

Selección óptima de parámetros del proceso de shot peening mediante Taguchi y lógica difusa

S. S. Roblero^{1,2}, J. Solís¹, H. R. Orozco², V. A. Castellanos¹

¹Tecnológico Nacional de México/ IT de Tlalnepantla, División de Estudios de Posgrado, Av. Constituyentes de 1917, S/N, Col. La Comunidad, Tlalnepantla Edo. De Méx. CP 54070. México. Apdo. Post. 750.

²Centro Universitario UAEM Valle de México, Boulevard Universitario S/N, Predio San Javier, Atizapán de Zaragoza, Estado de México, CP 54500. México.

Área de participación: Ingeniería Mecánica y Mecatrónica

Resumen

En este estudio, se aplica la metodología híbrida de Taguchi-lógica difusa para encontrar los parámetros óptimos que maximice el índice multi-respuesta (IR) para el proceso de shot peening (granallado). Se considera en el índice de respuesta las características de calidad entre más-grande-mejor para esfuerzos residuales y endurecimiento por deformación, así como también la característica de calidad entre-menos-mejor para la rugosidad superficial. Las relaciones signo-a-ruido (S/N) de las tres características de calidad se calculan en función de los productos que se recopilaron experimentalmente. Las relaciones S/N se utilizaron como variables de entrada de la unidad de control difusa, y el IR como variable de salida única. El IR resultante se utiliza para analizar los parámetros de procesamiento óptimos. Se realizó una prueba de confirmación para validar los resultados en términos de resistencia a la fatiga.

Palabras clave: Shot peening, lógica difusa, Taguchi, aluminio 2024-T351.

Abstract

By using fuzzy-based Taguchi method, this study investigates the optimal process parameters that maximise multiple performance characteristics index (IR) for the shot peening process. The larger-the-better quality characteristics of residual stresses and surface hardening as well as the smaller-the-better quality characteristic of surface roughness is considered in the IR. The signal-to-noise ratios of the three -quality characteristics are calculated for the products based on experimental results. The S/N ratio is utilised as the input variable to fuzzy control unit, and the IR is a single output variable. The determined IR is used to analyse the optimal process parameters. A confirmatory test to validate the results in terms of fatigue was carried out.

Key words: Shot peening, fuzzy logic, Taguchi, 2024-T351 aluminium alloy.

Introducción

Debido a que las máquinas, vehículos y estructuras no están exentos de sufrir esfuerzo dinámico o alternativo, la falla del material por fractura, y particularmente por fatiga, se considera como la mayor causa de funcionalidad en componentes mecánicos dentro de dos sectores económicamente importantes: la industria automotriz y la aeronáutica [Nam, Y.-S., Jeon, U., Yoon, H.-K., y col., 2016]. En un sentido general, es posible otorgar protección superficial a una amplia variedad de componentes ingenieriles contra daño mecánico y corrosión por medio de procesos tales como el spray térmico, infiltración, deposición física de vapores, deposición química de vapores, metalurgia de polvos/síntesis, tratamiento térmico, tratamiento térmico por láser, shot peening (SP), o láser peening. Todos estos métodos involucran la alteración de la superficie ya sea depositando una capa homogénea de un material diferente sobre el sustrato/material base o alterando los esfuerzos residuales en la región cercana a la superficie del material. Así, la resistencia a la fatiga de un material metálico es dominada por la resistencia al crecimiento de grieta, que bien pueden ser los límites de grado o fase, y en general, todos los tipos de barreras al deslizamiento plástico que se presenta dentro del material. Para condicionar la superficie a fin de que resista la propagación de grieta, se utiliza el proceso de SP, que se define como el bombardeo de la superficie con bolillas

duras (shots) sobre la superficie a tratar, lo que introduce muchas y variadas formas de barreras, debido a la distorsión de la superficie y sub-superficie [González, J., Peral, L.-B., Colombo, C., y col., 2018].

Debido a lo anterior, la magnitud y la profundidad en los efectos del bombardeo de bolillas que se extienden por debajo de la superficie del componente metálico, están influenciados por una compleja interacción de parámetros caracterizados ambos por el proceso de SP y las condiciones del material (Figura 1). Estas se deben seleccionar apropiadamente y deben ser controladas para así obtener un fortalecimiento benéfico y evitar la introducción de agrietamiento debido a una penetración excesiva de shots sobre el material base.

A pesar del constante estudio del SP como un mecanismo para evitar falla prematura de componentes debido a la fatiga [Trško, L., Fintova, S., Nový, F., y col., 2018], no se ha dedicado trabajo que utilice el método híbrido Taguchi-lógica difusa para analizar la influencia que presenta la variación de los factores de procesamiento sobre la respuesta superficial mecánica.

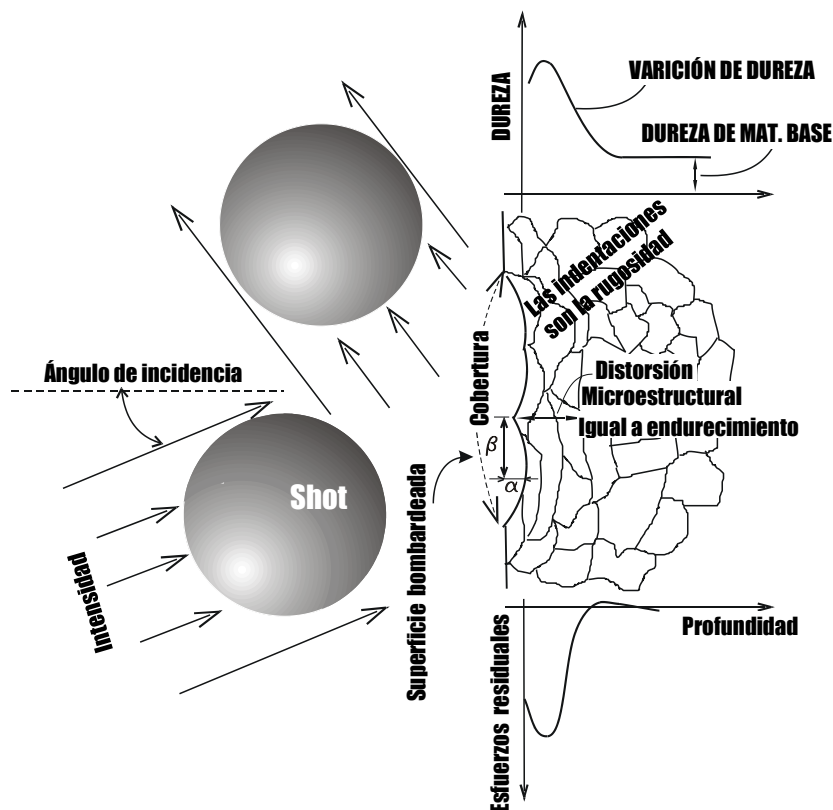


Figura 1. Representación esquemática de los factores del proceso de SP (shot, intensidad y cobertura) así como los cambios que se producen en la superficie y por debajo del material (rugosidad, esfuerzos residuales y endurecimiento por deformación).

En particular, es motivante la caracterización multi-respuesta como son las propiedades del material bajo la consideración de esfuerzos residuales, endurecimiento por deformación y la rugosidad superficial (véase Figura 1). Específicamente, el análisis de como influyen los parámetros de control del proceso a las propiedades que se inducen en el material base, es un tópico de investigación necesario y, por lo tanto, representa el objetivo fundamental de este estudio. La combinación óptima de los parámetros del proceso en el método de Taguchi varía con la característica de calidad individual, tal que la óptima combinación de parámetros para una característica de calidad puede contradecir los parámetros de otra. Para derogar esa dificultad, en este estudio, la lógica difusa se combina con el método de Taguchi para optimizar los parámetros de proceso con multi-respuesta a fin de mejorar la resistencia a la fatiga de la aleación de aluminio (AA) 2024-T351. El procedimiento para llevar a cabo la presente investigación se muestra en la Figura 2.

Metodología

Material investigado, factores y niveles del SP

Esta investigación se enfoca en obtener las condiciones óptimas del proceso SP para tratar el AA 2024-T351 con la intención de estudiar el comportamiento mecánico en términos de fatiga. Este tipo de material es comúnmente empleado por la industria aeronáutica [British Aerospace, o. l., 1997]. La composición química y algunas propiedades mecánicas se muestran en la Tabla 1.

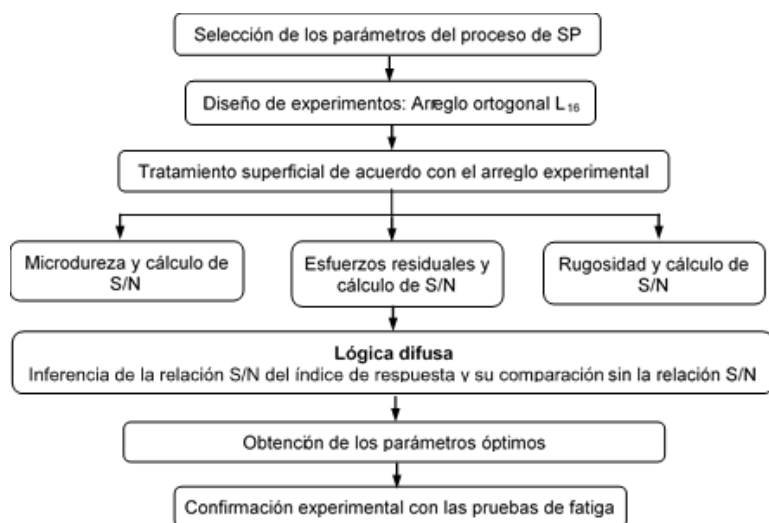


Figura 2. Procedimientos para alcanzar la combinación óptima de factores con la intención de incrementar la resistencia a la fatiga de la AA 2024-T351 después de ser tratado con el proceso de SP.

El equipo experimental para el tratamiento mecánico fue de presión directa. La media o shot se almacena en un contenedor presurizado, alimentado por gravedad en una cámara mezcladora del recipiente a presión, y se impulsa por aire a presión a través de una manguera y la nariz (Venturi) para finalmente golpear el componente a tratar. El shot cae en el recipiente a presión y la cámara mezcladora y de nuevo es impulsado por aire a presión en un ciclo continuo. En general, la información que se utiliza en el presente análisis y que se ilustra gráficamente en la Figura 1, se puede clasificar como (i) los factores de control de procesamiento y (ii) las propiedades de respuesta o efectos inducidos. Los factores de control que se eligieron son el tipo/tamaño de bolilla o shot (1), la cobertura en porcentaje (2) y el ángulo de incidencia o impacto (3), y sus correspondientes niveles se muestran en la

Tabla 2. Por su parte, las propiedades de respuesta son los esfuerzos residuales (ER), rugosidad en términos de concentraciones de esfuerzos (CE) y endurecimiento por deformación (ED).

Tabla 1. Propiedades químicas y mecánicas de la AA investigada.

σ_y	σ_u	E	σ_{FL}	Hv	Composición química (% en peso)								
(MPa)	(MPa)	(GPa)	(MPa)		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
Ref. [ASM, 1990]					0.5	0.5	3.8-4.9	0.3-0.9	1.2-1.8	0.1	0.25	0.15	Base
325	470	72.5	220	120-130									

Se utilizaron dos diferentes perfiles de probetas para evaluar las modificaciones superficiales y para la resistencia a la fatiga, como se muestra en la Figura 3.

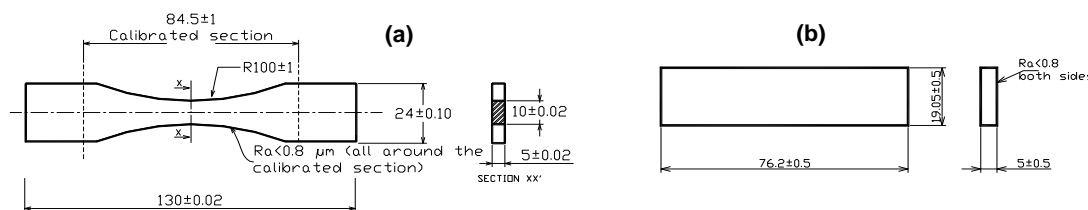


Figura 3. Perfiles de probeta: (a) Dimensiones en mm para la probeta tipo reloj de arena que se usa en las pruebas de fatiga y (b) el coupon o probeta rectangular para medir las características de calidad. No hay escala.

Tabla 2. Factores y sus respectivos niveles de control.

Factores	Tipo de shot				Cobertura (%)				Ángulo de incidencia (°)			
	S230	CCW20	S110	S330	50	100	200	400	30	90	45	90
Niveles												

Donde, el shot S110, S230, CCW20 y S330 son bolillas de acero con diámetros de 0.34, 0.72, 0.55 y 0.84 mm, respectivamente. El shot CCW20 es un tipo de shot de acero redondo pero manufacturado de alambre. La cobertura está dada en porcentaje, donde 100 representa el 100% de superficie indentada. El ángulo de incidencia

está dado en grados sexagesimales, donde 90 representa una posición de salida del shot por la nariz (Venturi) perpendicular a la superficie a impactar.

El método de Taguchi y el sistema lógica difusa

El método de Taguchi es un método experimental eficiente para medir la calidad y analizar parámetros de proceso tal que permite encontrar aquellos óptimos basados en una característica única de calidad. Sin embargo, cuando se utilizan diferentes características de calidad, los resultados que se obtienen casi siempre se contradicen uno con otro. Los arreglos ortogonales de Taguchi no enfatizan en conceptos estadísticos, sino en la relación signo-a-ruido (S/N) para el manejo de datos, logrando con ello que el problema se resuelva directamente. Los factores controlables se combinan en una forma particular utilizando un arreglo ortogonal. El método marcadamente reduce el número de veces de la experimentación determinando la combinación efectiva de experimentos a fin de encontrar los parámetros que optimizan una sola característica de calidad reteniendo la precisión experimental de dicha característica. Por lo tanto, se puede obtener la combinación óptima de los parámetros de SP para una sola característica [Lee, H. H., 2000]. La S/N específico que se utiliza en un diseño de experimentos depende de si el comportamiento de mejora está indicado por un número bajo, grande o algo cerca de un valor central. En el presente estudio, se utilizan los métricos descritos matemáticamente como:

$$1. S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i^2 \right) \quad (1) \text{ Métrico para CE, lo más-bajo-lo-mejor.}$$

$$2. S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{Y_i^2} \right) \right) \quad (2) \text{ Métrico para ER y ED, lo-más-alto-lo-mejor.}$$

En estas ecuaciones, Y_i es el valor experimental, y n es el número de veces haciendo el mismo experimento.

Un diseño factorial completo que permitiría la estimación de los principales efectos y las interacciones de los factores requeriría de 43 ó 64 experimentos. Sin embargo, tomando en consideración que un diseño experimental ortogonal depende de los grados de libertad, el número de experimentos se determinó igual a 18. Suponiendo que se desprecian las interacciones de más alto orden de los factores, se seleccionó un cuarto del diseño factorial fraccional, lo que involucró un total de 16 experimentos. La designación es $L_{16}(4^5)$, es decir, un arreglo con 16 experimentos, cinco factores con 4 niveles cada uno. Los factores son tres, pero se incluyeron 2 factores vacíos (ver Tabla 3). Esta acción apoyó en forma positiva el diseño experimental porque todos los parámetros que influyen los efectos del proceso SP son considerados. Por otro lado, el sistema de lógica difusa encuentra aplicaciones particulares en sistemas industriales y en aplicaciones que son muy complejas y que no se pueden modelar en forma precisa aún bajo varias suposiciones y aproximaciones, dado que tiene la ventaja de cálculos matemáticos relativamente sencillos en términos específicos lingüísticos en lugar de ecuaciones complicadas que usan los métodos convencionales [Kramar, D., Cica, D., Sredanovic, B., y col., 2016; Moayyedian, M., Abhary, K. y Marian, R., 2018; Unal, O., 2016]. La estructura básica de un sistema de inferencia difuso (SID) se puede considerar que está compuesto de varios bloques funcionales descritos como [Chandrasekaran, M., Muralidhar, M., Krishna, C. M., y col., 2010]: una base de reglas conteniendo las reglas *si-entonces*, una base de datos que define las funciones de membresía (FMs) de los conjuntos difusos usados en las reglas difusas, una unidad de decisión que ejecuta las operaciones de inferencia sobre las reglas, una interfaz de fusificación que transforma las variables numéricas de entrada en variables difusas con sello lingüístico, y una interfaz para defusificar que transforma los resultados difusos de la base de conocimiento en combinación con los resultados de la unidad de decisión en variables de salida numéricas (Figura 4). En este trabajo se utilizó un SID tipo Mamdani, debido a la naturaleza intuitiva e interpretable de la base de reglas, así como por su estructura relativamente sencilla.

Resultados y discusión

Las propiedades de respuesta que resultan de la configuración experimental de la Tabla 3, se muestran en la Tabla 4. Los esfuerzos residuales se determinaron utilizando el método del agujero ciego, mientras que para el endurecimiento por deformación se usó un microdurómetro Vickers y para la concentración de esfuerzos se consideró un perfilómetro. En la misma Tabla 4 se presentan los valores de S/N para cada una de las respuestas inducidas por el SP, calculados mediante las ecs. (1) y (2). Como se describió en la introducción, en este estudio no se realiza la optimización en términos de la mejor combinación de factores de proceso por cada una de las

respuestas inducidas, más bien, se aprovecha el concepto S/N para introducirlo como dato de entrada en el SID con la finalidad de encontrar la mejor combinación, pero de todas las respuestas a través de un solo índice de respuesta.

Tabla 3. Arreglo ortogonal para la experimentación.

Arreglo ortogonal		Factores asignados y sus niveles					Arreglo ortogonal		Factores asignados y sus niveles				
No.	ABCDE	Shot (A)	Cobertura (B)	Vacío (C)	Ángulo (D)	Vacío (E)	No.	ABCDE	Shot (A)	Cobertura (B)	Vacío (C)	Ángulo (D)	Vacío (E)
1	1 1 1 1 1	S230	50	—	30	—	9	3 1 3 4 2	S110	50	—	90	—
2	1 2 2 2 2	S230	100	—	90	—	10	3 2 4 3 1	S110	100	—	45	—
3	1 3 3 3 3	S230	200	—	45	—	11	3 3 1 2 4	S110	200	—	90	—
4	1 4 4 4 4	S230	400	—	90	—	12	3 4 2 1 3	S110	400	—	30	—
5	2 1 2 3 4	CCW20	50	—	45	—	13	4 1 4 2 3	S330	50	—	90	—
6	2 2 1 4 3	CCW20	100	—	90	—	14	4 2 3 1 4	S330	100	—	30	—
7	2 3 4 1 2	CCW20	200	—	30	—	15	4 3 2 4 1	S330	200	—	90	—
8	2 4 3 2 1	CCW20	400	—	90	—	16	4 4 1 3 2	S330	400	—	45	—

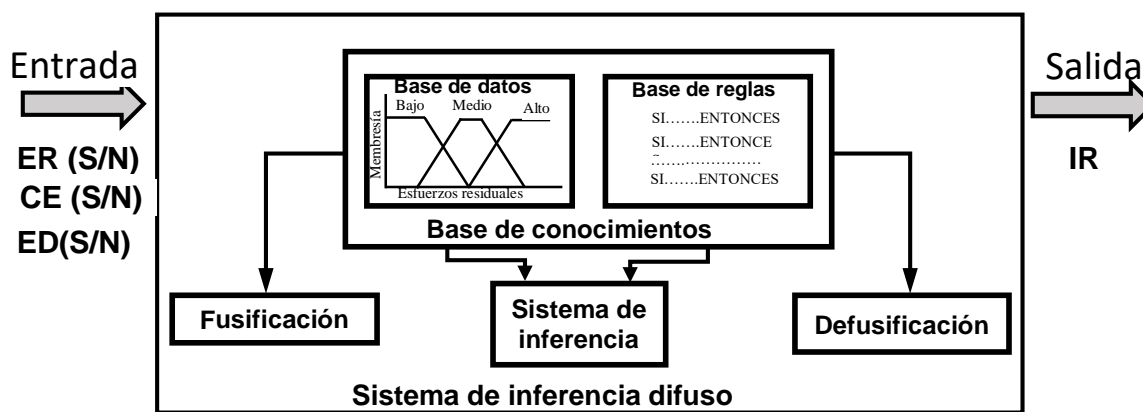


Figura 4. Representación esquemática del sistema de inferencia difuso.

Tabla 4. Propiedades de respuesta experimental y su correspondiente métrico S/N adimensional.

No. Exp.	Esfuerzos residuales (Mega Pascales)		Endurecimiento (Dureza Vickers)		Concentración de esfuerzos de esfuerzos (adimensional)		No. Exp.	Esfuerzos residuales (Mega Pascales)		Endurecimiento (Dureza Vickers)		Concentración de esfuerzos de esfuerzos (adimensional)	
	ER	S/N (Ec. 2)	ED	S/N (Ec. 2)	CE	S/N (Ec. 1)		ER	S/N (Ec. 2)	ED	S/N (Ec. 2)	CE	S/N (Ec. 1)
	1	-124.80	41.75	144.61	43.20	1.36		-2.684	9	-280.00	48.12	145.26	43.24
2	-233.70	47.08	145.15	43.24	1.55	-3.824	10	-131.50	41.85	153.50	43.72	1.58	-3.954
3	-197.20	41.43	154.74	43.79	1.66	-4.395	11	-379.20	51.35	157.50	43.95	1.57	-3.913
4	-246.65	46.34	166.90	44.45	1.62	-4.166	12	-149.37	43.22	151.75	43.62	1.53	-3.718
5	-173.15	44.31	135.65	42.65	1.56	-3.842	13	-257.90	47.88	134.50	42.57	1.45	-3.253
6	-243.00	47.70	147.45	43.37	1.72	-4.730	14	-170.00	44.56	159.00	44.03	1.43	-3.114
7	-164.95	44.24	150.08	43.53	1.63	-4.260	15	-308.50	49.04	157.89	43.97	1.57	-3.918
8	-245.55	47.68	157.55	43.95	1.84	-5.303	16	-292.30	48.31	153.58	43.73	1.54	-3.764

En la fase de fusificación, los valores numéricos (*crisp values*) que son las S/N de cada respuesta (Tabla 4), se transforman en variables lingüísticas que se pueden considerar como los términos lingüísticos para los subconjuntos difusos. Se asignaron tres subconjuntos difusos (Bajo, Medio y Alto) a cada variable de entrada, es

decir, S/N_{ER} para los ER, S/N_{CE} para la CE y S/N_{ED} para el ED. Con la intención de encontrar los mejores resultados, se utilizaron las FM's triangulares y trapezoidales como se describe numérica y gráficamente en la Tabla 5. Se empleó la herramienta de lógica difusa que trabaja con el software comercial Matlab para la gestión de los datos con el SID.

Tabla 5. Funciones de membresía de las propiedades respuesta (S/N) con valores nítidos.

Variable Lingüística	Valores Lingüísticos	Función de pertenencia Triangular	Función de pertenencia Trapezoidal	Representación gráfica (ejemplo de funciones de pertenencia triangulares)
S/N _{ER} (K ₁)	Bajo (L ₁)	$\mu_{L_1}^{k_1}: (37.46, 41.43, 45.4)$	$\mu_{L_1}^{k_1}: (36.97, 40.93, 41.93, 45.89)$	
	Medio (L ₂)	$\mu_{L_2}^{k_1}: (42.42, 46.39, 50.36)$	$\mu_{L_2}^{k_1}: (41.93, 45.89, 46.89, 50.85)$	
	Alto (L ₃)	$\mu_{L_3}^{k_1}: (47.38, 51.35, 55.32)$	$\mu_{L_3}^{k_1}: (46.89, 50.85, 51.85, 55.81)$	
S/N _{CE} (K ₂)	Bajo (L ₁)	$\mu_{L_1}^{k_2}: (-6.351, -5.303, -4.255)$	$\mu_{L_1}^{k_2}: (-6.482, -5.434, -5.172, -4.124)$	
	Medio (L ₂)	$\mu_{L_2}^{k_2}: (-5.041, -3.994, -2.946)$	$\mu_{L_2}^{k_2}: (-5.172, -4.124, -3.863, -2.815)$	
	Alto (L ₃)	$\mu_{L_3}^{k_2}: (-3.732, -2.684, -1.636)$	$\mu_{L_3}^{k_2}: (-3.863, -2.815, -2.553, -1.505)$	
S/N _{ED} (K ₃)	Bajo (L ₁)	$\mu_{L_1}^{k_3}: (41.82, 42.57, 43.32)$	$\mu_{L_1}^{k_3}: (41.72, 42.48, 42.66, 43.42)$	
	Medio (L ₂)	$\mu_{L_2}^{k_3}: (42.76, 43.51, 44.26)$	$\mu_{L_2}^{k_3}: (42.66, 43.42, 43.6, 44.36)$	
	Alto (L ₃)	$\mu_{L_3}^{k_3}: (43.7, 44.45, 45.2)$	$\mu_{L_3}^{k_3}: (43.6, 44.36, 44.54, 45.3)$	

Para las reglas difusas se consideraron las 3 variables lingüísticas de entrada con sus valores descritos en la Tabla 5, y en el caso de la defusificación, una variable de salida, etiquetada como IR con valores lingüísticos MuyBajo, Bajo, Medio, Alto y MuyAlto, como se observa en la Figura 5. Es importante mencionar que para la defusificación se emplea el centro de gravedad (COG), lo cual implica que el valor a obtener para el índice IR se ubica en el centro del rango de membresía. Con lo anterior, se definieron 27 reglas con la siguiente configuración:
 REGLA 1: SI (S/N_{ER} ES Bajo Y S/N_{CE} ES Bajo Y S/N_{ED} ES Bajo) ENTONCES IR ES MuyBajo;
 REGLA 2: SI (S/N_{ER} ES Bajo Y S/N_{CE} ES Bajo Y S/N_{ED} ES Medio) ENTONCES IR ES Bajo;
 REGLA 3: SI (S/N_{ER} ES Bajo Y S/N_{CE} ES Bajo Y S/N_{ED} ES Alto) ENTONCES IR ES Bajo;
 ...
 REGLA 27: SI (S/N_{ER} ES Alto Y S/N_{CE} ES Alto Y S/N_{ED} ES Alto) ENTONCES IR ES MuyAlto;

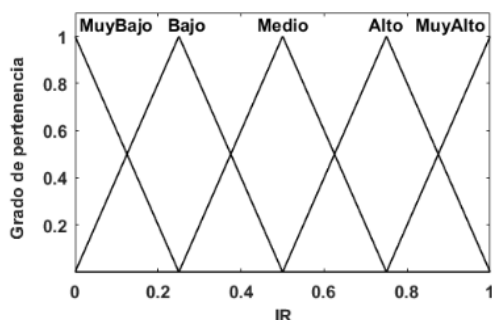


Figura 5. Funciones de membresía para el IR.

El valor IR determinado de las propiedades de respuesta experimental se obtiene directamente utilizando el visor de las reglas dentro de la herramienta de lógica difusa del Matlab. Los valores numéricos se muestran en la Tabla 6. Es evidente que el IR obtenido a través de las FM's triangular y trapezoidal con S/N no presenta una diferencia significativa, por lo que para los datos de los experimentos resulta indistinto la FM a utilizar. Por su parte, entre más alto sea el valor de IR más alta es la posibilidad de que esa corrida experimental represente la óptima. En este estudio, la corrida experimental No. 14 adopta las mejores características de rendimiento.

Al respecto, los parámetros que podrían ofrecer la condición óptima para incrementar la resistencia a la fatiga corresponden al Shot del nivel 4, es decir, el Shot S330; la cobertura del nivel 2, es decir, 100% y el ángulo de incidencia del nivel 1, esto es, el ángulo de incidencia de 30°. Este resultado, desde el punto de vista experimental, significa que se tiene un efecto muy positivo en los esfuerzos residuales y endurecimiento por deformación, debido a que es un shot grande y la cobertura es completa. Más aún, aunque el shot es grande y pudiera generar un alto nivel de rugosidad, el ángulo de incidencia es de 30°, es decir, ese ángulo de impacto reduce considerablemente la profundidad de las indentaciones y por tanto los factores de concentración de esfuerzos que origina la rugosidad permanecen bajos.

Tabla 6. Resultados del SID mostrando los IRs con valores nítidos.

No. Exp.	Índice de Respuesta				No. Exp.	Índice de Respuesta			
	SIN S/N		CON S/N			SIN S/N		CON S/N	
	FMs Trapezoidal		FMs Triangular			FMs Trapezoidal		FMs Triangular	
1	0.5	0.5	0.5	0.5	9	0.441	0.518	0.489	0.5
2	0.454	0.514	0.495	0.5	10	0.529	0.5	0.5	0.5
3	0.579	0.427	0.531	0.452	11	0.487	0.617	0.5	0.612
4	0.5	0.5	0.5	0.5	12	0.5	0.51	0.5	0.5
5	0.469	0.396	0.5	0.406	13	0.342	0.5	0.326	0.5
6	0.5	0.473	0.5	0.5	14	0.582	0.639	0.556	0.646
7	0.512	0.452	0.5	0.498	15	0.486	0.622	0.5	0.621
8	0.605	0.5	0.594	0.5	16	0.442	0.563	0.475	0.518
						0.4955	0.5144	0.4979	0.5158

Todo lo anterior se traduce en un rendimiento a la fatiga que debería ser superior o al rendimiento que no tiene tratamiento superficial mecánico de SP e inclusive al rendimiento de cualquier corrida experimental. En la Figura 6, se muestra el comportamiento a la fatiga de las probetas con tratamiento de SP, bajo condiciones óptimas e

iniciales, así como el comportamiento a la fatiga de probetas sin tratamiento con fines de comparación. En la gráfica, las corridas 11 y 14 constituyen las pruebas de confirmación. La corrida 14 posee la combinación optimizada de acuerdo con el procedimiento híbrido de Taguchi-lógica difusa, mientras que la corrida 11 es una corrida elegida al azar del experimento diseñado. Evidentemente, las corridas 11 y 14 presentan un mejor comportamiento en términos de resistencia a la fatiga, comparado con el de las probetas que no tuvieron tratamiento de SP. Este resultado es indicativo del efecto que tiene tanto los esfuerzos compresivos residuales como el endurecimiento por deformación en la propagación de la grieta principal cuando la probeta se está fatigando, es decir, que estos efectos inducidos por el proceso mecánico de SP representan la dificultad para que la grieta y sobre todo la zona plástica en la punta de la grieta brinque de un grano a otro. Sin embargo, entre las corridas 14 y 11 se puede observar un mejor comportamiento de la corrida 11 con respecto a la optimizada 14. Desde el punto de vista numérico, efectivamente están consideradas las características de calidad para las propiedades inducidas en forma correspondiente, es decir, altos ER y ED, y bajos CE, y por ello, la corrida 14 responde correctamente a esas condiciones. Desde el punto de vista experimental, está claro que el aluminio es un material dúctil, y que evidentemente no está exento de defectos en su producción (como elementos de aleación, incrustaciones, etc.). Como se trata de un proceso de impacto, la deformación plástica que ocurre cuando se utiliza un shot del tamaño S110 (0.2 mm de diámetro) es mucho menor que la que se presenta cuando se usa un shot S330 (0.8 mm de diámetro). La concentración de esfuerzos es más alta para este último tipo de shot que para el primero. Si se tiene una rugosidad más alta, entonces el nivel de concentración de esfuerzos se incrementa y por tanto la susceptibilidad de que se genere una mayor cantidad de grietas cortas es superior y por tanto la probeta bajo carga dinámica tenderá a fallar más rápidamente, como es el caso de la corrida 14 en comparación con la corrida 11.

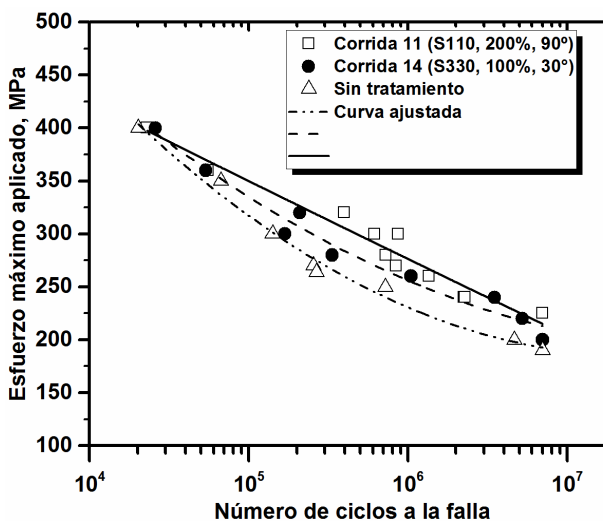


Figura 6. Curvas del tipo Wöhler (S-N), del comportamiento a la fatiga con carga axial (tensión-tensión) y amplitud constante.

Trabajo futuro

Emplear funciones de pertenencia no lineales con un reducido número de reglas de control en el modelo de inferencia difuso para conocer si existe discrepancia significativa o se mantiene la tendencia que se presentó en el presente trabajo con las funciones lineales. La aplicación de la lógica difusa permitió integrar tres respuestas con el resultado favorable de una sola característica del tipo IR, lo que posibilitó la elección de la mejor combinación de variables del SP, dado que se manifestó positivamente en los resultados de fatiga. No obstante, dado el resultado experimental que se presentó en la corrida 11, es necesario mejorar la selección de reglas a fin de que se considere la posibilidad de que los materiales a tratar contengan defectos en su producción. Adicionalmente, surge la necesidad de realizar trabajo utilizando técnicas de inteligencia artificial alternativas, por ejemplo: redes neuronales, algoritmos genéticos o una combinación de ellas.

Conclusiones

En función a los resultados experimentales, se pueden determinar las siguientes conclusiones:

1. El AA 2024-T351 sometido a las condiciones óptimas previstas (S330, 100%, 30°) mostró un rendimiento de fatiga satisfactorio. El resultado del experimento de confirmación 11 (S110, 200%, 90°) en las pruebas de fatiga evidenciaron la necesidad de ajustar las reglas de control en el sistema de inferencia difuso.
2. La metodología híbrida Taguchi-lógica difusa es efectiva para optimizar las características de respuesta múltiple en el SP dentro de los rangos de los factores de control estudiados.
3. Las ventajas del enfoque Taguchi-lógica difusa en comparación con los métodos clásicos se basan en la velocidad, la simplicidad y el bajo costo. Por lo tanto, este enfoque puede considerarse para ser aplicado en situaciones de ingeniería.
4. Las funciones de membresía trapezoidal y triangular, para este trabajo, no representan diferencias significativas, por lo que es indistinto su utilización para este tipo de aplicaciones.

Agradecimientos

El presente estudio se logra debido al apoyo financiero del Tecnológico Nacional de México (TecNM) con el proyecto 5363.17-P y al Instituto Tecnológico de Tlalnepantla por las facilidades otorgadas.

Referencias

1. Nam, Y.-S., Jeon, U., Yoon, H.-K., Shin, B.-C. and Byun, J.-H. (2016). Use of response surface methodology for shot peening process optimization of an aircraft structural part. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. **(87)** 9, 2967-2981.
2. González, J., Peral, L.-B., Colombo, C. and Fernández Pariente, I. (2018). A Study on the Microstructural Evolution of a Low Alloy Steel by Different Shot Peening Treatments. *Metals*. **(8)** 187.
3. Trško, L., Fintova, S., Nový, F., Bokůvka, O., Jambor, M. and Pastorek, F. (2018). Study of relation between shot peening parameters and fatigue fracture surface character of an AW 7075 aluminium alloy. *Metals*. **(8)** 2, 111.
4. British Aerospace, o. l. (1997). Shot peening for improved fatigue and stress corrosion resistance. British Aerospace (Airbus), PROCESS SPECIFICATION (ABP 1-2031). Issue, 1-23.
5. ASM. (1990). ASM Handbook, Volume 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. Issue,
6. Lee, H. H. (2000). Taguchi methods: Principles and practices of quality desing. Gau Lih Book Co. LTD. Taiwan.
7. Kramar, D., Cica, D., Sredanovic, B. and Kopac, J. (2016). Design of fuzzy expert system for predicting of surface roughness in high-pressure jet assisted turning using bioinspired algorithms. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing : AI EDAM*. **(30)** 1, 96-106.
8. Moayyedian, M., Abhary, K. and Marian, R. (2018). Optimization of injection molding process based on fuzzy quality evaluation and Taguchi experimental design. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*.
9. Unal, O. (2016). Optimization of shot peening parameters by response surface methodology. *Surface and Coatings Technology*. **(305)** 99-109.
10. Chandrasekaran, M., Muralidhar, M., Krishna, C. M. and Dixit, U. S. (2010). Application of soft computing techniques in machining performance prediction and optimization: a literature review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. **(46)** 445-464.

