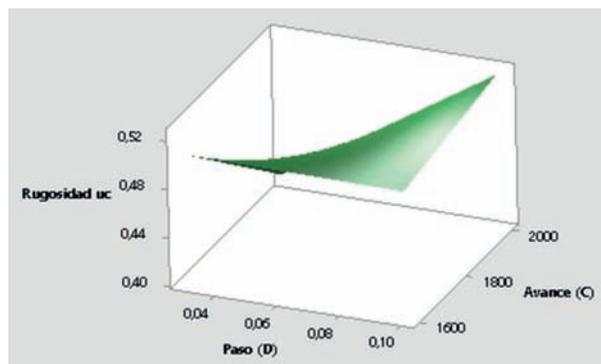


Figura 11. Rugosidad vs Avance y RPM con estrategia Scallop en superficies convexas

Mediante la Ecuación 12 se verificó el valor teórico de rugosidad óptimo en superficies cóncavas utilizando los valores de la Tabla 9 para compararlo con el valor experimental.

$$R_u = -2,49 + 0,00194 * C + 0,000204 * B$$

$$R_u = -2,49 + 0,00194 * 1600 + 0,000204 * 10000$$

$$R_u = 0,265 \mu m$$

La diferencia en el valor de rugosidad entre el teórico y el experimental es de 5,28%.

Mediante la Ecuación 13 se verifica el valor teórico de rugosidad óptima en superficies convexas utilizando los valores de la Tabla 10 para compararlo con el valor experimental.

$$R_u = 1,073 - 6,47 * D - 0,000353 * C + 0,00403 * D * C$$

$$R_u = 1,073 - 6,47 * 0,03 - 0,000353 * 1600 + 0,00403 * 1600 * 0,03$$

$$R_u = 0,507 \mu m$$

Tabla 9: Valor de rugosidad mejorada en superficies cóncavas

N° Prueba	(A) Estrategia	(B) RPM (rev/min)	(C) Avance (mm/min)	(D) Paso (mm)	R1 (μm)	R2 (μm)	R3 (μm)	R promedio (μm)
21	Morphed Spiral	10000	1600	0,03	0,270	0,282	0,278	0,276

Tabla 8: Menor rugosidad en superficies convexas

N° Prueba	(A) Estrategia	(B) RPM (rev/min)	(C) Avance (mm/min)	(D) Paso (mm)	R1 (μm)	R2 (μm)	R3 (μm)	R promedio (μm)
2	Scallop	8000	1600	0,03	0,279	0,280	0,281	0,280

La diferencia en el valor de rugosidad entre el teórico y el experimental es de 26,035%.

A continuación, se presentan imágenes microscópicas antes del mecanizado y después del mecanizado (Fig. 12, Fig. 13 y Fig. 14).



Figura 12. Estructura microscópica sin mecanizar Aluminio EN-AW7075

## Conclusiones

El Aluminio EN-AW-7075 es muy utilizado en la industria metalmecánica para la elaboración de matrices de moldes plásticos para procesos de extrusión soplado y estiro-soplado, por su resistencia a altas temperaturas, corrosión y buenas características al maquinarse, siendo utilizado a altas velocidades y avances de corte, con una profundidad radial menor a

0,1mm y profundidad axial menores a 0,07mm obteniéndose rugosidades bajas y mejores acabados superficiales.

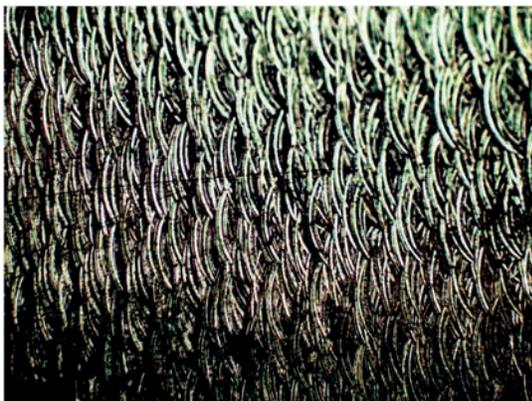


Figura 13. Estructura microscópica de la probeta cóncava Aluminio EN-AW7075



Figura 14. Estructura microscópica de la probeta convexa Aluminio EN-AW7075

Se determinó que para las superficies cóncavas la estrategia y los parámetros que mejoran la calidad superficial son: Trayectoria Morphed Spiral, 10000 RPM, Velocidad de corte de 2000 mm/min, paso de 0,03 mm y una profundidad de 0,2 mm obteniendo una rugosidad mejorada de  $0.276 \mu\text{m}$  favoreciendo en un 2,47% el acabado superficial.

Se determinó que para las superficies convexas la estrategia y los parámetros que mejoran la calidad superficial son: Trayectoria Scallop, 8000 RPM, Velocidad de corte de 1600 mm/min, paso de 0,03 mm y una profundidad de 0,2 mm obteniendo una rugosidad mejorada de  $0.280 \mu\text{m}$  favoreciendo en un 1,1% el acabado superficial.

La rugosidad teórica mejorada para superficies cóncavas usando la Ecuación 12 obedece a  $0,265 \mu\text{m}$ , comparadas con la experimental de  $0,251 \pm 0,22 \mu\text{m}$ , se tiene una variación de error de 5,28 % el cual se encuentra en los límites de confiabilidad asegurando la validez del estudio.

La rugosidad teórica mejorada para superficies convexas usando la Ecuación 13 obedece a  $0,507 \mu\text{m}$ , comparadas con la experimental de  $0,375 \pm 0,165 \mu\text{m}$ , se tiene una variación

de error de 26,035% el cual se encuentra en los límites de confiabilidad asegurando la validez del estudio.

## Referencias

- [1] M. I. P. C. N. G. K. Senthil, «Study of the constitutive behavior of 7075-T651 aluminum alloy,» International Journal of Impact Engineering, vol. II, n° 108, pp. 171-190, 2017.
- [2] R. Nunes, Metals Handbook VOL 2, *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*, EEUU: ASM International, 2004.
- [3] T. Aaron, «Machining,» ASM HANDBOOK, vol. 16, n° 9, pp. 1-12, 1989.
- [4] T. Moriwaki, «Multi-functional machine tool,» CIRP Ann. - Manuf. Technol, vol. 57, n° 2, pp. 736-749, 2008.
- [5] R. L. y. Y. Koren, «Efficient Tool-Path Planning for Machining Free-Form Surfaces,» Trans. ASME, vol. 118, 1996.
- [6] S. Radzevich, «Kinematic Geometry of Surface Machining,» Boca Raton: CRC Press. Taylor & Francis Group, p. 508, 2008.
- [7] A. Mura, «Optimization of Process Parameters with Minimum Surface Roughness in the Pocket Machining of AA5083 Aluminum Alloy via Taguchi Method,» Arab Journal of Science and Engineering, n° 38, pp. 705-7014, 2013.
- [8] Y.-K. H. M.-S. C. Jenq-Shyong Chen, «A study of the surface scallop generating mechanism in the ball-end milling process,» International Journal of Machine tools and Manufacture., n° 45, p. 1077-1084, 2005.
- [9] M. Groover, «Fundamentals of modern manufacturing: materials processes and systems,» Society of manufacturing engineers, vol. II, 2004.
- [10] J. C. J. R. G. Quintana, «Surface roughness generation and material removal rate in ball end milling operations,» Materials and Manufacturing Processes, vol. I, n° 25, pp. 386-398, 2010.
- [11] J. L. & C. J. C. Yang, «A systematic approach for identifying optimum surface roughness in finish milling operations,» Technol, vol. II, n° 15, pp. 76-84, 2001.
- [12] P. S. a. R. Pinner, «The Surface Treatment and Finishing of Aluminum and Its Alloys,» pp. 1-10, 2001.
- [13] «ALACERMAS,» 02 Junio 2013. [En línea]. Available: [http://www.alacermas.com/img/galeria/files/aluminio/chapa\\_7075\\_aluminio.pdf](http://www.alacermas.com/img/galeria/files/aluminio/chapa_7075_aluminio.pdf). [Último acceso: 30 Marzo 2017].
- [14] M. E. MAIER, «EMCO Concept Mill 260, Centro de Mecanizado vertical controlado por PC,» vol. II, n° 1, pp. 1-82, 2015.

- [15] H. T.-C. & MFG, «*HTC MASTER CATALOG*,» 18 Agosto 2014. [En línea]. Available: <http://www.htcmfg.com/htccatalog2015/13699EA4878413FE3900F694FCE4D50F/HTC%202014%20MASTER%20CATALOG.pdf>. [Último acceso: 26 Octubre 2017].
- [16] A. M. Pinar, «*Optimization of Process Parameters with Minimum Surface Roughness in the Pocket Machining of AA5083 Aluminum Alloy via Taguchi Method*,» Arab J Sci Eng, n° 38, p. 705–714, 2013.
- [17] R. K. Roy, *A PRIMER ON THE TAGUCHI METHOD*, EEUU, 2010.
- [18] PRODAX, *Hojas informativas de Seguridad del Material*, Segunda Edición, 2008.