

# Selección de Parámetros de Corte en el Fresado Trocoidal y Frontal en el Mecanizado de Cavidades Prismáticas de Prototipos mediante la Metodología de Taguchi

Ing. Jorge Saúl Gallegos Molina<sup>1</sup>, M.C. Ignacio Torres Contreras<sup>2</sup>

**Resumen**—En la mejora de los procesos de mecanizado, la metodología de Taguchi permite realizar diseños experimentales con un menor número de pruebas y proporciona resultados válidos para optimizar la productividad y calidad. En este estudio se utiliza esta metodología en la optimización de la razón de remoción de material y la rugosidad superficial para el mecanizado de cavidades prismáticas de prototipos de aluminio 7075-T6. La experimentación analiza el mecanizado de desbaste y acabado. El desbaste se realiza con fresado trocoidal y el acabado con fresado frontal. En desbaste se utiliza el método Relacional de Grey como apoyo al método de Taguchi. En el proceso de acabado se considera la influencia de factores de ruido en el resultado. Los resultados obtenidos muestran que los parámetros de corte optimizan la remoción de material y la rugosidad superficial en el proceso de desbaste y la rugosidad final en el proceso de acabado, lo que permitió una reducción del tiempo ciclo de desbaste de cavidades en un 40% aproximadamente, así como una mejora consistente de la rugosidad superficial final en sus paredes.

**Palabras clave**— Ingeniería y Tecnología, Tecnología Industrial, Especificaciones de Procesos, mecanizados.

## Introducción

En el sector de mecanizados, una necesidad vigente es reducir los tiempos de fabricación y maximizar la productividad, lo que ha favorecido el desarrollo de nuevos procesos y herramientas de corte para incrementar la razón de remoción de material (MRR), sin afectar la calidad superficial y dimensional del producto (Klocke, 2011). Una alternativa desarrollada, es el fresado trocoidal, donde a diferencia del fresado tradicional, aporta grandes beneficios, entre sus ventajas encontramos, tasas de remoción de metal y profundidades axiales de corte comparativamente altas, cargas térmicas y mecánicas menores, y una distribución significativamente más uniforme de la carga mecánica durante el empalme. Este método se aplica comúnmente para aceros al carbono, aceros inoxidable y aluminio, así como para aleaciones resistentes al calor a base de níquel o titanio (Hesterberg & Albert, 2017). El fresado trocoidal es aplicado principalmente en operaciones de desbaste. La trayectoria de la herramienta es una combinación de un movimiento circular con un movimiento lineal uniforme, lo que genera una trayectoria trocoide (Rauch & Hascoët, 2011), tal como se muestra en la Figura 1. El fresado trocoidal es factible, cuando el ancho mínimo de la cavidad ( $D_m$ ) es 15% mayor que el diámetro del cortador ( $D_c$ ), y el paso radial ( $S_p$ ) puede estar en el rango del 2% al 25% de dicho diámetro (Szalóki, Csuka, & Sipos, 2014). Para la calidad superficial y dimensional, el fresado frontal es utilizado para dar el acabado final en perfiles o cavidades de muchos productos (Stephenson & Agapiou, 2016). Un aspecto esencial para la aplicación efectiva de ambos tipos de fresado, es determinar los valores correctos de los parámetros de corte, donde en la mayoría de los casos, solo se cuenta con recomendaciones de los fabricantes de herramientas, que generalmente se refieren a una vida útil promedio de 15 minutos (Klocke, 2011). Una alternativa para determinar los mejores parámetros de corte, es el método de Taguchi, el cual permite diseñar productos y procesos robustos con una mínima sensibilidad a la variación de factores no controlables y de ruido (Roy, 2010).



Figura 1. Parámetros de corte del Fresado Trocoidal y Frontal

<sup>1</sup> El Ing. Jorge Saúl Gallegos Molina es alumno del posgrado de Maestría en Manufactura Avanzada CIATEQ A.C. (Autor correspondiente) y es profesor de Ingeniería Mecánica en la Universidad Autónoma del Estado de México. [jsgallegosm@uaemex.mx](mailto:jsgallegosm@uaemex.mx)

<sup>2</sup> El M.C. Ignacio Torres Contreras es especialista en diseño y mantenimiento de cajas de engranes, análisis dinámicos, vibraciones y diseño de sistemas mecánicos en el Centro de Tecnología Avanzada de Querétaro, CIATEQ, México [igtoc@ciateq.mx](mailto:igtoc@ciateq.mx)

## Descripción del Método

### Definición del Problema y Objetivo del Estudio

Como solución al problema de altos tiempos de ciclo en el fresado de cavidades de prototipos en aluminio 7075-T6, así como de una alta rugosidad final en las paredes de las cavidades, se propuso la implementación del fresado trocoidal en el desbaste y mejorar el fresado frontal en el proceso de acabado. El objetivo principal del estudio consistió en: “establecer los parámetros de corte óptimos para el fresado trocoidal y frontal, aplicando el diseño de experimentos mediante el método de Taguchi, para optimizar la razón de remoción de material y rugosidad superficial preliminar en el desbaste y el acabado superficial final en el mecanizado de cavidades prismáticas de prototipos en aluminio 7075-T6.

### Desarrollo experimental

En la experimentación se utilizó la máquina de control numérico MVC-640 Guss & Roch, y para el mecanizado de las cavidades se prepararon blocs de aluminio 7075-T6 de dimensiones de 100 x 100 x 34 mm. Se utilizaron cortadores de fresado de carburo de tungsteno con recubrimiento. En desbaste se utilizó un cortador de fresado de Ø12 mm, Iscar, EC-E4L 12-26/38C12CF83, AlTiN, grado IC900, y en acabado un cortador de Ø10 mm, Iscar, EC100B22-4W10, AlTiN, grado IC900. Mediante el software Mastercam se desarrollaron los programas de control numérico (CNC) para el desbaste y acabado de las cavidades en los blocs de aluminio. Los programas fueron elaborados conforme a los tratamientos y valores de los factores de control, considerados para la experimentación en el fresado trocoidal y el fresado frontal. La Figura 2 muestra parte de los materiales y equipos utilizados para el desarrollo del experimento, así como las cavidades mecanizadas. También se indica el perfilómetro SJ-210 SURFTEST, Mitutoyo, utilizado para la medición de la rugosidad superficial. Para una evaluación más sensible a la variación de la rugosidad superficial, se decidió utilizar el parámetro Rz en desbaste y Ra en acabado (ASME, 2010).



Figura 2. Experimento de optimización para el fresado de cavidades

### Método de Taguchi y Análisis Relacional de Grey (GRA)

Con el método de Taguchi se definió el diseño experimental. Los resultados obtenidos en el proceso de desbaste (MRR y Rz) y de acabado (Ra), se transformaron en razones de señal-ruido (S/N). Esta razón de señal-ruido (S/N) es un indicador de gran utilidad para evaluar el efecto de los parámetros del proceso en las salidas o características de calidad de interés para el estudio (Kanchana, Prasath, Krishnaraj, & Geetha, 2019). Esta transformación de la respuesta depende del tipo de característica de calidad que se busca optimizar (Gutiérrez & De la Vara, 2012). La Tabla 1 expone en forma resumida los pasos del método de Taguchi, así como las 2 características de calidad de interés utilizadas en el presente estudio. Debido a que el método de Taguchi sólo permite la optimización de una respuesta de un producto o proceso a la vez; para la optimización simultánea de varias respuestas de naturaleza diferente, se suele utilizar el método de Taguchi con el Análisis Relacional de Grey (Noorul Haq, Marimuthu, & Jeyapaul, 2008). La Tabla 2 presenta un resumen breve de los pasos del método del Análisis Relacional de Grey (GRA), así como las ecuaciones de interés utilizadas para el análisis y solución del problema presentado. Como parte de la experimentación, para el análisis de los resultados obtenidos, se estableció un rango de valores o intervalo de confianza (IC) para la respuesta media obtenida. La Tabla 3 muestra las ecuaciones utilizadas en el presente estudio para calcular el IC del experimento de confirmación para los procesos de desbaste y de acabado.

La Tabla 4 enlista los factores de control y de ruido seleccionados para el experimento, así como su valor mínimo (nivel 1) y máximo (nivel 2). Los parámetros de corte y otros factores no considerados, se mantuvieron en un valor fijo durante el desarrollo del experimento y se consideró que no aportaban variabilidad a las respuestas de interés en el estudio: MRR, rugosidad superficial de desbaste y rugosidad superficial final.

Tabla 1. Resumen del método y características de calidad de Taguchi (Krishnaiah & Shahabudeen, 2012)

| Método de Taguchi  | Característica de Calidad   |
|--|---|
| 1. Definir el problema y determinar el objetivo                              | Valor “más pequeño es mejor”:<br>$\eta = -10 \log \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i^2 \right] \quad (1)$          |
| 2. Determinar la respuesta y su medición                                     |   |
| 3. Identificar y clasificar los factores que afectan la respuesta            | Valor “más grande es mejor”:<br>$\eta = -10 \log \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{Y_i^2} \right] \quad (2)$ |
| 4. Determinar el número de niveles y valores de cada factor                  |   |
| 5. Identificar los factores de control con interacciones                     |   |
| 6. Seleccionar el arreglo ortogonal y asignar factores e interacciones.      |   |
| 7. Desarrollo del experimento  |   |
| 8. Analizar e interpretar los resultados                                     |   |
| 9. Seleccionar los niveles óptimos de los factores significantes             |   |
| 10. Predecir los resultados esperados y realizar experimento de confirmación |   |

Tabla 2. Resumen del método de Análisis Relacional de Grey (Krishnaiah & Shahabudeen, 2012)

| GRA  | Características de Calidad, Coeficiente y Grado Grey   |
|--|--|
| 1. Transformar respuestas en relaciones $Y_{ij}$ de señal-ruido S/N, conforme a características de calidad de Taguchi, (ecuaciones 1 y 2)  | Normalización para S/N, donde “más grande es mejor”:<br>$Z_{ij} = \frac{Y_{ij} - \min(Y_{ij}, i = 1, 2, \dots, n)}{\max(Y_{ij}, i = 1, 2, \dots, n) - \min(Y_{ij}, i = 1, 2, \dots, n)} \quad (3)$   |
| 2. Normalizar las relaciones de señal-ruido S/N ( $Y_{ij}$ ), en valores de $Z_{ij}$ , ( $0 \leq Z_{ij} \leq 1$ ) (ecuaciones 3 y 4)   | Normalización para s/n, donde “más pequeño es mejor”:<br>$Z_{ij} = \frac{\max(Y_{ij}, i = 1, 2, \dots, n) - Y_{ij}}{\max(Y_{ij}, i = 1, 2, \dots, n) - \min(Y_{ij}, i = 1, 2, \dots, n)} \quad (4)$  |
| 3. Calcular el coeficiente relacional “Grey” (GC) para los valores $Z_{ij}$ normalizados (ecuación 6). Donde $\Delta$ es la diferencia entre el valor óptimo de desempeño ( $Z_{oj}=1$ ) y el valor $i$ -ésimo normalizado ( $Z_{ij}$ ). Donde $\lambda$ es el coeficiente distintivo ( $0 \leq \lambda \leq 1$ ). | Coeficiente de relación "Grey":<br>$\Delta_{ij} = Z_{oj} - Z_{ij} \quad (5)$<br>$GC_{ij} = \frac{\Delta_{\min} + \lambda \Delta_{\max}}{\Delta_{ij} + \lambda \Delta_{\max}} \quad \begin{cases} i = 1, 2, \dots, n \text{ (Experimentos)} \\ j = 1, 2, \dots, m \text{ (Respuestas)} \end{cases} \quad (6)$ |
| 4. Calcular el grado de relación Grey ( $G_i$ ) para cada $i$ -ésimo tratamiento, $j$ -ésima respuesta y $m$ -respuestas dependientes (ecuación 7)   | Grado relación “Grey”:<br>$G_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m GC_{ij} \quad (7)$   |
| 5. Determinar el nivel óptimo de cada factor en base a su efecto máximo en la respuesta  | Respuesta predicha optimizada:<br>$\hat{\tau} = \tau_{media} + \sum_{k=1}^q (\bar{\tau}_k - \tau_{media}) \quad (8)$   |
| 6. Realizar el análisis de varianza (ANOVA) para identificar los factores significativos   |  |
| 7. Predecir la respuesta para los niveles óptimos de los factores (ecuación 8)   |  |
| 8. Validar con una prueba de confirmación.   |  |

Tabla 3. Intervalo de confianza (IC) para el experimento (Krishnaiah & Shahabudeen, 2012)

| IC   | Variables  |
|--|--|
| $IC = \sqrt{F_{\alpha, v_1, v_2} \times MC_E \times \left( \frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{r} \right)} \quad (9)$<br>$n_{eff} = \frac{N}{1 + T_{dof}} \quad (10)$ | $F_{\alpha, v_1, v_2}$ = Valor F con significancia $\alpha$ y grados de libertad $v_1, v_2$ .<br>$MC_E$ = Cuadrado medio/varianza del error<br>$r$ = Tamaño de muestra para el experimento de confirmación<br>$n_{eff}$ = Número efectivo de observaciones<br>$N$ = Número total de experimentos<br>$T_{dof}$ = Suma de grados de libertad de factores en respuesta predicha |

Tabla 4. Factores de control y de ruido para el desarrollo experimental

| Proceso  | Tipo de Factor      | Descripción             | Unidades      | Mínimo | Máximo | Nivel 1 | Nivel 2 |
|----------|---------------------|-------------------------|---------------|--------|--------|---------|---------|
| Desbaste | Factores de Control | Velocidad angular (N)   | rpm           | 3000   | 4000   | 1       | 2       |
|          |                     | Avance lineal (Vf)      | mm/min        | 650    | 950    | 1       | 2       |
|          |                     | Paso trocoidal (Sp)     | mm            | 1.2    | 2.4    | 1       | 2       |
|          |                     | Radio mínimo (R)        | mm            | 1.2    | 2.4    | 1       | 2       |
| Acabado  | Factores de Control | Velocidad angular (N)   | rpm           | 2500   | 4000   | 1       | 2       |
|          |                     | Avance lineal (Vf)      | mm/min        | 550    | 950    | 1       | 2       |
|          |                     | Corte radial (AE)       | mm            | 0.5    | 1      | 1       | 2       |
|          | Factores de Ruido   | Presión de aire (P)     | Bar           | Bajo   | Alto   | 1       | 2       |
|          |                     | Rugosidad desbaste (RD) | $\mu\text{m}$ | Bajo   | Alto   | 1       | 2       |

### Resultados

#### Optimización del Proceso de Desbaste

La Tabla 4 indica para el desbaste, un total de 4 factores de control con 2 niveles de prueba cada uno, por lo que se seleccionó un arreglo ortogonal  $L_8(2^4)$ , con 8 tratamientos (T). Se realizaron 2 repeticiones para cada uno, por lo que se mecanizaron un total de 16 cavidades con dimensiones de ancho-profundidad-largo de 20 x 20 x 92.0 mm.

La **Error! Reference source not found.** expone los resultados obtenidos para el MRR y rugosidad superficial en Rz. Estas respuestas son convertidas a relaciones de señal-ruido (S/N) conforme a los criterios de calidad de Taguchi, para el MRR se seleccionó mientras “más grande es mejor” y para la rugosidad superficial mientras “más pequeño es mejor” (ecuaciones 1 y 2). Para optimizar simultáneamente estas dos respuestas, se utilizó la metodología de GRA mostrada en la Tabla 2, donde en la **Error! Reference source not found.** se transformaron las relaciones de señal-ruido (S/N) para calcular el grado relacional de Grey (Gi) para cada uno de los tratamientos (ecuaciones 3 a 7), siendo el tratamiento 4 el del mayor valor Gi, por lo que se consideró como un tratamiento óptimo preliminar. La Figura 3 muestra el efecto del nivel de cada factor en la media de medias de la respuesta Gi. Los niveles de los factores que optimizan la respuesta, son los que están hacia arriba de la media de medias (Gi=0.6739). La Tabla 6 presenta el ANOVA del modelo experimental, con un valor  $\alpha = 0.05$ . Los resultados muestran que el paso trocoidal (Sp) y el avance lineal (Vf) tienen un Valor-p < 0.05, por lo que son factores significativos. En contraste, los factores de velocidad angular (N) y radio mínimo de la trocoides (R) no son factores significativos y puede seleccionarse su nivel con otros criterios. Del análisis gráfico y estadístico de la Figura 3 y Tabla 6, el mejor tratamiento de la región bajo experimentación, que optimiza las respuestas MRR y rugosidad superficial en el fresado trocoidal del proceso de desbaste, es: N1-Vf2-Sp2-R2. El valor optimizado Gi predicho con este tratamiento es de  $\hat{\tau} = 0.981$  (ecuación 8) y para una prueba de confirmación de 4 cavidades, el IC es  $0.829 < G_{exp} < 1.133$  (ecuación 9 y 10) donde  $G_{exp}$ , es el Gi promedio del experimento de confirmación.

Tabla 5. Resultados de la experimentación en el desbaste

| T | Factores |    |    |   | MRR [mm <sup>3</sup> /min] | Rz [μm] | Razón S/N [dB] |         | Zij   |       | Desviación |       | GC    |       | Grado Grey |      |
|---|----------|----|----|---|----------------------------|---------|----------------|---------|-------|-------|------------|-------|-------|-------|------------|------|
|   | N        | Vf | Sp | R |                            |         | MRR            | Rz      | MRR   | Rz    | ΔMRR       | ΔRz   | MRR   | Rz    | Gi         | Rank |
| 1 | 1        | 1  | 1  | 1 | 2474.561                   | 2.717   | 67.870         | -8.680  | 0.000 | 0.559 | 1.000      | 0.441 | 0.333 | 0.531 | 0.432      | 7    |
| 2 | 1        | 1  | 2  | 2 | 5733.550                   | 3.758   | 75.168         | -11.498 | 0.847 | 1.000 | 0.153      | 0.000 | 0.765 | 1.000 | 0.883      | 3    |
| 3 | 1        | 2  | 1  | 2 | 4761.782                   | 2.298   | 73.555         | -7.225  | 0.659 | 0.332 | 0.341      | 0.668 | 0.595 | 0.428 | 0.511      | 6    |
| 4 | 1        | 2  | 2  | 1 | 6557.964                   | 3.697   | 76.335         | -11.357 | 0.982 | 0.978 | 0.018      | 0.022 | 0.965 | 0.958 | 0.961      | 1    |
| 5 | 2        | 1  | 1  | 2 | 2940.069                   | 1.800   | 69.367         | -5.105  | 0.174 | 0.000 | 0.826      | 1.000 | 0.377 | 0.333 | 0.355      | 8    |
| 6 | 2        | 1  | 2  | 1 | 6270.257                   | 2.983   | 75.946         | -9.493  | 0.937 | 0.686 | 0.063      | 0.314 | 0.888 | 0.615 | 0.751      | 4    |
| 7 | 2        | 2  | 1  | 1 | 4548.252                   | 2.678   | 73.157         | -8.555  | 0.613 | 0.540 | 0.387      | 0.460 | 0.564 | 0.521 | 0.542      | 5    |
| 8 | 2        | 2  | 2  | 2 | 6676.570                   | 3.622   | 76.491         | -11.180 | 1.000 | 0.950 | 0.000      | 0.050 | 1.000 | 0.909 | 0.955      | 2    |

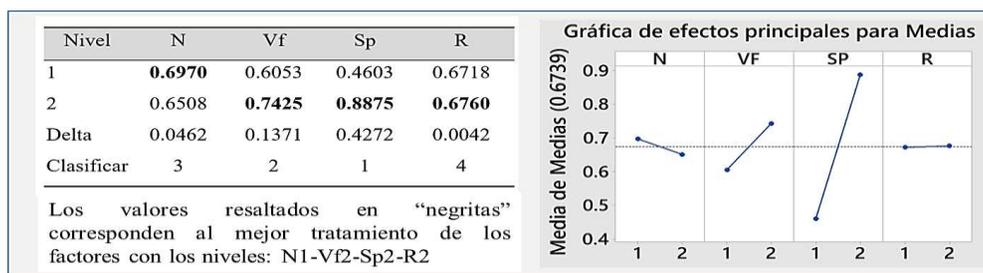


Figura 3. Efectos principales en la medida de medias (Gi=0.6739)

Tabla 6. ANOVA para el modelo experimental con respuestas Gi

| Fuente         | GL | SC Sec.  | SC Ajust. | MC Ajust. | F      | P     | % Cont. |
|----------------|----|----------|-----------|-----------|--------|-------|---------|
| N              | 1  | 0.004261 | 0.004261  | 0.004261  | 1.62   | 0.292 | 1.03    |
| VF             | 1  | 0.037612 | 0.037612  | 0.037612  | 14.34  | 0.032 | 9.07    |
| SP             | 1  | 0.364935 | 0.364935  | 0.364935  | 139.18 | 0.001 | 88.00   |
| R              | 1  | 0.000035 | 0.000035  | 0.000035  | 0.01   | 0.916 | 0.01    |
| Error residual | 3  | 0.007866 | 0.007866  | 0.002622  |        |       | 1.90    |
| Total          | 7  | 0.414708 |           |           |        |       | 100.00  |

*Optimización del Proceso de Acabado*

La Tabla 4 señala para el acabado, un total de 3 factores de control y 2 factores de ruido con 2 niveles de prueba cada uno. Para el desarrollo de la experimentación se seleccionó un arreglo interno  $L_8(2^3)$  para los factores de control, con un arreglo externo  $L_4(2^2)$  para los factores de ruido. Se mecanizaron un total de 32 cavidades con dimensiones de ancho-profundidad-largo de 21 x 20 x 96.8 mm. La Tabla 7 expone el diseño experimental y los resultados obtenidos para la rugosidad superficial en Ra. Estos resultados se transformaron con el criterio de calidad de mientras “más pequeño es mejor” (ecuación 1) en las razones de señal-ruido (S/N) para cada tratamiento. La Figura 4 muestra que los niveles de los factores que optimizan la respuesta, son los que están hacia arriba de la media de medias (9.895 dB) de las relaciones de señal/ruido (S/N). La Tabla 8 presenta el ANOVA realizado al modelo experimental y se observa que los factores de velocidad angular (N) y avance lineal (Vf), presentan un Valor-p < 0.05, es decir sus efectos SI son significativos para la relación de señal/ruido (S/N). En comparación el efecto de profundidad de corte (AE), presenta un Valor-p > 0.05, por lo que NO es un factor significativo y puede seleccionarse su nivel en base a otros criterios (costos, geometrías, etc.). Del análisis gráfico y estadístico de la Figura 4 y Tabla 7, el mejor tratamiento de la región bajo experimentación, que optimiza la rugosidad superficial final en las paredes de las cavidades prismáticas es: N2-VF1-AE2. El valor optimizado de rugosidad superficial en Ra, predicho con este tratamiento es de  $\hat{\tau} = 0.118 \mu\text{m}$  (ecuación 8) y para una prueba de confirmación de 12 cavidades, el IC es  $0.012 < Ra_{exp} < 0.223$  (ecuación 9 y 10) donde  $Ra_{exp}$ , es la rugosidad superficial media del experimento de confirmación

Tabla 7. Resultados de la experimentación en el acabado

| Factor Ruido | Prueba No. |   |   |   |
|--------------|------------|---|---|---|
|              | 1          | 2 | 3 | 4 |
| P            | 1          | 2 | 1 | 2 |
| RD           | 1          | 1 | 2 | 2 |

| Prueba No. | Factor Control |    |    | Rugosidad Ra [ $\mu\text{m}$ ] |       |       |       |            | Señal/ruido [dB] |
|------------|----------------|----|----|--------------------------------|-------|-------|-------|------------|------------------|
|            | N              | Vf | AE | Ra1                            | Ra2   | Ra3   | Ra4   | $\bar{Ra}$ | $\eta = S/R$     |
| 1          | 1              | 1  | 1  | 0.433                          | 0.320 | 0.477 | 0.342 | 0.393      | 7.997            |
| 2          | 1              | 1  | 2  | 0.301                          | 0.179 | 0.287 | 0.234 | 0.250      | 11.875           |
| 3          | 1              | 2  | 1  | 0.726                          | 0.602 | 0.434 | 0.435 | 0.549      | 4.993            |
| 4          | 1              | 2  | 2  | 0.612                          | 0.586 | 0.935 | 0.615 | 0.687      | 3.075            |
| 5          | 2              | 1  | 1  | 0.129                          | 0.150 | 0.158 | 0.128 | 0.141      | 16.963           |
| 6          | 2              | 1  | 2  | 0.172                          | 0.159 | 0.173 | 0.139 | 0.161      | 15.845           |
| 7          | 2              | 2  | 1  | 0.330                          | 0.425 | 0.372 | 0.384 | 0.378      | 8.421            |
| 8          | 2              | 2  | 2  | 0.394                          | 0.274 | 0.367 | 0.190 | 0.306      | 9.988            |
| Total =    |                |    |    |                                |       |       |       | 0.358      | 9.895            |

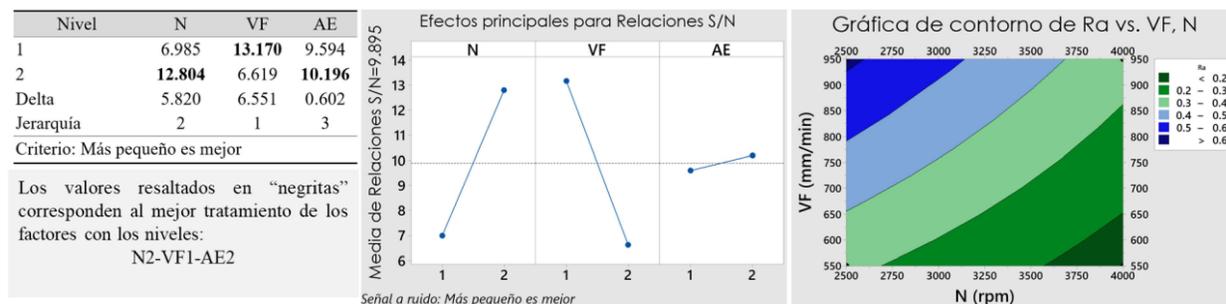


Figura 4. Efectos en la media de medias de relaciones S/N en el acabado

Tabla 8. ANOVA para el modelo experimental con relaciones de señal/ruido

| Fuente         | GL | SC Sec. | SC Ajust. | MC Ajust. | F     | P     | % Cont. |
|----------------|----|---------|-----------|-----------|-------|-------|---------|
| N              | 1  | 67.735  | 67.7353   | 67.7353   | 23.92 | 0.008 | 40.90   |
| VF             | 1  | 85.829  | 85.8287   | 85.8287   | 30.31 | 0.005 | 51.82   |
| AE             | 1  | 0.726   | 0.7256    | 0.7256    | 0.26  | 0.639 | 0.44    |
| Error residual | 4  | 11.325  | 11.3253   | 2.8313    |       |       | 6.84    |
| Total          | 7  | 165.615 |           |           |       |       | 100.00  |

### Conclusiones

Los resultados de la experimentación permitieron la optimización de las respuestas o salidas de interés. En el desbaste, el mejor tratamiento o valores definidos para los parámetros de corte del fresado trocoidal, permitió el incremento del MRR, sin generar una rugosidad superficial de desbaste mayor a un  $R_z = 4.5 \mu\text{m}$ , que representa un riesgo potencial de daño permanente en las superficies o paredes de las cavidades mecanizadas. La implementación del fresado trocoidal, como una estrategia de mecanizado, permitió reducir en un 40% aproximadamente el tiempo de fabricación de cavidades, respecto al tiempo obtenido con el uso de técnicas de fresado tradicionales. En el estudio, se definieron los parámetros de corte para optimizar simultáneamente el MRR y la rugosidad superficial de desbaste. Conforme a los resultados de la experimentación, se encontró que el paso de la trayectoria trocoide (SP) y el avance de la herramienta (Vf), son los factores principales que tienen un efecto significativo en el tiempo de mecanizado y en la rugosidad superficial en el desbaste de cavidades. La prueba de confirmación realizada con el mejor tratamiento definido (N1-VF2-SP2-R2) en 4 cavidades, dio una reducción del tiempo ciclo de desbaste del 44% respecto al tiempo ciclo original.

En el mecanizado de acabado de las cavidades, el mejor tratamiento o valores para los parámetros de corte del fresado frontal, permitió obtener en las paredes de las cavidades una rugosidad superficial final menor a un  $R_a = 3.2 \mu\text{m}$ , que es un valor especificado generalmente en los dibujos de detalle de los prototipos en aluminio 7075-T6. La prueba de confirmación realizada con el mejor tratamiento definido (N2-VF1-AE2) en 12 cavidades mecanizadas, dio una rugosidad superficial media  $R_{aexp} = 0.142 \mu\text{m}$ , que está dentro del intervalo de confianza calculado previamente. Con la metodología de Taguchi, se incluyó la variabilidad de los factores controlables para el fresado frontal, así como de los factores de ruido al estudio. Los resultados obtenidos muestran que los factores de la velocidad angular (N) y el avance lineal (Vf) tienen mayor efecto en la rugosidad superficial final, mientras que la profundidad de corte radial (AE) en el rango de 0.5 a 1.0 mm, no tiene un efecto significativo en la respuesta.

### Recomendaciones

Los resultados obtenidos para la optimización del fresado de desbaste y de acabado en las cavidades, sólo son válidos para el mismo tipo de herramienta de corte, material de la pieza de trabajo y región de experimentación definida por cada uno de los factores de control analizados. Por lo que se recomienda continuar el estudio hacia otras regiones de experimentación, es decir, con otros valores posibles para los parámetros de corte del fresado trocoidal en desbaste y el fresado frontal en acabado, así como probar otros tipos o geometrías de herramientas.

### Referencias

- ASME. (2010). *American Society of Mechanical Engineers (ASME) B46.1-2009: Surface Texture (Surface Roughness, Waviness, and Lay)*. New York: ASME.
- Gutiérrez, P. H., & De la Vara, S. R. (2012). *Análisis y Diseño de Experimentos* (3era ed.). México: Mc Graw Hill.
- Hesterberg, S., & Albert, B. (2017). Performance and limits of high-dynamic milling processes based on trochoidal tool paths. *ACADEMIC JOURNAL OF MANUFACTURING ENGINEERING, VOL.15, ISSUE 4/2017*, 107-111.
- Kanchana, J., Prasath, V., Krishnaraj, V., & Geetha, P. B. (2019). Multi Response Optimization of Process Parameters Using Grey Relation Analysis for Milling of Hardened Custom 465 Steel. *Procedia Manufacturing*, 451-458.
- Klocke, F. (2011). *Manufacturing Processes I* (Vol. 1). Germany: Springer.
- Krishnaiah, K., & Shahabudeen, P. (2012). *Applied Design of Experiments and Taguchi Methods*. New Delhi: PHI Learning Private Limited.
- Noorul Haq, A., Marimuthu, P., & Jeyapaul, R. (2008). Multi response optimization of machining parameters of drilling Al/SiC metal matrix composite using grey relational analysis in the Taguchi method. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 250-255.
- Rauch, M., & Hascoët, J. Y. (2011). Chapter 4. Milling Tool-Paths Generation in Adequacy with Machining Equipment Capabilities and Behavior. In J. P. Davim, *Machining of Complex Sculptured Surfaces* (pp. 127-155). Aveiro Portugal: Springer.
- Roy, R. K. (2010). *Taguchi Method*. Dearborn Michigan: SME Society of Manufacturing Engineers.
- Stephenson, D. A., & Agapiou, J. S. (2016). *Metal Cutting Theory and Practice* (Third Edition ed.). United States of America: CRC Press.
- Szalóki, I., Csuka, S., & Sipos, S. (15 de Noviembre de 2014). New Test Results in Cycloid-Forming Trochoidal Milling. *Acta Polytechnica Hungarica*, 215-228. Recuperado el 12 de Octubre de 2017, de [http://www.forgacsolaskutatas.hu/innovacio/can\\_trochoidal\\_milling\\_be\\_ideal/](http://www.forgacsolaskutatas.hu/innovacio/can_trochoidal_milling_be_ideal/)