



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TLALNEPANTLA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

**“APLICACIÓN DE LÓGICA DIFUSA PARA
DETERMINAR LA COMBINACIÓN ÓPTIMA DE PARÁMETROS DEL
PROCESO DE SHOT PEENING EN TÉRMINOS DE LA
RESISTENCIA A LA FATIGA SOBRE EL ALUMINIO 2024-T351”**

T E S I S

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

PRESENTA:

ALICIA GUADALUPE LAZCANO HERRERA

DIRECTOR: DR. JOSÉ SOLÍS ROMERO

CO-DIRECTORA: M.C. SANDRA SILVIA ROBLERO AGUILAR

TLALNEPANTLA DE BAZ, ESTADO DE MÉXICO, FEBRERO DEL 2019.





"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"

Tlalnepantla de Baz, Edo. de México., a **05 febrero/2019**

OFICIO DEPI 039/02/2019

**C.ALICIA GUADALUPE LAZCANO HERRERA
PRESENTE.**

En base a la normatividad de operación de los estudios de posgrado dentro del Sistema Nacional de Educación Superior Tecnológica y de acuerdo a la reunión celebrada por el jurado para la revisión de tesis **"APLICACIÓN DE LÓGICA DIFUSA PARA DETERMINAR LA COMBINACIÓN ÓPTIMA DE PARÁMETROS DEL PROCESO DE SHOT PEENING EN TÉRMINOS DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA SOBRE EL ALUMINIO 2024-T351"**, nos permitimos hacer de su conocimiento que el dictamen de dicho jurado es:

"SE APRUEBA LA TESIS PARA SU IMPRESIÓN"

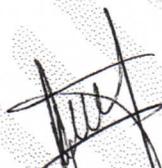
Sin más por el momento, quedo de Usted.

ATENTAMENTE

*Excelencia en Educación Tecnológica®
"Por la Realización Tecnológica de mi Pueblo"*



SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA
DIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
COORDINACIÓN DEL INSTITUTO
TECNOLÓGICO DE TLALNEPANTLA


**DR. JOSÉ SOLÍS ROMERO
PRESIDENTE**


**M.C. SANDRA SILVIA ROBLERO AGUILAR
SECRETARÍA**


**DR. VÍCTOR AUGUSTO CASTELLANOS ESCAMILLA
VOCAL**


**DR. OSCAR ARMANDO GÓMEZ VARGAS
SUPLENTE**





SEP
SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Tlalnepantla

"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"

Tlalnepantla de Baz, Edo. de México, a 01/febrero/2019

OFICIO DEPI 038/02/2019

C. ING. REYNALDO OLIVARES GURROLA
JEFE DEL DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
P R E S E N T E .

Por este conducto, me permito informarle que la Tesis para la obtención de Grado de **Maestra en Ciencias de la Ingeniería**, presentada por la **C. ING. ALICIA GUADALUPE LAZCANO HERRERA**, intitulada **"APLICACIÓN DE LÓGICA DIFUSA PARA DETERMINAR LA COMBINACIÓN ÓPTIMA DE PARÁMETROS DEL PROCESO DE SHOT PEENING EN TÉRMINOS DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA SOBRE EL ALUMINIO 2024-T351"**, la cual fue evaluada por la comisión revisora y dictaminó que es:

"APROBADA"

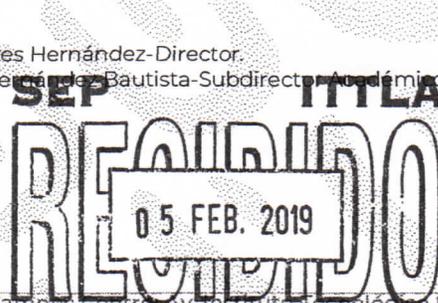
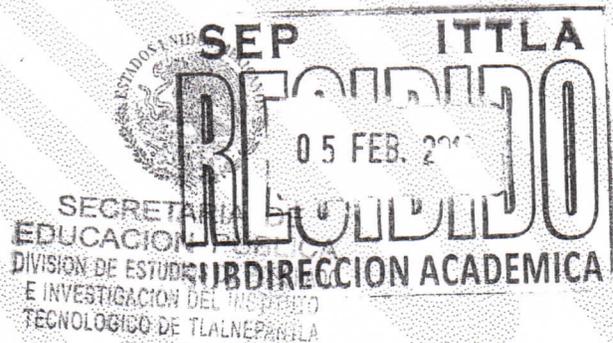
Sin otro particular al momento, quedo de Usted.

ATENTAMENTE
EXCELENCIA EN EDUCACIÓN TECNOLÓGICA®
"por la realización tecnológica de mi pueblo"

M.C. MIGUEL ANGEL PAREDES RUEDA
JEFE DE LA DIV. DE EST. DE POSGRADO E
INVESTIGACIÓN.

C.c.p.- Dr. Gustavo Flores Hernández-Director.
Ing. José Raúl Hernández Bautista-Subdirector Académico.
Interesada.
Archivo.

MAPR/Isr



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TLALNEPANTLA

Campus Centro, Av. Instituto Tecnológico S/N, Col. La Comunidad C.P. 54070
Tlalnepantla, Estado de México. Tel. 55653261 / 53900209
Campus Presa, Carretera Lázaro Cárdenas, La Presa. C.P. 54187
Tlalnepantla de Baz, Estado de México. Tel: 20624997

www.tlalnepantla.tecnm.mx



AGRADECIMIENTOS

Primeramente quisiera agradecer a Dios, por la vida que me otorgo y la oportunidad de vivirla plenamente. Asimismo, a él, por darme la gracia para ver el camino que me señalo y por todas la bendiciones que me otorgó.

Este trabajo también se lo dedico a mi familia, por su ejemplo constante de seguir trabajando día con día para conseguir los sueños y no rendirse a pesar de lo difícil que las situaciones puedan parecer.

A mi mamá por ser el tenaz ejemplo de lo que el trabajo puede lograr, por educarme de manera extraordinaria y con el mejor de los ejemplos. Sin ti, la magia no sucede. Gracias por ser mi apoyo y me empuje.

A mis hermanas, que son las Estrella que alumbra mis más oscuras noches y la Luz que alumbra mis mañanas. Sin ustedes y su apoyo no sería lo mismo.

Al amor que yo no esperaba: Christian Uc. Como dice una canción “es gracias a que te conozco que cambie para bien”. Por brindarme la más maravillosa compañía en mi vida y por alentarme a cumplir mis sueños.

A mi sobrina: cuando sepas leer espero que entiendas que “Let it go” es más difícil que “hacer algunas reparaciones”. Y que el ejemplo sirva para que te esfuerces en lograr lo que te propongas.

A mi cuñado Iván por darme ejemplo de vida que los caminos de Dios son más misteriosos de lo que imaginamos.

Al Dr. José Solís por su impecable guía en la realización de este trabajo, su paciencia y su constante apoyo para la culminación del proyecto.

A la M.C. Sandra Roblero por su dedicación en la enseñanza de lógica difusa.

Dijo Shakespeare: “El tiempo no vuelve atrás, por lo tanto, planta tu jardín y adorna tu alma en vez de esperar a que alguien te traiga flores”. Agradezco a aquellas semillas que florecieron en este proceso.

RESUMEN

El presente trabajo pretende, mediante la aplicación de una de las muchas metodologías de la IA (Inteligencia Artificial) nombrada “lógica difusa” determinar las características funcionales, es decir aquella combinación de factores que inducen a la mejora de la respuesta del proceso de shot peening para una aleación de aluminio 2024-T351.

El proceso de shot peening o “granallado” es un proceso que se emplea rutinariamente en la industria aeronáutica y automotriz para incrementar la resistencia a la fatiga de diversos materiales que conforman estructuras y componentes. Los efectos de dicho tratamiento son esfuerzos compresivos, esfuerzos residuales, rugosidad superficial y endurecimiento por deformación, por mencionar algunos y la correcta combinación de ellos es lo que hace posible un mejoramiento notable en la resistencia a la fatiga de los materiales.

Los factores de control de entrada son de diversos tipos, como el tipo y tamaño de la de bolilla (shot), la cobertura sobre la superficie del material y el ángulo de incidencia sobre esta.

La lógica difusa es utilizada para determinar la combinación de factores de control que inciden en las diversas respuestas (o respuestas multi-objetivo) de la aleación de aluminio 2024-T351.

Para fines estadísticos, los parámetros experimentales fueron tratados utilizando un arreglo fraccional ortogonal L_{16} . Las tres propiedades que se determinaron en forma experimental directamente sobre la aleación anteriormente mencionada, son las entradas con las que trabaja el sistema de inferencia difuso. La salida que se obtiene es llamada Índice de Respuesta (IR).

Para validar la experimentación, al último se realizó una comparación de los valores obtenidos en dicho IR con las condiciones iniciales y óptimas del tratamiento, y se observó una mejora en la resistencia a la fatiga.

ABSTRACT

The present work pretends, using the application of one of the many AI (Artificial Intelligence) methodologies named “fuzzy logic” determine the functional characteristics, by means the combination of actors that induce the best response of the process of shot peening for an 2024-T351 aluminium alloy .

The shot peening process it's used daily in the aeronautic an automotive industry to increase the fatigue resistance of many materials that compose structures and components., The effects of the treatment are compressive stress, residual stress, surface roughness and work hardening to mention some, and the right combination of them is what that makes possible a improve to fatigue resistance of the materials.

The input control factors are of many types like the shot material or shot size, the coverage on the surface of the material, and the incidence angle.

The fuzzy logic is used to determine the combination of the control factors that influence in the different responses (o multi-target responses) of the 2024-T351 aluminium alloy.

Fort statistical purposes, the experimental parameters were treated in a fractional orthogonal array L_{16} . The three properties established in the experimentation on the alloy previously mentioned, are the inputs of the fuzzy inference system. The obtained output it's called Response Index (RI).

To validate the experimentation, at least we do a comparison of the values of IR against the initial conditions and optimal of the shot peening treatment, and was observed a improvement of fatigue resistance.

Índice

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1. Ingeniería de superficies.....	3
1.1. Estructura e Integridad superficial.....	4
1.2.Desgaste por fatiga.....	6
1.3.Ensayo de fatiga.	7
2. Lógica Difusa.....	9
2.1.Funciones de membresía y sus partes básicas.	11
2.3. Interfaz de difusificación	13
2.2.Base de conocimiento.....	13
3.Diseño Robusto.....	14
3.1.Tipos de estudios de robustez.	15
CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES	17
1.Granallado o shot peening.....	18
2.Método Taguchi.....	21
3.Métodos de inferencia en sistemas difusos	24
3.1.Inferencia difusa.....	27
3.2.Método Mamdani	28
3.3.Método Takagi-Sugeno.....	29
CAPÍTULO 3. PROCESO EXPERIMENTAL	31
1.Recopilación de datos	32
2. Respuesta superficial después de aplicado el proceso de shot peening	36
2.1.Esfuerzos residuales.....	36
2.2.Endurecimiento por deformación	38
2.3.Concentración de esfuerzos	39
2.4. Prueba de fatiga.....	40
3.Fusificación	42
3.Defusificación.....	48

CAPÍTULO 4.....	50
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	50
1.Resultados.....	51
2.Discusión.....	54
CONCLUSIONES	57
REFERENCIAS	58
ANEXOS	60

Índice de Ilustraciones

Figura 1. Áreas de la Ingeniería de superficies [1]	4
Figura 2. Esquema de sección transversal de la estructura superficial de los metales [1].....	6
Figura 3. Ejemplos de fatiga en la industria aeronáutica	7
Figura 4. Partes de una función de membresía [5].....	12
Figura 5. Proceso de shot peening.....	19
Figura 6. Esfuerzos aplicados en componente sin tratamiento	19
Figura 7. Esfuerzos aplicados en un componente con tratamiento de shot peening	20
Figura 8. Diagrama de los diferentes tipos de factores en diseño robusto [7]	22
Figura 9. Representación de conjuntos. Diagrama de Venn	24
Figura 10. Representación de un cluster de información	26
Figura 11. Diagrama de proceso de inferencia en sistema difuso	28
Figura 12. Representación esquemática de los parámetros involucrados en el proceso de <i>shot peening</i>	33
Figura 13. Gráfica lineal del arreglo ortogonal L_{16}	34
Figura 14. Representación gráfica del cálculo de esfuerzos residuales	37
Figura 15. Representación del método del agujero ciego	37
Figura 16. Identador en un ensayo Vickers	39
Figura 17. Ejemplo de perfilómetro.....	40
Figura 18. Ensayo de fatiga de viga en voladizo rotatoria	41
Figura 19. Funciones de pertenencia triangular, trapezoidal, gaussiana y senoidal [18]	43
Figura 20. Editor Matlab de lógica difusa.....	44
Figura 21 . Funciones de pertenencia triangulares(a-c) y trapezoidales(d-f) de los valores de entrada del sistema de inferencia.....	45
Figura 22. Funciones de membresía de entrada y salida en entorno Matlab	46
Figura 23. Representación esquemática del sistema de inferencia difuso	48

Figura 24. Visualizador de funciones de membresía y su respuesta en Matlab .	49
Figura 25. Funciones de pertenencia triangular y trapezoidal para las variables de salida	52
Figura 26. Representación superficial en Matlab del IR	52
Figura 27. Factores de control promedio con sus respectivos niveles en términos de IR.....	54
Figura 28. Curvas S-N, bajo carga axial y amplitud constante para probetas con SP y sin SP	55

Índice de Tablas

Tabla 1. Ejemplo de Arreglo ortogonal L8 [8].....	22
Tabla 2. Razón de señal/ ruido para diferentes tipos de variables de respuesta [8].....	23
Tabla 3. Comparación entre sistemas de inferencia	30
Tabla 4. Factores y sus niveles de control	33
Tabla 5. Arreglo ortogonal de la experimentación.....	34
Tabla 6. Propiedades de respuesta experimental.....	42
Tabla 7. Funciones de pertenencia con valores nítidos	44
Tabla 8. Reglas del sistema de inferencia difuso	47
Tabla 9. Valores nítidos de entrada y salida del sistema	51
Tabla 10. Valores IR promedio para cada factor de control	53
Tabla 11. Resultados bajo condiciones iniciales y óptimas.....	55

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN

En el contexto social actual hay muchas temáticas que preocupan. Una de ellas es el uso correcto de los recursos ambientales. El mal uso de estos permite que problemas como el calentamiento global crezcan aceleradamente año tras año. Esto derivado a la creciente necesidad de asegurar un desarrollo sustentable no para las generaciones futuras, sino para estas generaciones colocan a las tecnologías que permitan el aprovechamiento de recursos como prioridad de diversas políticas ambientales.

Dentro de las muchas actividades humanas que se realizan y que tiene un alto impacto ambiental esta el uso de medios de transporte para el desplazamiento. En el entorno globalizado actual, este tipo de cuestiones impactan no solo en la movilidad humana, sino en la salud pública, la estabilidad económica, y las causas primordiales de pérdida de biodiversidad.

Es por ello, que la reducción de las emisiones nocivas ocasionadas por el transporte, presenta retos especiales en el área de la ingeniería. Esta reducción requiere evitar la falla masiva de los componentes, lo cual a su vez depende de la mejora en el tiempo de utilidad de los mismos. Eso coloca a los avances en las tecnologías relacionadas con los materiales, combustibles y aceites para motores en un entorno de suma importancia para atender dicha problemática.

Uno de los objetivos de presente trabajo es proporcionar una estrategia para combatir la falla por fatiga. Es sabido que el uso de tratamientos mecánicos está plenamente identificado como la estrategia más popular para combatir la falla por fatiga ya que proporciona una larga y mejorada vida útil de los componentes de motores, en los cuales, se necesitan propiedades específicas en sitios específicos sin que se comprometan las resistencias de todo el componente.

¿Porqué es importante atender la falla por fatiga? La falla por fatiga se presenta cuando los componentes están sujetos a condiciones de cargas fluctuantes o

cíclicas, ocasionando una grieta que se propaga a lo largo de toda la pieza o componente. Este tipo de cargas son a las que se someten componentes de la industria aeroespacial o automotriz.

Dichas grietas normalmente se originan desde la superficie de los componentes debido a, entre muchos otros factores a los defectos que contiene el material. Una manera de desacelerar dichas grietas, aún cuando la carga dinámica se continua aplicando es que esta se encuentre con una pequeña barrera interna, como ocurre en microestructuras de materiales en donde los tamaños de grano son lo suficientemente pequeños como para evitar una propagación. Esto desacelera la velocidad de propagación porque la trayectoria de original de la grieta se desvía. Es por eso que una de las maneras de cuantificar a la resistencia a la fatiga es medir la resistencia a la propagación de las grietas que ofrece un material.

En la presente propuesta se lleva a cabo un proceso de shot peening en una aleación de aluminio 2024-T351. Este tipo de material es uno de los que más se usan en la industria aeroespacial para la creación de componentes que se someten a esfuerzos cíclicos. Como se verá más adelante, este proceso impide la propagación de las grietas la cambiar la microestructura del material.

Una vez realizado el tratamiento mecánico correspondiente (shot peening) se realizará una prueba de fatiga para poder a analizar a dicha pieza con la intención de extraer los datos sobre el mejoramiento de la resistencia a la falla por fatiga del componente. Los mismos permitirán, después de un procesamiento obtener los parámetros óptimos del tratamiento superficial utilizando la lógica difusa para su análisis.

El uso de la lógica difusa permitirá, de una manera más sencilla, mejorar el proceso de shot peening. El uso de esta técnica de cómputo suave permitiría abatir la metodología tradicional de prueba y error, la cual consume tiempo considerable debido al número de experimentos/interacciones que se tendrían que llevar a cabo.

Esto mediante la creación de un sistema difuso que permitirá relacionar las respuestas experimentales con niveles de control, tales como lo son los esfuerzos residuales, el endurecimiento por deformación, y la rugosidad superficial en términos de concentración de esfuerzos.

En el presente capítulo se pretende revisar los conceptos que son necesarios para entender el sistema difuso y la optimización del proceso.

Se abarcaran conceptos de ingeniería de superficies, de lógica difusa y de diseño robusto, que componen las tres partes primordiales del sistema.

1. Ingeniería de superficies

La Ingeniería de superficies es una rama de la ingeniería que se encarga de estudiar materiales que se modifican para poder adaptarse con un mejor desempeño a los diferentes estímulos del medio ambiente, tales como las inclemencias del tiempo o las derivadas de diversas actividades humanas como aplicación de cargas, maquinado, etc.

Para ello hay que comprender que compone la superficie de un material. La superficie de un material es una capa delgada del mismo que está expuesta a dichos estímulos externos, independientemente de las características de su forma.

Es debido a los efectos del procesamiento de un componente (como en el momento del maquinado) que la superficie de dicha parte manufacturada posee propiedades ligeramente diferentes al resto del material.

A pesar de que el total del volumen del material determina sus propiedades mecánicas generales, la superficie influye en el desempeño de la parte en diferentes áreas. (Ver

Figura 1) como las aquí mencionadas [1]:

- Fricción y desgaste de los herramientas, moldes y matrices, así como de los productos fabricados con ellos.
- Eficacia de los lubricantes durante el proceso de manufactura y a lo largo de la vida útil de la parte.
- Apariencia y rasgos geométricos de la parte y su papel en operaciones posteriores, como soldadura, soldadura blanda, unión con adhesivos, pintura y recubrimiento, así como resistencia a la corrosión.

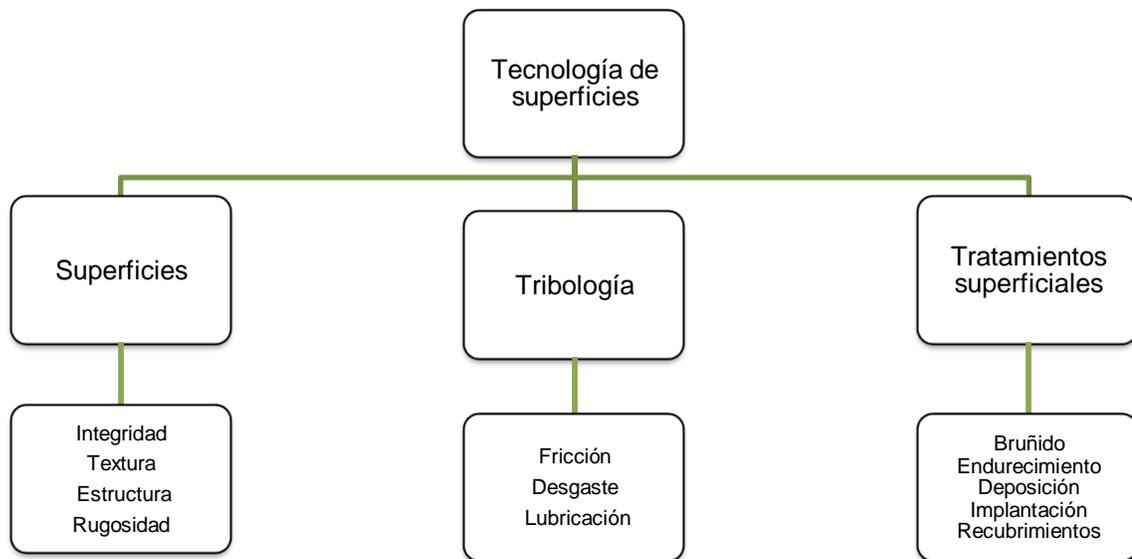


Figura 1. Áreas de la Ingeniería de superficies [1]

Una vez comprendida la importancia de la superficie de un componente en su futuro desempeño, se tiene que evaluar las diversas propiedades del mismo que permiten un cierto comportamiento del material

1.1. Estructura e Integridad superficial.

El término integridad superficial se utiliza para describir las características físicas, químicas y mecánicas de un material. [1]

Esta integridad superficial va ligada a los defectos que se encuentren dentro de ella. Estos defectos se originan en la formación de la superficie e influyen en el comportamiento no solo del material, sino de la pieza que puede ser maquinada posteriormente, en el caso del presente estudio por ejemplo, dependerá del número de granos en el aluminio la velocidad con la que se propague una grieta en un tren de aterrizaje, por citar un ejemplo.

La tribología (del griego τριβω “frotar o rozar”) es una parte de la Ingeniería de superficies que se encarga de estudiar aspectos de fricción, desgaste y lubricación de las superficies de componentes (normalmente superficies metálicas) que interactúan constantemente y que tienen movimiento. La tribología es útil para la selección correcta de materiales involucrados en procesos de manufactura, ya que

de la lubricación, la fricción dependerá el desgaste de la pieza y la aplicación de determinado material en determinado proceso o etapa del mismo.

Un ejemplo del impacto económico del desgaste en aplicaciones diarias es el hecho de que se calcula que cada año (tan sólo en Estados Unidos) el costo total de reemplazo de partes desgastadas es mayor a \$100 mil millones de dólares al año. [1]

Al examinar con cuidado la superficie de una pieza de trabajo metálica, se pueden observar diferentes capas (Ver **Figura 2**), de las cuales se conforma:

- Substrato metálico. Es el metal interior volumen. La estructura interna dependerá de la composición y procesamiento del mismo. [1]
- Capa de endurecimiento por trabajo. Es la que con anterioridad ya ha sido deformada plásticamente por el proceso de manufactura. La estructura superficial de esta capa depende de diversos factores tales como el método de procesamiento en la manufactura o el deslizamiento por fricción a la que es sometida. Por ejemplo, si ésta se produce por maquinado deficiente, la capa tenderá a ser un tanto gruesa y presentar esfuerzos residuales. [1]
- Capa de óxido. Este óxido se presenta sobre la capa endurecida a menos que se mantenga en un ambiente inerte o se esté trabajando con un metal noble (como el oro o platino). Por lo común, el óxido en una superficie metálica es mucho más duro que el metal base, de ahí que sea más abrasivo. [1]
- Capa de gas y humedad. En condiciones ambientales normales, las capas superficiales de óxido se cubren generalmente de capas adsorbidas de gas y humedad. [1]
- Contaminantes. La capa externa de la superficie por lo general suele cubrirse de suciedad, polvo, grasa, residuos de lubricante, de compuestos para la limpieza, etc. [1]

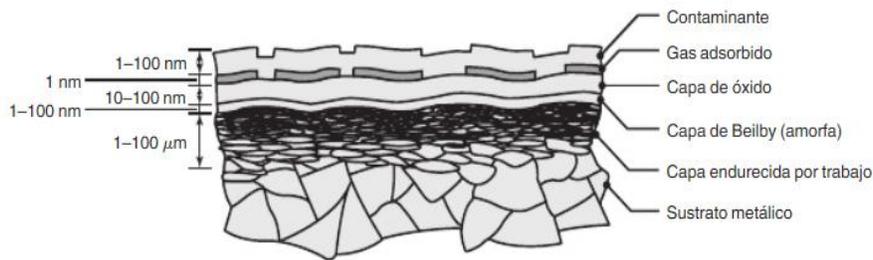


Figura 2. Esquema de sección transversal de la estructura superficial de los metales.[1]

La conformación en capas de un material tiene efectos importantes en el momento de la selección del mismo y en los diferentes tratamientos que se pueden aplicar para mejorar diversas características ya sean mecánicas, físicas o químicas. Por lo general es en esta parte donde se encuentran los estudios tribológicos al hallarse consecuencias importantes en las condiciones de fricción, de desgaste y lubricación.

Por ejemplo, en el presente estudio se trabaja con un metal aluminio. Las capas de óxido, en los metales dependen de la conformación química del mismo y de la electronegatividad de las capas de valencia. Además de que dichos óxidos y los compuestos que se pueden formar dependerán del peso atómico de los elementos de aleación que conforman al metal. El aluminio comercial, por lo general está conformado de alumina (Al_2O_3). Esto crea una capa densa, amorfa (sin estructura cristalina) de material. Sobre esta se halla una capa gruesa, porosa e hidratada de óxido de aluminio. Esto se debe a su formación química de en donde el oxígeno de la aleación permite la formación de óxidos al ser más electronegativo que el propio aluminio.

1.2. Desgaste por fatiga.

El desgaste por fatiga (también llamado fatiga superficial o desgaste por fracturas superficiales) se produce cuando la superficie de un material se somete a cargas cíclicas; un ejemplo de esto es el contacto rotatorio en los rodamientos. [1]

El desgaste puede ser visible al desprenderse material de la superficie. Existen dos tipos comunes de esto: la delaminación o separación de las diversas capas del material metálico y la picadura que se refiere a una corrosión localizada en la cual se producen pequeños agujeros en la superficie del mismo.

Hay diversas técnicas que pueden ayudar a reducir el desgaste por fatiga. Algunas de ellas son las siguientes [1]

- La reducción de los esfuerzos de contacto
- La reducción de los ciclos térmicos
- La mejora de la calidad de los materiales, retirando impurezas, inclusiones y muchas otras imperfecciones que pueden actuar como puntos locales de iniciación de grietas.
- Inicio de agrietamientos debido a defectos superficiales como rugosidad, raspaduras, costuras y zonas afectadas por el calor, que pueden producir debilitamiento, fallas prematuras de la parte, como fatiga total (Ver **Figura 3**)
- Conductividad térmica y eléctrica de los cuerpos en contacto. Por ejemplo, superficies rugosas tienen resistencias térmica y eléctrica superiores a las de las superficies lisas. (pp 1037-1039)

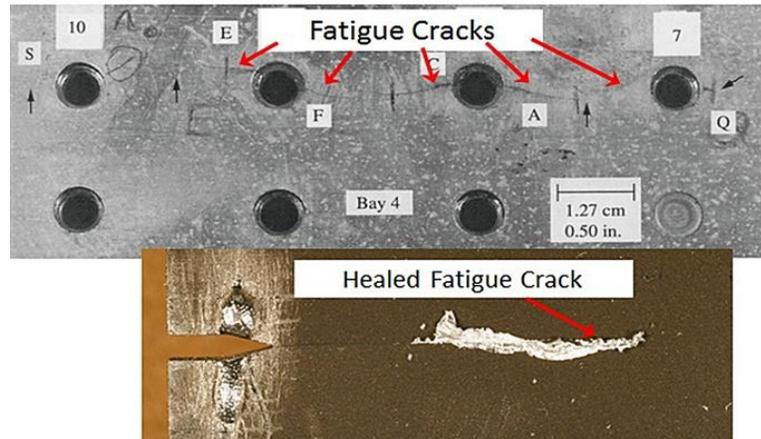


Figura 3. Ejemplos de fatiga en la industria aeronáutica

1.3. Ensayo de fatiga.

La fatiga en un material, que es la respuesta que ofrece el mismo a la aplicación de cargas cíclicas puede medirse a través de una prueba que se llama ensayo de fatiga. Este tipo de ensayos permite encontrar los valores óptimos que previenen la falla de un componente.

En una aplicación cualquiera, un material puede sometido a esfuerzos constantes de tensión, compresión o una combinación de ambos. Un ejemplo de ello son los trenes de aterrizaje de la industria aeroespacial, en donde este tipo de pruebas es de vital importancia para realizar los cálculos de la vida útil del material y diseñar la geometría adecuada de manera en que no se cruce el esfuerzo límite de

cedencia del material base, que en el caso de falla por fatiga debe de ser 50% por debajo del límite del material.

Un método común para medir la resistencia a la fatiga de una material es el ensayo de la viga en voladizo rotatoria. Uno de los extremos de la probeta cilíndrica maquinada se sujeta al eje de un motor. En el extremo opuesto se suspende un peso. Inicialmente la probeta tiene una fuerza de tensión actuando sobre la superficie superior, en tanto que la superficie inferior esta sometida a compresión. Cuando la probeta gira 90°, los puntos que originalmente estaban bajo tensión y compresión no están sujetos a esfuerzo alguno. Después de media revolución 180° el material originalmente bajo tensión está ahora bajo compresión. Por lo que al esfuerzo en cualquier punto pasa a través de un ciclo senoidal completo desde un esfuerzo máximo de tensión hasta un esfuerzo máximo de compresión. [2]

Después de un número suficiente de ciclos, la probeta puede fallar. Generalmente se prueba una serie de muestras diferentes a diferentes esfuerzos.

Cabe destacar que la resistencia a la fatiga es necesaria al diseñar con materiales como el aluminio y puede omitirse con los polímeros ya que estos no tienen esfuerzo límite para fatiga.

Velocidad de crecimiento de grietas.

En muchos casos, un componente pudiera no estar en peligro de falla, incluso con una grieta presente. Para estimar el tiempo de falla, resulta importante la velocidad de propagación de grietas. La siguiente ecuación muestra la velocidad de crecimiento de grietas en función del rango del factor de intensidad de esfuerzo ΔK , que caracteriza la geometría de la grieta y la amplitud del esfuerzo. [2]

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^n$$

Finalmente, cuando ΔK es más alta, las grietas crecerán de una manera rápida e inestable hasta que ocurra la fractura.

La rapidez de crecimiento de grieta se incrementa conforme ésta aumenta de tamaño según lo establece el factor de intensidad de la siguiente ecuación:

$$\Delta K = K_{max} - K_{min} = f\sigma\sqrt{\pi a} - f\sigma_{min}\sqrt{\pi a} = f\Delta\sigma\sqrt{\pi a}$$

Si no cambia el esfuerzo cíclico $\sigma\Delta$, entonces cuando la longitud de a de la grieta aumenta ΔK y la velocidad de crecimiento de la grieta da/dN se incrementan. [2]

2. *Lógica Difusa*

Las ciencias computacionales están siempre en constante desarrollo. Desde la creación de la máquina analítica en 1837 por Charles Babbage hasta los dispositivos actuales como smartphones y tablets hay una necesidad de realizar un análisis de datos a mayor velocidad y con mayor precisión. Es por ello que el desarrollo de nuevas técnicas computacionales ha sido prioridad en diversos campos de la sociedad. La ingeniería, no está exenta de aprovechar dichas tecnologías para integrarlas en la industria, tales como la impresión 3D o la recolección de datos e tiempo real.

Una de esas técnicas nuevas que se ha venido extendiendo es la de Computación Suave o “Soft Computing”, por su concepto en inglés. Esto se debe a que uno de los objetivos de dicha técnica es lograr implementar la Inteligencia Artificial en las máquinas, como se puede apreciar en dispositivos actuales de uso cotidiano que tienen programas sofisticados que permiten la interacción con el usuario de una manera intuitiva y amigable. Las máquinas actuales “aprenden” de los datos que volcamos en ellas, como preferencias y otorgan soluciones específicas a sus usuarios.

Las metodologías de la Inteligencia Artificial incluyen, por ejemplo, la lógica borrosa, sistemas expertos, aprendizaje, sistemas de planificación, algoritmos de búsqueda, sistemas híbridos, diagnóstico de fallos y reconfiguración, autómatas, redes de Petri, redes neuronales, computación evolutiva, etc. [3].(pp6-7) Todas ellas enfocadas a la resolución de diversos problemas, e imitan cada una funcionalidades de los seres vivos.

En el caso de la Lógica Difusa(o Fuzzy, por su nombre en inglés) esta lleva la imprecisión del lenguaje a un entorno computacional usando un razonamiento que se basa en palabras. Al usar reglas que se asemejan más al lenguaje humano que al computacional permiten ser una herramienta eficaz para el diagnóstico y la correcta toma de decisiones.

La lógica difusa, fuzzy o borrosa, es una forma matemática de representar la imprecisión inherente en el lenguaje natural, introducida por Lofti A. Zadeh en 1965. Es una generalización de la lógica clásica: las variables toman valores lingüísticos de verdad. La pertenencia a los conjuntos borrosos es gradual. Implementa la forma de razonar propia del sentido común. [3]Es usada para

sintetizar el protocolo de control lingüístico de un operador experto en un proceso.
[4]

Una de las características esenciales de la lógica borrosa es que permite utilizar el lenguaje ordinario como lenguaje de descripción de un ordenador, incorporando así el conocimiento de un experto en una tarea determinada. Introduce la imprecisión y la subjetividad propia de la actividad humana en un procedimiento automatizado. Permite transformar en algoritmos de ordenador el conocimiento de un experto humano en la realización de una tarea, expresado en términos lingüísticos.

La lógica borrosa o difusa es actualmente una de las técnicas de la IA (Inteligencia Artificial) más utilizadas en aplicaciones prácticas, dentro del ámbito industrial y empresarial, en tareas como clasificación, reconocimiento de patrones, control, etc.

Algunas de sus características que han marcado su expansión son [3]:

- Herramienta muy potente. Unas pocas reglas permiten una gran potencia de cálculo.
- Utilización extendida. Tanto en diversos países como en muy distintos ámbitos y aplicaciones.
- Campo abierto a la investigación. Como avalan miles de artículos anuales en revistas y congresos internacionales.

Es la flexibilidad de la lógica borrosa que es esencialmente gradual (se puede tomar un valor cualquiera dentro de un rango definido) lo que la convierte en una alternativa al uso de la lógica clásica que se basa en elementos absolutistas como verdadero o falso, encendido o apagado 0 y 1. Además de que está presente la teoría de probabilidad y la lógica probabilística.

Es por eso que se menciona que cualquier sistema puede convertirse en un sistema borroso, los valores absolutos son límites a un razonamiento aproximados y determinada sentencia puede contener cierto grado de verdad, es decir la probabilidad de que dicha sentencia sea verdadera.

Entre otras características que diferencian a la lógica borrosa de la lógica tradicional cabe también destacar [3] (p75-78):

- ❖ El grado de verdad de una aseveración en la lógica bivalente toma un valor entre un conjunto infinito de valores: verdadero o falso; en la lógica borrosa el grado de verdad es un subconjunto que se puede expresar como verdadero, muy verdadero, bastante falso, no muy falso, etc.
- ❖ En la lógica clásica los predicados son concretos mientras que en la lógica borrosa pueden ser tanto nítidos como borrosos.

- ❖ La lógica polivalente (y la bivalente como caso particular) admite sólo dos cuantificadores: el universal “para todo”, \forall , y el existencial “existe un... tal que”, \exists . La lógica borrosa admite además una gran variedad de cuantificadores borrosos, como “muchos”, “pocos”, “algunos”, “la mayoría”, etc. Estos se pueden interpretar como números borrosos que dan una caracterización imprecisa del cardinal de un conjunto borroso o clásico. Desde esta perspectiva, un cuantificador borroso se puede considerar como un predicado borroso de segundo orden.
- ❖ A diferencia de la lógica de predicados de primer orden, donde el único modificador que existe es la negación “no”, la lógica borrosa incorpora una gran variedad de modificadores de predicados como “muy”, “algo”, “no”, “casi”, etc. Asignando operaciones para definir cada uno de estos modificadores se consigue realizar cálculos con las variables lingüísticas, propias de la lógica borrosa.
- ❖ Este tipo de razonamiento aproximado permite distintas interpretaciones de las sentencias “casi cierta”, “muy falsa”, “poco verdadera”, etc.

Es la cercanía de la lógica difusa con el lenguaje humano lo que la convierte en una herramienta extremadamente poderosa en el momento de crear una interfaz de usuario, ya que permite establecer una relación más estrecha con el lenguaje de máquina que normalmente se utiliza y obtener valores de gran precisión.

A continuación se presentan las partes por las que está compuesto un sistema de inferencia difuso y como estas permiten la interacción entre elementos de conjuntos.

2.1. Funciones de membresía y sus partes básicas.

Para la representación de los grados de pertenencia de cada uno de los elementos que conforman el conjunto difuso, lo más natural es extraer los datos de los fenómenos que se van a representar y con ellos definir la forma de la función de membresía. De otra manera existen metodologías que permiten asignar grados de membresía a cada uno de los elementos del conjunto.

Existen funciones de membresía convencionales y no convencionales que permiten realizar un mapeo de un universo nítido a un universo difuso (grados de membresía entre 0 y 1). [5] Cada una de ellas son utilizadas para expresar un

diferente universo de datos, pero todas ellas tiene en común las partes que las conforman, como puede verse en la **Figura 4**.

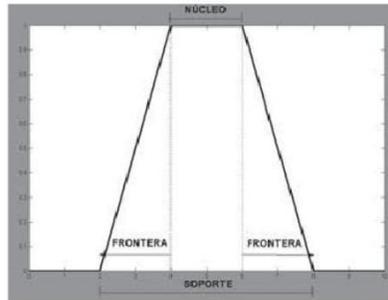


Figura 4. Partes de una función de membresía.[5]

Función triangular. La función triangular es muy adecuada para definir situaciones en las que se tiene un valor óptimo central, el cual se va perdiendo conforme uno se aleja de él. [5]

Característica matemática:

$$f(x) = \begin{cases} \alpha \leq x \leq \beta \rightarrow \frac{x-\alpha}{\beta-\alpha} \\ \beta \leq x \leq \delta \rightarrow \frac{x-\delta}{\beta-\delta} \end{cases}$$

Función trapecio (o pi). Una generalización de la función triangular es la función trapecio o función Pi. En el caso de esta función de membresía, so sólo se tiene un valor central para el cual al pertenencia es unitaria, sino toda una franja que varía su ancho, dependiendo del fenómeno observado. La forma de esta función es muy utilizada, ya que como se menciono se emplea cuando hay un rango de valores óptimos, alrededor de los cuales las condiciones no son adecuadas. [5] (pp49-56)

Característica matemática:

$$f(x) = \begin{cases} \alpha \leq x \leq \beta \rightarrow \frac{x-\alpha}{\beta-\alpha} \\ \beta \leq x \leq \varphi \rightarrow 1 \\ \varphi \leq x \leq \delta \rightarrow \frac{x-\varphi}{\delta-\varphi} \\ 0 \text{ de otra manera} \end{cases}$$

2.2. Base de conocimiento

La base de conocimientos es el cúmulo de datos con los cuales se va a crear el sistema de inferencia, tanto las entradas (información de la aplicación) y salidas del sistema (metas del controlador) así como las reglas lingüísticas que controlaran la mismo. La base de reglas emplea enunciados o proposiciones que usan los expertos en el área del sistema que se está estableciendo y permiten el control del mismo.

Un algoritmo de control difuso debe tener la capacidad de la unidad, o unificación de datos, que establece que debe existir una acción de control a cada estado del proceso del sistema. Este algoritmo permite establecer las bases de la definición de los conjuntos difusos.

Hay varios modos de obtener las reglas difusas de control, en las cuales los expertos trabajan conjuntamente con los diversos conocimientos de ingeniería y los operadores para relacionar las variables de estado con las variables de control y las consecuencias de los mismos (o salida del sistema).

2.3. Interfaz de difusificación

Es la que se encarga de convertir un rango de valores nítidos (mapeo) a un rango de valores difusos. Es decir, toma valores del mundo real, crea un rango de los mismos y les otorga un valor difuso (rango de 0 a 1). Por lo tanto, la desdifusificación es la herramienta que permite controlar esos datos difusos y darle una acción de control u obtener salida de los mismos.

Uno de los métodos para encontrar el valor nítido es el siguiente [5]:

Método de centro de área o gravedad. El método del centro de área o centro de gravedad se puede representar en forma discreta:

$$Salida = \frac{\sum_{x=a}^b \mu(x) \cdot x}{\sum_{x=a}^b my(x)}$$

O de forma continua:

$$Salida = \frac{\int_a^b \mu(x) \cdot x dx}{\int_a^b \mu(x) \cdot dx}$$

Este método se utiliza para obtener el valor real de la salida. Su metodología es sencilla: corta la función de membresía al grado de la membresía respectiva, es decir segmenta las funciones de membresía generando en cada función dos áreas. El área inferior que se forma es la que se toma para hacer el cálculo. Se sobreponen todas estas áreas y se saca el centroide de la superposición, el cual nos dice la salida real del sistema. [5] (pp 73-74)

3. Diseño Robusto.

Para entender un poco el concepto de Diseño robusto de experimentos se tiene que entender cómo es que está conformado un sistema o que es un sistema.

Un sistema es un conjunto de elementos que se relacionan entre sí con la finalidad de cumplir un propósito en específico. Por ejemplo, un sistema de audio permite recibir impulsos eléctricos y convertirlos en ondas sonoras que viajan a través de amplificadores para que las personas puedan recibir los sonidos.

Así bien, hay diferentes tipos de sistemas. En el entorno industrial existen los llamados sistemas de control. Estos sistemas de control pueden ser de dos tipos, de lazo abierto o lazo cerrado. [6] En un sistema de lazo abierto la entrada se elige conforme a la experiencia y se obtiene una salida esperada, sin que esta se vea afectada por condiciones externas. En un sistema de lazo cerrado, por otro lado, la salida se obtiene por medio de una señal de control o retroalimentación, que permite tener una respuesta, en muchas aplicaciones en tiempo real de manera de que la salida se ajuste a los cambios del medio.

Con el afán de mejorar la producción y tener una señal precisa de control se diseñaron los *factores de señal*, que es un dispositivo que permite cambiar el nivel de operación de acuerdo a los deseos del usuario. Estos factores de señal o control son de vital importancia para el entender el diseño robusto.

El Diseño Robusto es un método creado por Genichi Taguchi, en la década de los 50's enfocado en la ingeniería de calidad. Su objetivo es lograr productos y procesos robustos frente a causas de variabilidad (ruidos), es decir que sean viables y de funcionamiento consistente ante una diversa variedad de factores no controlables. Estos factores no controlables desvían a los productos de sus valores óptimos y aumentan los costos de producción la afectar la calidad del mismo.

Para aplicar el diseño robusto es necesario tener una clasificación más detallada del tipo de factores controlables que pueden influenciar el proceso, en cuanto a su efecto sobre la media y la variabilidad de la respuesta de interés. Se distinguen cuatro tipos de factores, a saber [7]:

- I. Afecta la media y la variabilidad
- II. Afecta solo la variabilidad
- III. Afecta sólo la media
- IV. No afecta la media ni la variabilidad.

Esta clasificación de factores permite saber en un sistema cuales son los factores más influyentes en el sistema, y se pueden determinar cuáles serán los que generen señales deseadas o señales no deseadas en el mismo. Esto es lo que permite generar el estudio de robustez del sistema.

3.1. Tipos de estudios de robustez.

Los estudios de robustez se clasifican utilizando como criterios al tipo de variable de respuesta y la existencia o ausencia de factores de señal. Una variable de respuesta puede ser de tres tipos:

~ *Entre más pequeña mejor.* Son variables o características de calidad cuya única exigencia es que no excedan cierto valor máximo tolerado o especificado superior (ES), y entre más pequeño sea su valor mejor. Por ejemplo, porcentaje de impurezas en una sustancia.

~ *Entre más grande mejor.* Son variables de características de calidad a las que se les exige que sean mayores que un valor mínimo o que cierta especificación inferior (EI), y entre más grande sea el valor de la variables es mejor. Por ejemplo, resistencia de una pieza de plástico.

~ *Valor nominal es lo mejor.* Variables que deben tener un valor específico y que, por lo tanto, no deben ser menores que una especificación inferior(EI), pero tampoco mayores que una superior(ES).

En cuanto al factor señal, se dice que el estudio es estático si no hay factor señal y es dinámico en el otro caso. [7]

CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES

Los antecedentes del proyecto permiten vislumbrar aquellos conceptos que sustentan el presente trabajo. Ello permite tener un acercamiento más adecuado a los fundamentos de los elementos del sistema. Cabe destacar que un sistema está comprendido por diversos elementos ya sea de índole física, mecánica, computacional, matemática, etc., dependiendo de la naturaleza del sistema en sí. Es esa naturaleza la que otorga la clasificación de las señales que emite el mismo, o la información que se puede recolectar o analizar.

Así mismo, este capítulo permite entender los trabajos predecesores al presente, ya sean las investigaciones previas y los campos en los que se puede aplicar el presente trabajo. Es por eso que se asume que para entender el presente se deben entender diversas áreas de conocimiento que es necesario aplicar por la compleja naturaleza del mismo. Ya sea aquellas que forman parte de la estadística, como el diseño de experimentos o las que forman parte de los denominado Ingeniería Computacional, entre muchas otras

1. Granallado o shot peening

Cabe destacar que uno de los principales objetivos en la industria es producir componentes de máquinas resistentes al desgaste y a la fatiga. Es por ello que después del proceso de manufactura (que es en el cual la materia prima o material se transforma en un componente cualquiera) se contempla un proceso de tratamiento, ya sea físico, químico, mecánico, superficial, etc. Para mejorar ciertas propiedades y características. Dentro de esa clasificación, los tratamientos superficiales se efectúan para [1]:

- ✓ Mejorar la resistencia al desgaste, erosión y a la penetración
- ✓ Controlar la fricción
- ✓ Reducir la adhesión
- ✓ Mejorar la lubricación
- ✓ Mejorar la resistencia a la corrosión y a la oxidación
- ✓ Mejorar la resistencia a la fatiga
- ✓ Reconstruir las superficies
- ✓ Modificar texturas superficiales
- ✓ Proporcionar rasgos decorativos

Dentro de ese proceso de mejoramiento de características, existen numerosas técnicas para lograr el cometido, dependiendo la naturaleza del material o componente (metálicos, no metálicos y cerámicos) y dependiendo de las características a modificar. Dentro de los llamados tratamientos superficiales o técnicas de tratamiento superficial (que son aquellos que solo cambian la capa superficial de material) existen [1]:

- ✓ Deformación plástica de la superficie de la pieza de trabajo
- ✓ Reacciones químicas
- ✓ Medios térmicos
- ✓ Deposición
- ✓ Implantación
- ✓ Recubrimientos orgánicos y pinturas.

El shot peening o granallado pertenece a una técnica de tratamiento superficial llamada tratamiento mecánico, que involucra la deformación plástica de la

superficie. (Ver **Figura 5**) Entre los tratamientos mecánicos más comunes están el impacto con chorro láser, el bruñido, revestimiento mecánico, por citar algunos.

En el granallado, la superficie de la pieza de trabajo recibe impactos repetidos de una gran cantidad de granallas (bolas pequeñas o shot) de acero fundido, vidrio o cerámico, que producen penetraciones traslapadas en ella.

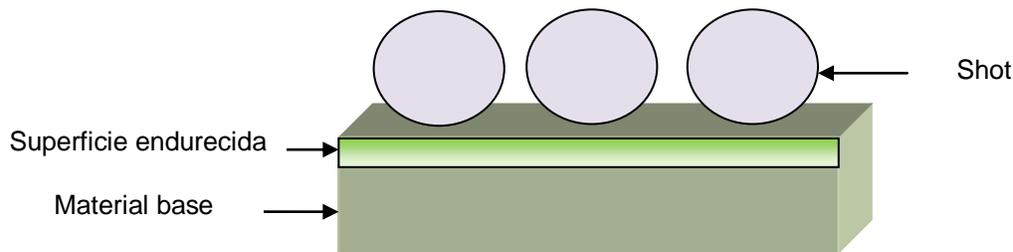


Figura 5. Proceso de shot peening

Esta acción causa deformación plástica de la superficie a profundidades de hasta 1.25mm(0.05 pulgada)utilizando tamaños de granalla que van de 0.125mm a 5mm(0.005 a 0.2 pulgada) de diámetro [1]. Debido a que la deformación plástica no es uniforme a lo largo del espesor de la parte, el granallado origina esfuerzos residuales comprensivos sobre la superficie(Ver **Figura 7**), mejorando así la vida a la fatiga del componente al retardar el inicio de grietas por fatiga(Ver **Figura 6**). A menos que los parámetros del proceso se controlen en forma adecuada, la deformación plástica de la superficie puede ser tan severa que podría dañarla. Es posible reducir el grado de deformación mediante el granallado por gravedad, que comprende tamaños más grandes de granalla, aunque con menos impactos sobre la superficie de la pieza de trabajo.

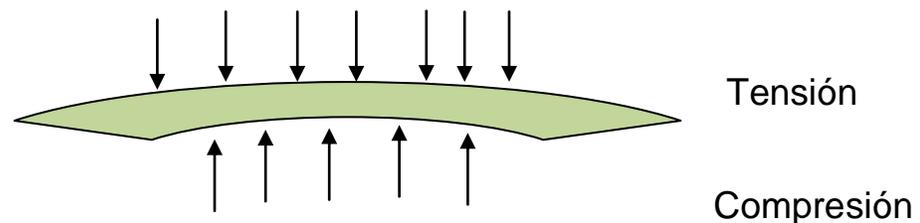


Figura 6. Esfuerzos aplicados en componente sin tratamiento

El granallado se utiliza ampliamente sobre flechas, engranes, resortes, equipo de perforación de pozos petroleros y partes de motores de propulsión (como los álabes para turbinas y compresores). Sin embargo, si estas partes se someten a altas temperaturas, el esfuerzo residual empieza a relajarse (relajación térmica) y

sus efectos benéficos disminuyen en gran medida. Un ejemplo son los álabes de las turbinas de gas a sus temperaturas de operación. [1](pp1060)

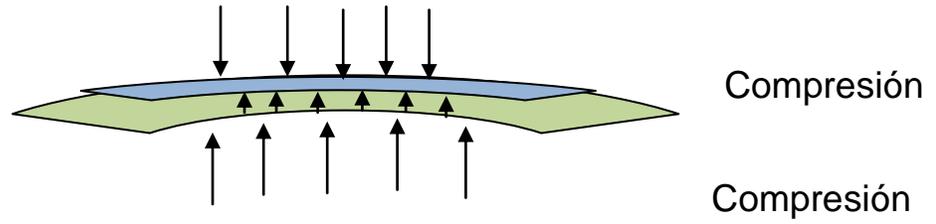


Figura 7. Esfuerzos aplicados en un componente con tratamiento de shot peening

2.Método Taguchi

El método Taguchi es en el que se establece varios conceptos de calidad. Para Taguchi, la calidad de un producto es algo que se mide en términos de tener la menor cantidad de pérdidas en el mismo. Desde el proceso de fabricación hasta la vida útil de mismo. Por eso el diseño robusto también infiere en los costos de calidad.

Al método Taguchi, también se le conoce como el método de los parámetros es decir, los factores o variables del proceso. Estos se pueden ver en la **Figura 8**.

La metodología Taguchi establece tres metas [7]:

1. Diseños robustos (insensibles) ante el medio ambiente para productos y procesos
2. Diseño y desarrollo de productos, de modo que sean robustos a la variación de componentes.
3. Minimización de las variaciones con respecto a un valor objetivo.

Estas tres metas se concretan en tres etapas del desarrollo de un producto [8]:

1. Diseño del sistema. El ingeniero utiliza principios científicos y de ingeniería para determinar la configuración básica.
2. Diseño de parámetros. Se determinan los valores específicos para los parámetros des sistema, minimizando la variabilidad aportada por la variables de ruido.
3. Diseño de tolerancias. Se determinan las mejores tolerancias para los parámetros.

Un concepto y herramienta clave en el diseño de parámetros es la *función de pérdida*, la cual establece una medida financiera del impacto negativo a la sociedad(consumidor, productor, etc.) por el desempeño de un producto cuando se desvía de un valor designado como meta ($t = target$). Esto implica que la característica de calidad de un producto, y , debe estar cada vez más cerca de su valor ideal, t , y todo lo que se desvíe del ideal es considerado como una pérdida para la sociedad. La función de pérdida de Taguchi, se define como:

$$L(y) = k(y - t)^2$$

Donde k es una constante que depende de tolerancias y de los costos de reparación del producto.

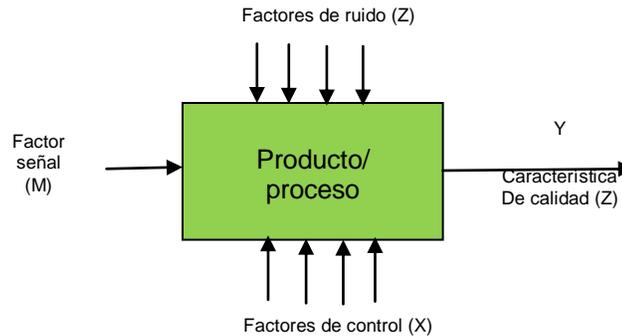


Figura 8.Diagrama de los diferentes tipos de factores en diseño robusto [7]

Arreglos ortogonales. Es una matriz de diseño con esta propiedad, es decir sus columnas son linealmente independientes, lo cual se tiene si la multiplicación de dos columnas cualesquiera es igual a cero), misma que también poseen los diseños factoriales clásicos. (Ver **Tabla 1**) Estos arreglos son diseños factoriales completos, fraccionados o mixtos, dependiendo del número de factores del caso a estudiar.

Tabla 1. Ejemplo de Arreglo ortogonal L8 [8]

Arreglo L ₈ (fracción 2 ⁷⁻⁴)							
Núm. de corrida	Número de columna						
	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

2 factores: columnas 1,2
3 factores: columnas 1,2,4,
4 factores: columnas 1,2,4,7
5 factores: columnas 1,2,4,7,6
6 factores: columnas 1,2,4,7,6,5,
7 factores: las siete columnas

En un arreglo ortogonal, tanto los factores principales, como los factores de control tienen el mismo peso o ponderación. Con eso se asegura que el efecto en cada uno de los parámetros sea el mismo.

Un arreglo ortogonal se denomina como $L_a b(c)$ en donde la “a” representa el número de corridas experimentales, b es el número de niveles por cada factor y c es el número de factores. Por ejemplo, un $L_8 2(7)$ tendrá 8 corridas experimentales, dos niveles en cada factor y 7 factores. [9]

Diseño interno y externo. Sirve para determinar condiciones de operación robustas a uno o varios factores de ruido. Consiste en probar todas las combinaciones de los factores de ruido en cada combinación de los factores de control. [8]

Razón de señal/ruido. Para el análisis del diseño con arreglo interno y externo, Taguchi propone un estadístico desempeño, al cual le llama cociente de razón señal/ruido(signal to noise ratio)(Ver **Tabla 2**), que calcula se calcula en cada combinación de los factores controlables y se analiza como cualquier variables de respuesta(Ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). La combinación más robusta de los niveles de los factores controlables es aquella que maximiza el estadístico razón señal/ruido. [7]

Tabla 2. Razón de señal/ ruido para diferentes tipos de variables de respuesta [8]

Tipo de característica	Razón de señal/ruido(S/R)
Mientras más pequeña es mejor	$-10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i^2 \right]$
Mientras más grande es mejor	$-10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{Y_i^2} \right]$
Su valor nominal es lo mejor (tipo I)	$10 \log \left[\frac{Y^2}{S^2} \right]$
Su valor nominal es lo mejor (tipo II)	$-10 \log[S^2]$
Proporción de defectuosos	$-10 \log \left[\frac{p}{(1-p)} \right]$

3. Métodos de inferencia en sistemas difusos

La lógica borrosa parte de la idea de aterrizar el lenguaje humano en el lenguaje matemático, para ello se vale de un concepto fundamental de matemáticas, llamado “teoría de conjuntos” (Ver **Figura 9**). La teoría de conjuntos es una rama de la lógica matemática que permite crear relaciones entre cosas, que pasan a tomar el nombre de “objetos”. En entorno real, hay una cantidad de situaciones subjetivas que impiden en ocasiones determinar si un objeto o elemento pertenece o no a un conjunto dado.

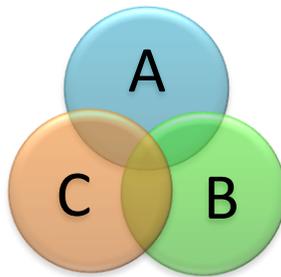


Figura 9. Representación de conjuntos. Diagrama de Venn

Los conjuntos en donde es difícil determinar la pertenencia de sus elementos reciben el nombre de conjuntos borrosos. Es decir, un conjunto borroso es en el cual los límites de sus elementos están definidos vagamente y la pertenencia se da en forma de grado, no de un absoluto abrupto.

Es de esta noción de pertenencia, que se establece la función característica o función de pertenencia, μ , que nos dice si un elemento determinado pertenece a un conjunto (en este caso valdrá 1) o si no pertenece, en cuyo caso valdrá 0 [3]. Este concepto de función de pertenencia puede generalizarse de la siguiente manera: un elemento puede pertenecer parcialmente a un conjunto si el valor de este varía de forma continua en un rango.

Cuanto mayor sea el valor de la función de pertenencia, mayor será el grado de pertenencia del elemento al conjunto en cuestión. Cada uno de los elementos predicables de esos conjuntos pertenece con un cierto grado a un conjunto borroso. No tiene un sentido probabilístico, como en otras lógicas, sino más bien representa un grado de compatibilidad con un cierto predicado o un grado de posibilidad de que éste sea cierto. [3]

Una vez que se han establecido las bases de las teorías de conjuntos se puede comprender con más facilidad como es que se pueden formar las sentencias del conjunto, las mismas que arman las reglas del sistema de inferencia difuso.

Reglas difusas

Una regla de un conjunto cualquiera es la oración o sentencia que rige los límites del mismo. En un conjunto difuso, las reglas tienen una connotación especial, ya que de estas dependerá si cierto elemento del mismo pertenece o no al sistema. Toman la forma condicional *if-then* (*si-entonces*), llamados “antecedente” y “consecuente”. En estas sentencias, los valores y las variables que le acompañan son conjuntos borrosos o difusos y por lo mismo se obtienen a partir de los resultados lingüísticos de asociación a un campo de conjuntos semánticos. Recordando que los campos semánticos o la semántica es la encargada de interpretación de signos(o símbolos) lingüísticos (tales como palabras, expresiones etc.)

Por lo tanto, estas reglas, enunciadas en un lenguaje natural, incorporan el conocimiento de un experto en la tarea. Su aplicación es inmediata a situaciones reales. Representan, mediante instrucciones que se pueden programar en un ordenador el comportamiento de un experto u operador humano en esas circunstancias.

Existe un número de reglas que hacen una base de conocimiento consistente, es decir, que para cualquier combinación posible de valores de antecedentes se derive en una conclusión depende lógicamente del número de variables lingüísticas que describan nuestro sistema y el número de conjuntos fuzzy o etiquetas que hayamos asociado a cada una de ellas. En general, para n variables y m etiquetas el número de reglas R es [3]:

$$R = m^n$$

Cada una de estas reglas corresponde una implicación borrosa, es decir, se puede representar como una relación borrosa entre los antecedentes y el consecuente.

En su formulación más simple, las reglas pueden considerarse como una versión reducida de la lógica de predicados. Por un lado la lógica de predicados tiene una proposición por cada elemento del conjunto, mientras que una regla puede manejar varios elementos del conjunto y asignarles un grado de pertenencia en la inferencia difusa. La principal diferencia entre ambos métodos es que las reglas

reducen la expresividad y la capacidad de inferencia con el fin de lograr una mayor eficiencia. La limitación en la expresividad consiste en la imposibilidad, o al menos en restricciones, a la hora de utilizar cuantificadores existenciales. De aquí se deriva el concepto “rango de pertenencia”

Una ventaja de las reglas, además de la eficiencia, es la capacidad de tratar la incertidumbre. Las reglas superan las limitaciones de la lógica clásica y se acercan a las lógicas modales, el razonamiento no monótono y el razonamiento aproximado. [3]

Agrupamiento difuso

En 1981 Bezdek [10] menciona que un factor importante en el análisis de datos de conjuntos que se pretenden seas difusos es la estructura, que es la manera en que la información en una base de datos está relacionada y puede ser identificada por las relaciones entre las variables del proceso. Estas relaciones pueden ser causales(asociaciones no invertibles) o simplemente conectivas(asociaciones invertibles). Esas representaciones estructurales dependen de los datos, el método de búsqueda y el modelo usado. En términos de información, los datos son los que la conforman, la búsqueda la organiza y la estructura la representa. Diferentes modelos proporcionan diferentes tamaños y tipos de información concernientes a la información que representan.

Un agrupamiento o cluster (Ver **Figura 10**) se refiere a la identificación de “c” subclases en universo X con n muestras de datos, siendo $2 \leq c < n$, ya que $c=1$ implica que todos los datos son de una sola clase y $c=n$ implica que cada muestra es un cluster por sí misma. Existen dos tipos de particiones de datos: duros/nítidos o suaves/ difusos.

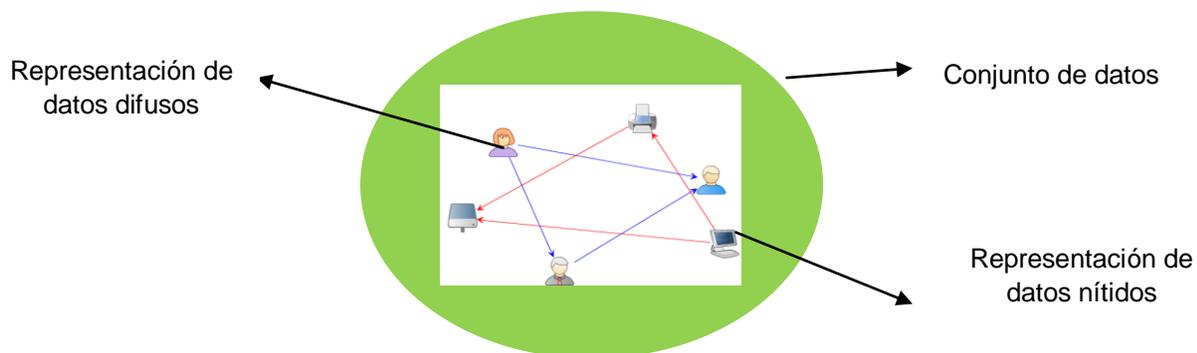


Figura 10.Representación de un cluster de información

Si es posible medir la distancia entre todos los pares de observación de un espacio, es posible esperar que la distancia entre los puntos del mismo cluster sea

considerablemente menor que la distancia entre los puntos de distintos clusters. Uno de los métodos que define particiones óptimas a través de una función de criterio global que mide cuáles particiones candidato optimizan una suma de errores al cuadrado entre puntos y centros de partición de un espacio. [5]

3.1. Inferencia difusa

Una inferencia difusa es el proceso de realizar el mapeo de una entrada a una salida usando lógica difusa. El mapeo provee de las bases por las cuales las decisiones se toman o los patrones son desechados. El proceso de inferencia difusa involucra a todas piezas que componen las funciones de membresía, los operadores lógicos y las reglas If-then. [11]

El proceso de Inferencia Difusa (Ver **Figura 11**) consta de tres fases para obtener el resultado deseado:

Fase 1.(Fusificación)

- Fusificación de las variables de entrada. Se basa en un proceso donde las variables tienen un grado de incertidumbre metalingüístico. Por lo tanto el rango de valores se puede clasificar en conjuntos difusos (bajo, medio, alta). Este proceso consiste en pasar dichos valores a un rango de pertenencia entre 0 y 1. Así, se determina el grado de pertenencia a los conjuntos difusos a partir de las funciones de membresía. [5]

Fase 2.(Inferencia)

- Aplicación de un operador difuso en los antecedentes (“Y” o “O”). Después de que las entradas son fusificadas, se conoce el grado en el cual cada parte de los antecedentes se satisface por cada regla. Si el antecedente de una regla dada tiene más de una parte un operador es aplicado para obtener un número que represente el resultado de ese antecedente para esa regla. Ese número es aplicado a la función de salida a su vez. La entrada de un operador difuso es dos o más valores de membresía de variables de entrada fusificadas. La salida es un único valor verdadero.
- Implicación del antecedente a la consecuencia. Antes de aplicar un método de inferencia, se debe determinar el peso de cada regla. Cada regla tiene un peso (un número entre 0 y 1), que es aplicado al número otorgado por el

antecedente. Generalmente, el peso es 1 y eso no tiene efecto alguno en todo el proceso de implicación.

Después de que el peso apropiado ha sido designado a cada regla, el método de inferencia es implementado. La consecuencia es un conjunto difuso representado por una función de membresía.

- Agregación de las consecuencias a través de las reglas. Ya que las decisiones son basadas en la prueba de todas las reglas en un Sistema de Lógica Difusa, las reglas se deben combinar de alguna manera para obtener una decisión. Agregación es el proceso en el cual los conjuntos difusos que representan las salidas de cada regla son combinados en un único conjunto difuso. Agregación ocurre solamente una vez por cada variable de salida, previamente al último paso: la defusificación. La entrada del proceso de agregación es la lista truncada de las funciones de salida que regresa el proceso de implicación para cada regla. La salida es un único conjunto difuso para cada variable de salida.

Fase 3. Defusificación

- Defusificación. La entrada del proceso de defusificación es un conjunto (el conjunto de salida del proceso de agregación) y la salida es un número único. Hay cinco métodos de defusificación comúnmente usados: Centroide, bisector, media del máximo (el promedio del máximo valor del conjunto de salida), el más grande del mínimo, y el más pequeño del máximo.



Figura 11. Diagrama de proceso de inferencia en sistema difuso

3.2. Método Mamdani

Es el método de inferencia más común en la metodología difusa. Fue de los primeros sistemas de control construidos que utilizaban la teoría de los conjuntos difusos. Fue propuesto en 1975 por Ebrahim Mamdani en un intento de controlar

una combinación de máquina de vapor y boiler sintetizando un conjunto de reglas lingüísticas de control obtenidas de expertos operadores humanos. El esfuerzo de Mamdani se basó en el artículo de Lofti Zadeh's de 1973 que hablaba de algoritmos difusos para sistemas complejos y procesos de decisión. Aunque el proceso de inferencia descrito posteriormente difiere de alguna manera en los métodos descritos en el artículo original, la idea básica es la misma. [3]

Mamdani propuso este controlador que comprende el siguiente procedimiento básico:

1. Siendo el error la diferencia entre el valor deseado y el valor real de la variable que se va a controlar, esto es $\varepsilon = V_{deseado} - V_{real}$, se relacionan las funciones de pertenencia que realizarán la difusificación.
2. Se establecen las reglas a partir de proposiciones condicionales, y el dispositivo de inferencia será una composición máx-mín que ha sido previamente definida como:

$$X_T(x, z) = \bigvee_{y \in Y} (X_R(x, y) \wedge X_s(y, z))$$

3. Se seleccionan las funciones de pertenencia para la desdifusificación y el método que se va a usar para encontrar el valor nítido de la salida, normalmente correspondiente al método del centroide. [5](p81)

3.3. Método Takagi-Sugeno

Introducido en 1985, este método es similar al de Mamdani en muchos aspectos. Las primeras dos partes del proceso de inferencia difusa, fusificar las entradas y aplicar un operador difuso son las mismas. La mayor diferencia entre el método Mamdani y el método de Sugeno es que en el método de Sugeno las funciones de membresía de las salidas pueden ser lineales o constantes (Ver **Tabla 3**).

Una regla típica en un modelo difuso Sugeno tiene la forma:

Si la Entrada 1 es x y la Entrada 2 es y, entonces la salida es $z = ax + by + c$

Para un modelo Sugeno de orden cero, el nivel de la salida z_i es una constante ($a=b=0$)

Cada regla pesa su nivel de salida probando la fuerza de la regla w_i . La salida final de sistema es pesada obteniendo el promedio de todas las salidas de las reglas.

$$Salida\ Final = \frac{\sum_{i=1}^N WiZi}{\sum_{i=1}^N Wi}$$

Donde N es el número de reglas. [11]

Tabla 3. Comparación entre sistemas de inferencia

Ventajas del método Mamdani	Ventajas del método Sugeno
Es intuitivo	Se computa eficientemente
Es de una aceptación extendida	Funciona bien con técnicas lineales (Por ejemplo control PID)
Es apropiado para una entrada humana	Funciona bien con optimización y técnicas adaptativas
	Garantiza la continuidad de la superficie de salida
	Es apropiado para el análisis matemático

CAPÍTULO 3. PROCESO EXPERIMENTAL

En el presente capítulo se abordan los diferentes procedimientos experimentales que permitieron el análisis de los resultados que arrojó un proceso de shot peening. El sistema de inferencia difuso que se expone más adelante en el presente trabajo se alimenta mediante una base de datos generada por medio de la experimentación, la cual en este caso se lleva a cabo mediante un diseño de experimentos robusto. En este diseño de experimentos, está involucrado directamente el número de corridas experimentales a realizar, conjuntamente con los parámetros más significativos para el sistema, con la finalidad de seleccionar el arreglo ortogonal más adecuado. Posteriormente, se utiliza el método de inferencia difuso seleccionado con antelación, creando las reglas de relación pertinentes para obtener las salidas tanto de datos difusos como de valores de salida nítidos. La última parte del procedimiento lo compone las pruebas experimentales de comprobación, que permiten verificar la optimización de los parámetros del proceso en términos de resistencia a la fatiga.

1. Recopilación de datos

Para realizar la recolección de datos, se prepararon probetas con material metálico no ferroso correspondientes al aluminio 2024-T351 para ensayo de shot peening. Por su designación, este aluminio tiene cobre como elemento de aleación y es tratable al calor con excelentes propiedades mecánicas. La “T” representa un templado con tratamientos de calor que estabilizan el material y mejoran la resistencia. El “351” se refiere a la temperatura del tratamiento [12]. Y son estas características lo que convierten al material bajo investigación en uso común de la industria aeronáutica, en elementos como alas, fuselaje, etc. Aquellos que normalmente están sometidos a cargas cíclicas.

Durante un desarrollo de experimentos con diseño robusto se deben considerar por un lado los parámetros de procesamiento y por otro aquellos parámetros que son inherentes a la aplicación de un proceso de shot peening en una superficie. Pero, antes de realizar estas pruebas se tiene que tener en cuenta, por el diseño. Estos son clasificados en:

- Los factores de control de procesamiento. Estos son los factores que se eligieron al principio de las pruebas de shot peening como los factores más relevantes para determinar la funcionalidad del mismo. Estos son 1) El tipo/tamaño de bolilla, 2) La cobertura en términos de porcentaje y 3) El ángulo de incidencia o impacto de las bolillas.
- Las propiedades de respuesta o efectos inducidos. Estos son aquellos datos que se obtienen después del proceso, y que se miden en el material. Son A) Esfuerzos residuales B) Rugosidad en términos de concentración de esfuerzos y C) Endurecimiento por deformación. Ver (**Figura 12**)

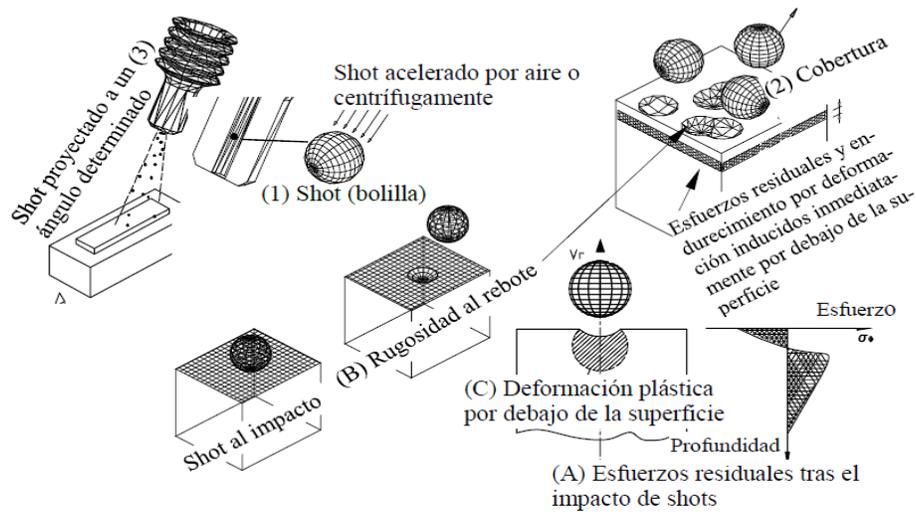


Figura 12. Representación esquemática de los parámetros involucrados en el proceso de *shot peening*

Una vez definidos los factores de control en el proceso, y dado que se mencionó anteriormente que se procedería a trabajar con un arreglo ortogonal, se definen los niveles de dichos factores, para poder obtener resultados con un reducido número de experimentos en comparación al desarrollo de una experimentación sin fraccionar (Ver **Tabla 4**).

Tabla 4. Factores y sus niveles de control

Factor		Nivel de factor			
		1	2	3	4
A	Tipo de shot	S230	CCW20	S110	S330
B	Cobertura (%)	50	100	200	400
D	Ángulo de incidencia (°)	30	90	45	90

Estos factores y niveles fueron elegidos por un analista experto que reconoce que son los factores que más impactan en la industria aeroespacial y automotriz. (*British Aerospace*) Dichos niveles permiten trabajar en el arreglo ortogonal, pero para obtener una muestra experimental más acorde con el número de factores, la respuesta requerida y la representatividad de la misma se consideran espacios vacíos.

Los espacios vacíos permiten aplicar el arreglo ortogonal L_{16} con los 4 niveles de los factores. (4^5) Como se puede apreciar en la **Figura 13**.

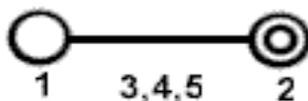


Figura 13. Gráfica lineal del arreglo ortogonal L_{16}

Como se puede ver, el número de factores no corresponde al número de niveles en el arreglo elegido. Esto nace de la necesidad de tener un número de pruebas que sea concluyente, recordando que en el caso de los arreglos ortogonales, el número de experimentaciones a realizar depende tanto del número de niveles de los factores como de los factores mismos. En este caso, (Ver **Tabla 5**) el arreglo elegido permite balancear el peso de ambos, sin comprometer la representatividad de los datos, por lo que se incluye un par de columnas vacías que funcionan como factores y que no afectan en la experimentación.

Tabla 5. Arreglo ortogonal de la experimentación

Arreglo ortogonal						Factores asignados y sus niveles				
Exp	A	B	C	D	E	Shot (A)	Cobertura(%) (B)	Vacío (C)	Ángulo(°) (D)	Vacío (E)
1	1	1	1	1	1	S230	50	-	30	-
2	1	2	2	2	2	S230	100	-	90	-
3	1	3	3	3	3	S230	200	-	45	-
4	1	4	4	4	4	S230	400	-	90	-
5	2	1	2	3	4	CCW20	50	-	45	-
6	2	2	1	4	3	CCW20	100	-	90	-
7	2	3	4	1	2	CCW20	200	-	30	-
8	2	4	3	2	1	CCW20	400	-	90	-
9	3	1	3	4	2	S110	50	-	90	-
10	3	2	4	3	1	S110	100	-	45	-
11	3	3	1	2	4	S110	200	-	90	-
12	3	4	2	1	3	S110	400	-	30	-
13	4	1	4	2	3	S330	50	-	90	-
14	4	2	3	1	4	S330	100	-	30	-
15	4	3	2	4	1	S330	200	-	90	-
16	4	4	1	3	2	S330	400	-	45	-

Una vez que se obtiene el arreglo que servirá de base para realizar las pruebas de shot peening se realizan las pruebas. En la **Tabla 6** que se presenta más adelante, se pueden apreciar las propiedades de respuesta resultantes. Estas propiedades de respuesta son medidas y/o calculadas en la probeta una vez que la prueba ha finalizado.

2. Respuesta superficial después de aplicado el proceso de shot peening

Como se menciona con anterioridad, el diseño robusto requiere elegir parámetros de respuesta o efectos inducidos para su aplicación, que en el caso de la presente investigación son parámetros elegidos por el experto como aquellos con más trascendencia en la modificación de la superficie de la probeta. Estos se encuentran, miden, o calculan una vez que se ha aplicado el proceso de shot peening.

2.1. Esfuerzos residuales

En el proceso de shot peening se aplica por un breve corto de tiempo una carga en la superficie del elemento o componente cuando se dispara el shot, ya sea usando presión o en forma centrífuga. Como resultado, se provoca una deformación plástica. Pero, al existir una deformación plástica en algunas partes del elemento sometido al ensaye, aun si es retirada la carga al detener o terminar el bombardeo de bolillas o esferas, se induce un esfuerzo en la superficie y debajo de ella, ya que la nueva diferencia de orientación o composición produce una diferencia de respuesta de capa superficial, o diferencia de esfuerzos comprensivos. A esta diferencia de esfuerzo se le conoce como “esfuerzo residual” [13]. Los esfuerzos residuales provocan un incremento en la susceptibilidad a las grietas lo que conlleva a la disminución de los límites de la fatiga.

Para determinar los esfuerzos residuales, se determinan los esfuerzos inversos del sistema σ' . [14]. Estos esfuerzos se determinan a partir de la suma de las fuerzas que actúan a lo largo de un eje imaginario dentro del cuerpo, cuyo resultado debe ser cero. Para calcular los esfuerzos residuales es necesario sumar esfuerzos máximos alcanzados durante la fase de carga y los esfuerzos inversos correspondientes a la fase de descarga.

Esto puede ser expresado matemáticamente como [13]:

$$\int \sigma_x w(z) dz = 0$$

Y gráficamente como se muestra en la **Figura 14**.

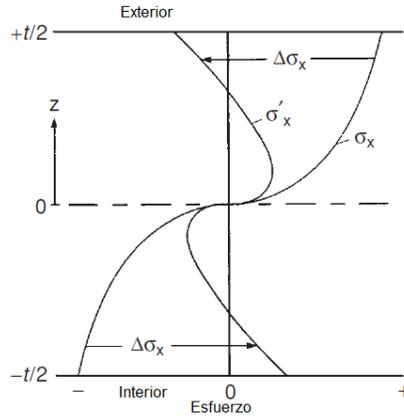


Figura 14. Representación gráfica del cálculo de esfuerzos residuales

Cabe destacar que los esfuerzos residuales pueden ocurrir a escala microscópica o macroscópica. En el caso de la escala microscópica, estos se deben a la dislocación de granos, y, por la diferencia de formación de granos en un policristal (que son los que conforman los materiales metálicos), algunos de estos quedarán con esfuerzos comprensivos y otros con esfuerzos tensiles.

Los esfuerzos residuales se determinaron utilizando el método del agujero ciego (Ver **Figura 15**), el cual consiste en colocar una galga extensiométrica especial de tres elementos en el punto de la pieza donde se quiere determinar los esfuerzos para después realizar un agujero. La lectura que se obtiene es el valor de las micro-deformaciones en el material una vez que se ha relajado de la penetración con la pequeña broca que le ha realizado el agujero. El procedimiento completo puede encontrarse en la especificación ASTM E 837-01.

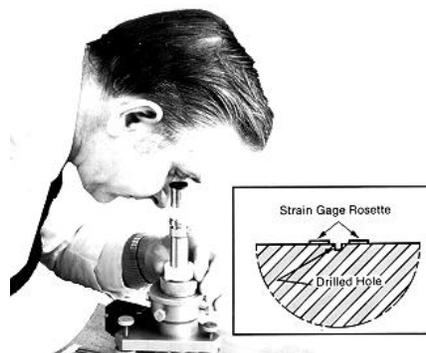


Figura 15. Representación del método del agujero ciego

2.2. Endurecimiento por deformación

El endurecimiento por deformación es una de las técnicas más importantes dentro de la industria. Este se obtiene al aumentar el número de dislocaciones en el material. También se le nombra como endurecimiento por trabajo mecánico, y un tratamiento mecánico al cual pertenece la técnica de granallado o shot peening.

Este endurecimiento se logra al aplicar un esfuerzo por encima del límite elástico (cercano al límite plástico) y luego retirarlo, haciendo que la deformación sea permanente. Esto, sin exceder el límite del material.

Para calcular la respuesta del material en frío, se debe calcular el coeficiente de endurecimiento por deformación. Que es la pendiente de la porción de la curva esfuerzo deformación del material.

La ecuación es la siguiente [2]:

$$\sigma_t = K\varepsilon_t^\eta$$

Para determinar el endurecimiento del material es necesario hacer un ensayo de dureza. Un ensayo de dureza consiste en medir la resistencia de una superficie a la penetración por un objeto duro. Para medir el endurecimiento por deformación se usó un durómetro y un ensayo de dureza Vickers, por ser un ensayo de microdureza.

El ensayo de dureza Vickers es llamado ensayo universal, al ser una mejora del ensayo de dureza Brinell. En el ensayo de dureza Vickers penetrador tipo pirámide (Ver **Figura 16**) se oprime contra el material, en el caso de la experimentación contra la superficie del aluminio. Se mide el diámetro de la indentación generada y se calcula la dureza a partir de la siguiente ecuación [2]:

$$HV = \frac{2 \sin 68^\circ F}{D^2}$$

En donde “F” es la fuerza aplicada por el indentador y “d” corresponde a la diagonal de la huella dejada.

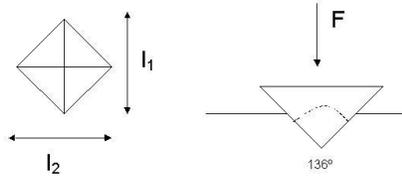


Figura 16. Identador en un ensayo Vickers

2.3. Concentración de esfuerzos

En una pieza que no es uniforme, la concentración de esfuerzos no es consistente en toda parte de la pieza. En caso de las probetas de aluminio dado que se le aplicó un proceso de shot peening la superficie no es uniforme. Por lo tanto, la fórmula general $\sigma=P/A$ [15] no puede ser aplicada. En esta fórmula sigma representa la intensidad del esfuerzo aplicado en una determinada área.

Se le llama concentraciones de esfuerzos a las intensidades altas de esfuerzos en determinada área de la probeta. Esta área, en una pieza que es propensa a la fatiga o a la cual se le aplican cargas cíclicas es de suma importancia en el momento del diseño y en el presente estudio, para evitar las fallas por fractura y la propagación de las grietas.

Hay tres maneras para tratar la concentración de esfuerzos en el diseño de un componente. A saber [15]:

1. Conocimiento de su existencia y corrección con detalles en construcción
2. Reducir el esfuerzo admisible en el diseño de miembros principales y conexiones
3. Calcular la intensidad del esfuerzo máximo y diseñar con base en ese valor

Como se puede apreciar, en este estudio se tomo a consideración el cálculo de los esfuerzos residuales, ya que se trabajo sobre un material y no sobre una pieza especificada, lo que limita el campo de acción a soluciones geométricas.

Para realizar dichos cálculos, se empleó perfilómetro (Ver **Figura 17**). Un perfilómetro es un aparato que permite medir un perfil superficial para calcular su rugosidad. Este aparato puede medir las pequeñas variaciones en la superficie. Para otros detalles se puede consultar [16]



Figura 17. Ejemplo de perfilómetro

2.4. Prueba de fatiga

La técnica que se eligió para la prueba de fatiga (Ver **Figura 18**) fue la del tipo tensión-tensión, con probetas planas de la forma reloj de arena y de acuerdo con los estándares británicos BS-7270 [17]. Se utilizó una carga de tipo sinusoidal de amplitud constante con frecuencia de 20-25 Hz, a temperatura ambiente. Siempre se tomó en cuenta los tiempos de prueba para los niveles de frecuencia seleccionados. La relación de esfuerzo ($R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$, donde σ_{\min} es el esfuerzo mínimo aplicado y σ_{\max} es el máximo esfuerzo aplicado), fue 0.1, fundamentalmente para preservar un esfuerzo cíclico ténsil y para prevenir un posible efecto de pandeo. Por lo tanto, la prueba se realizó bajo control de carga hasta la falla con un esfuerzo máximo aplicado que oscilaba entre el 60 y el 120 % del valor de esfuerzo de cedencia para cada uno de los materiales. Se probaron un mínimo de 8 probetas con un 33% de replicación (dos probetas por cada nivel de esfuerzo), de acuerdo con las recomendaciones de ASTM E 739-91. El programa de pruebas que se adoptó fue como se enuncia a continuación:

- i. Se probaron un número de probetas sin tratamiento hasta la falla, las cuales se utilizaron como testigos.
- ii. Las curvas S-N y el esfuerzo máximo calculado para romper una probeta, se utilizaron para seleccionar los niveles de esfuerzo para las probetas con tratamiento de *shot peening*.
- iii. Se probaron las condiciones óptimas y peores. Debe hacerse notar que las condiciones óptimas representan los valores máximos de esfuerzo residual y el endurecimiento por deformación, y los valores mínimos de concentración de esfuerzo (rugosidad). Por el contrario, las peores condiciones denotan lo opuesto.

- iv. Se realizó un análisis sensitivo de las variables seleccionadas, cuando se probaron probetas con tratamiento mecánico bajo condiciones donde las variables individuales se investigaron.

Las superficies de las probetas cicladas a la falla se examinaron por microscopía óptica y por microscopía electrónica de barrido. Un microscopio óptico directo se usó para estudiar las grietas y morfologías de la superficie bombardeada. La microscopía de barrido, por su parte, se usó para identificar los sitios de inicio de grietas y los modos de fractura, particularmente respecto a las características de variación de fractura superficiales en función de la profundidad para relacionar la variación de los efectos del *shot peening* (distribución de esfuerzos residuales y microdureza).

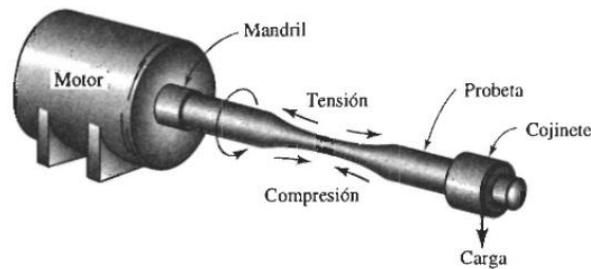


Figura 18. Ensayo de fatiga de viga en voladizo rotatoria

Las superficies de las probetas cicladas a la falla se examinaron por microscopía óptica y por microscopía electrónica de barrido. Un microscopio óptico directo se usó para estudiar las grietas y morfologías de la superficie bombardeada. La microscopía de barrido, por su parte, se usó para identificar los sitios de inicio de grietas y los modos de fractura, particularmente respecto a las características de variación de fractura superficiales en función de la profundidad para relacionar la variación de los efectos del *shot peening* (distribución de esfuerzos residuales y microdureza).

Las diversas pruebas y mediciones señaladas con anterioridad permiten obtener la respuesta superficial del material una vez aplicado el *shot peening*. Los esfuerzos residuales, el endurecimiento y la concentración de esfuerzos por cada una de las corridas experimentales son las propiedades de respuesta experimental. Como se muestra en la **Tabla 6**.

Tabla 6.Propiedades de respuesta experimental

No. Exp.	Esfuerzos residuales (Mega Pascales)	Endurecimiento (Dureza Vickers)	Concentración de esfuerzos (adimensional)
	ER	ED	CE
1	-124.80	144.61	1.36
2	-233.70	145.15	1.55
3	-197.20	154.74	1.66
4	-246.65	166.90	1.62
5	-173.15	135.65	1.56
6	-243.00	145.45	1.72
7	-164.95	150.08	1.63
8	-245.55	157.55	1.84
9	-280.00	142.26	1.55
10	-131.50	153.50	1.58
11	-379.20	157.50	1.57
12	-149.37	151.75	1.53
13	-257.90	134.50	1.45
14	-170.00	159.00	1.43
15	-308.50	157.89	1.57
16	-292.30	153.58	1.54

3.Fusificación

Una vez conseguido los valores de las propiedades descritas anteriormente por el experto como los parámetros de más influencia para la optimización del proceso de shot peening, se procede a la fase de fusificación del sistema. Esto se refiere a convertir a los valores nítidos en valores difusos para obtener una determinada respuesta.

Para formar el sistema de inferencia difuso se necesitan valores de entrada con los cuales iniciar el análisis. Esos valores son las propiedades de respuesta experimental, que, de ahora en adelante, toman el carácter de variables lingüísticas. Cabe destacar que cada variable lingüística debe tener ciertas asociaciones semánticas para poder conformar de una manera optima el sistema. Esas relaciones son las llamadas funciones de pertenencia, regidas de las reglas del sistema, de las que ya se comento previamente.

Se tomaron como variables de entrada del sistema a tres parámetros: el Esfuerzo Residual(ER), la Concentración de Esfuerzos (CE) y el Endurecimiento por deformación (ED). Y se les asigno dos niveles a cada entrada para formar dos subconjuntos difusos. Esos niveles son altos y bajos.

En la **Tabla 7** se pueden apreciar los valores que conformar a las funciones de pertenencia. Estas funciones de pertenencia se forman a partir de los valores nítidos de las entradas, más concretamente de los máximos y mínimos de cada variable del mismo. Recordando que para cada valor real habrá un equivalente en el mundo del conjunto difuso, ya que este representa el grado de pertenencia de ese elemento al conjunto. Esto forma una Función de Pertenencia (FP). Estas las funciones de pertenencia pueden adoptar diferentes formar como trapezoidal, triangular, senoidal, gaussiana o una combinación de las formas para cada entrada.(Ver **Figura 19**)

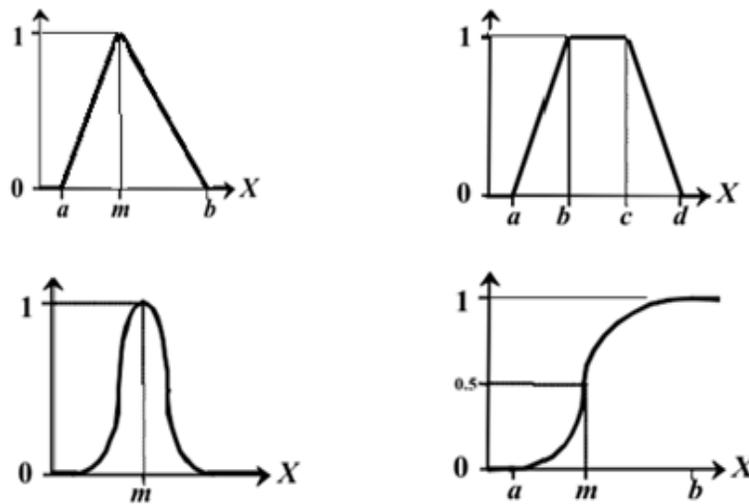


Figura 19. Funciones de pertenencia triangular, trapezoidal, gaussiana y senoidal_[18]

Cabe destacar que para aplicaciones en el ámbito de la ingeniería las funciones que tiene más frecuencia de uso son las triangulares y las trapezoidales [19], por su capacidad de dar valores óptimos alrededor de valores que no lo son, es por ello que son las que se toman en cuenta para modelar las funciones de pertenencia del sistema de inferencia difuso.

Tabla 7.Funciones de pertenencia con valores nítidos

Variable Lingüística	Valores Lingüísticos	Función de pertenencia Triangular	Función de pertenencia Trapezoidal
ER(K ₁)	Bajo(L ₁)	k_1 :(-570,-379.2,-188.4) μ_{l_1}	k_1 :(-570,-379.2, -188.4) μ_{l_1}
	Alto(L ₂)	k_1 :(-315.6, -124.8,315.6) μ_{l_2}	k_1 :(-315.6, -124.8,315.6) μ_{l_2}
ED(K ₂)	Bajo(L ₁)	k_2 :(110.2,134.5,158.8) μ_{l_1}	k_2 :(110.2,134.5,158.8) μ_{l_1}
	Alto(L ₂)	k_2 :(142.6,166.9,191.2) μ_{l_2}	k_1 :(142.6,166.9,191.2) μ_{l_2}
CE(K ₃)	Bajo(L ₁)	k_3 :(1.0, 1.36, 1.72) μ_{l_1}	k_3 :(1.0, 1.36, 1.72) μ_{l_1}
	Alto(L ₂)	k_3 :(1.48,1.84,2.2) μ_{l_2}	k_1 :(1.48,1.84,2.2) μ_{l_2}

Gracias a los valores de la **Tabla 7** se procedió a modelar el sistema de inferencia difuso, utilizando como herramienta el software Matlab,(Ver **Figura 20**) más específicamente la *toolbox* de *fuzzy logic*. Este programa permite hacer la relación de los valores nítidos, las reglas de pertenencia y a su vez realiza los cálculos matemáticos necesarios para asignar a cada valor de entrada un valor de salida, por medio del método de defusificación que se crea más conveniente, teniendo varios a su disposición.

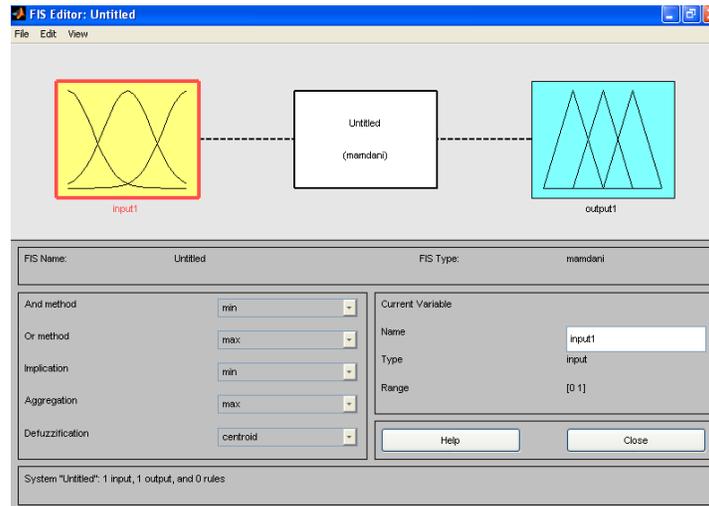


Figura 20. Editor Matlab de lógica difusa

Matlab es un software matemático bastante poderoso, ya que combina varias aplicaciones con editores de sistema tipo gráfico (como el entorno Simulink que

permite crear controladores PID y otros) y un editor de código, así como la posibilidad de combinación con otros tipos de lenguajes y con dispositivos de hardware, lo que convierte a esta herramienta en una herramienta versátil, para su uso en el cálculo matemático y el modelado de sistemas, así como las respuestas que estos pueden ofrecer. Una de las desventajas es que, para otro tipo de aplicaciones no puede generar un código ejecutable como tal, ya el archivo es generado en la propia extensión del programa.

En la **Figura 21** se pueden observar la forma que toman las variables de entrada en el proceso de fusificación. Se encuentran los dos tipos de funciones, así como los dos tipos de niveles de cada variable, el nombre de cada variable y el grado de pertenencia de cada valor de acuerdo a la función de membresía asignada por los máximos y mínimos del sistema.

La primer cuestión a considerar antes de crear las funciones de membresía o las reglas es el método de inferencia elegido. En el caso de la presente investigación fue el método de inferencia Mamdani, por tratarse de una aplicación que no requería de valores que fueran retroalimentados (sistema de lazo cerrado) o que fueran a ser controlados in situ.

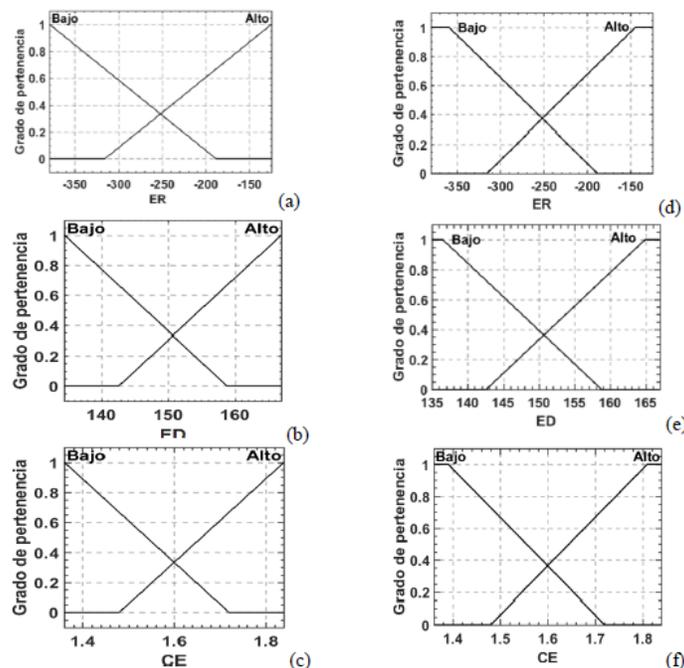


Figura 21 . Funciones de pertenencia triangulares(a-c) y trapezoidales(d-f) de los valores de entrada del sistema de inferencia

El editor del sistema de inferencia difuso de la plataforma del software Matlab permite editar las formas de las funciones de membresía de entrada y de salida(Ver **Figura 22**), así como escribir las reglas que contendrán al sistema y calcula el valor de la salida, dependiendo de los valores de entrada. Así como también se elige el método de fusificación(centroide, máx-min, etc.) y el método de inferencia(Mamdani o Sugeno entre otros).

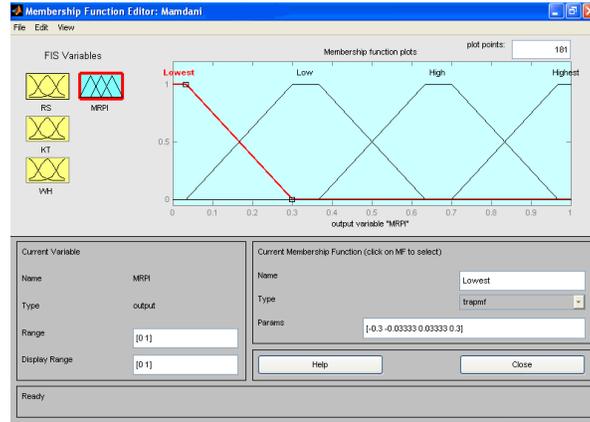


Figura 22. Funciones de membresía de entrada y salida en entorno Matlab

Una de las ventajas más notables al momento de utilizar esta herramienta es la independencia de elección del tipo de funciones de membresía de entrada y la función de salida. Esto permite tener un mejor rango de acoplamiento, ya que si por ejemplo, la entrada contiene valores en donde no es necesaria una linealización puede tomar la forma triangular y la función de membresía salida puede tomar la forma trapezoidal .

El método Mamdani se eligió para realizar las inferencias por la naturaleza del proyecto. Considerando esto, las reglas (Ver **Tabla 8**) toman la forma “*si entonces*” (“if-then”, en su naturaleza de programación). La relación de cada una de las variables y su nivel conforman la regla, la consecuencia es la salida. Esta salida representa un nivel de certidumbre en cuanto a las condiciones de entrada.. Esto se relaciona con los principios del diseño robusto y del modelo de Taguchi que contienen los niveles “entre más pequeño mejor”, “nominal es lo mejor” y “entre más grande mejor” y quedan a consideración del experto.

Tabla 8.Reglas del sistema de inferencia difuso

Regla 1	If ER es	Bajo	and ED es	Bajo	and CE es	Bajo	then IR es	MuyBajo
Regla 2	If ER es	Bajo	and ED es	Bajo	and CE es	Alto	then IR es	Bajo
Regla 3	If ER es	Bajo	and ED es	Alto	and CE es	Bajo	then IR es	Bajo
Regla 4	If ER es	Bajo	and ED es	Alto	and CE es	Alto	then IR es	Alto
Regla 5	If ER es	Alto	and ED es	Bajo	and CE es	Bajo	then IR es	Bajo
Regla 6	If ER es	Alto	and ED es	Bajo	and CE es	Alto	then IR es	Alto
Regla 7	If ER es	Alto	and ED es	Alto	and CE es	Bajo	then IR es	Alto
Regla 8	If ER es	Alto	and ED es	Alto	and CE es	Alto	then IR es	MuyAlto

Cabe destacar que en la conformación de reglas se tiene que tener en cuenta la naturaleza de los datos y la complejidad de las relaciones que tengan entre sí los mismos, es decir, la estructura de la información. [10]. Así mismo, la cantidad de las reglas a generar dependerá del juicio del experto siempre buscando la mayor nitidez en la salida del sistema con el menor número de reglas. En el caso de este estudio, el número es pequeño ya que desde etapas previas se buscó que los datos fueran los más representativos en una experimentación.

Esto es posible con la combinación de una técnica que usa la Lógica difusa y el método Taguchi para experimentación que tiene una salida multi-respuesta. En varios artículos como [20] y [21] se puede apreciar las ventajas que presenta el uso de las técnicas combinadas para la optimización de procesos como en el presente estudio.

Una vez que se han establecido las reglas que regirán al sistema de inferencia difuso se procede a diseñar la salida, para pasar a la última etapa de la inferencia del sistema que es la defusificación. Esto crea el sistema de inferencia difuso.(Ver **Figura 23**)

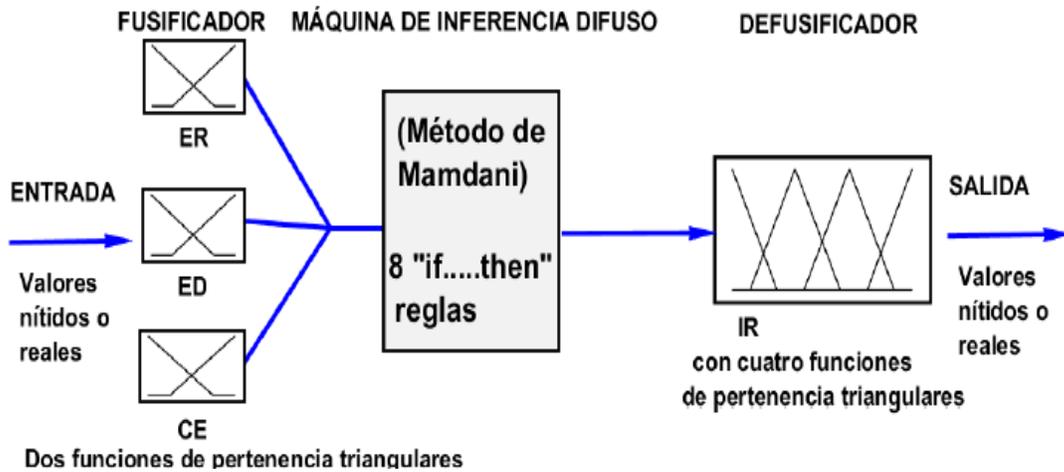


Figura 23. Representación esquemática del sistema de inferencia difuso

3. Defusificación

Para el proceso de defusificación se definió una variable de salida como IR, o Índice de Respuesta. Esta salida tiene cuatro niveles lingüísticos definidos como Muy Bajo, Bajo, Alto y Muy Alto. Este índice respuesta representa los valores óptimos para el proceso de shot peening, por lo que a mayor sea el número mejor será la respuesta de la experimentación o proceso de shot peening que se está realizando y serán esos la combinación de factores deseados y óptimos.

Una vez que se establecen los niveles de salida, el software calcula por cada valor de entrada y en base a las reglas y funciones de membresía que se presentaron, utilizando el método del centroide en este caso, el número correspondiente de IR (o valor de salida) en un número nítido. (Ver **Figura 24**)

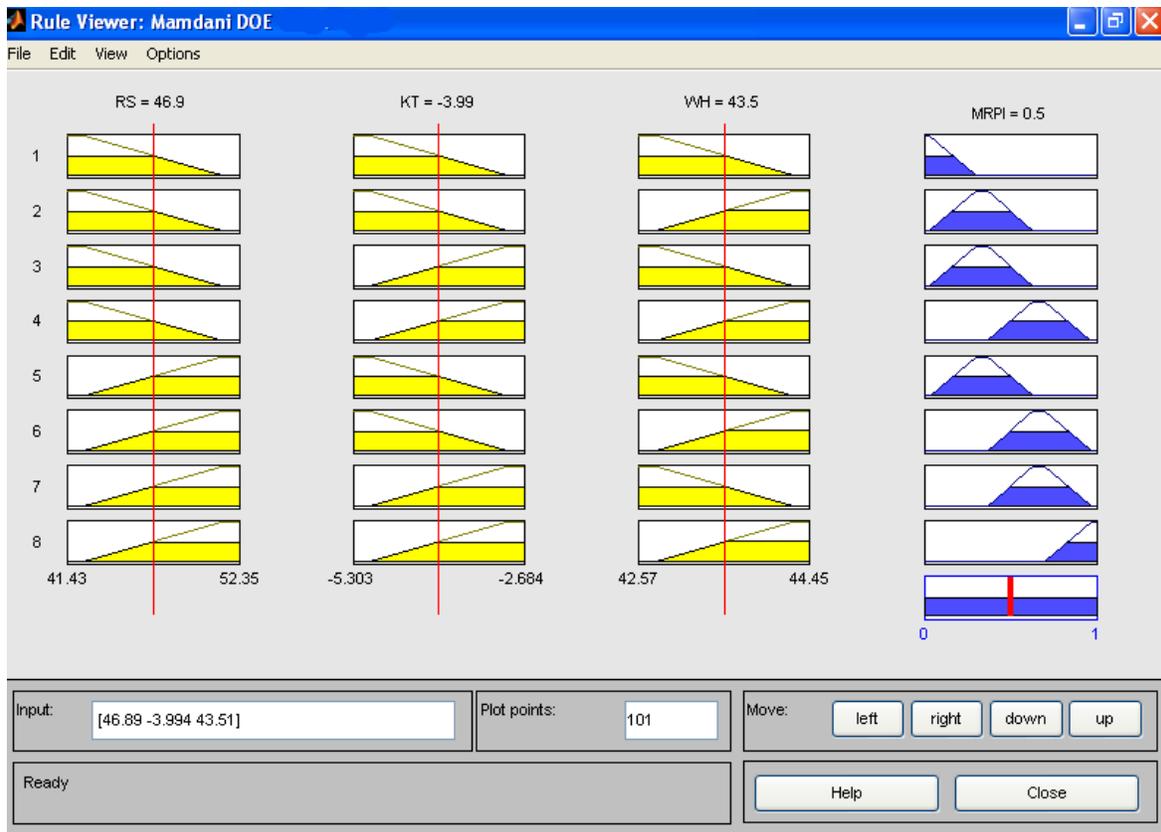


Figura 24. Visualizador de funciones de membresía y su respuesta en Matlab

Es importante señalar que el cálculo se hace con cada conjunto de valores de entrada (los 3 simultáneamente). Estas combinaciones son introducidas en el mecanismo de inferencia para obtener cada número de IR. Ese índice de Respuesta es el valor que tiene mayor probabilidad de pertenecer al conjunto (entre más grande mejor, en el presente trabajo). El proceso de defusificación termina cuando se obtiene un valor nítido a partir del IR, es decir valores de los parámetros de entrada que optimicen el proceso.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El presente capítulo es el conclusivo del trabajo de investigación en donde se exponen los resultados de la investigación realizada, así como los objetivos generales y particulares alcanzados. Esto es posible gracias a que el sistema fue sujeto a revisión para determinar si las propiedades que se le confirieron permiten obtener parámetros del ensayo del proceso de shot peening en el que se optimice el mismo, es decir en el que la falla por fatiga de la pieza disminuya.

1.Resultados

Los resultados permiten observar la dirección que puede tomar los futuros trabajos con respecto al proceso de shot peening y a la optimización con lógica difusa. Además permiten verificar el correcto funcionamiento del sistema de inferencia difuso, así como la asertividad del mismo.

Como se menciona con anterioridad, la salida del sistema está dada en términos de IR. En la **Tabla 9** se pueden observar los valores de IR, para los dos tipos de funciones de membresía: trapezoidal y triangular(Ver **Figura 25**) . En ella se puede observar que los valores de cada función de salida no difieren considerablemente, lo cual indica que la presencia de formas lineales o generalización (como lo es la salida trapezoidal) no influye en la salida(o respuesta misma) cuando se trata de un sistema multi-propósito o multi-respuesta.

Tabla 9.Valores nítidos de entrada y salida del sistema

No. Exp	Valores nítidos de entrada			Valores nítidos de salida (IRs)	
	ER	ED	CE	FP: Triangular	FP: Trapezoidal
1	-124.8	144.61	1.36	0.392	0.391
2	-233.7	145.15	1.55	0.424	0.422
3	-197.2	154.74	1.66	0.647	0.65
4	-246.65	166.9	1.62	0.592	0.594
5	-173.15	135.65	1.56	0.454	0.453
6	-243	147.45	1.72	0.561	0.56
7	-164.95	150.08	1.63	0.593	0.593
8	-245.55	157.55	1.84	0.696	0.698
9	-280	145.26	1.55	0.388	0.387
10	131.5	153.5	1.58	0.599	0.599
11	-379.2	157.5	1.57	0.455	0.455
12	-149.37	151.75	1.53	0.546	0.546
13	-257.9	134.5	1.45	0.267	0.267
14	-170	159	1.43	0.65	0.65
15	-308.5	157.89	1.57	0.466	0.466
16	292.3	153.58	1.54	0.423	0.424

Como se menciona con anterioridad, entre más alto sea un valor de IR, se puede esperar que esa respuesta se acerque más a los valores óptimos deseados .Es

por ello que se puede observar que la corrida experimental número 8 adopta el mejor valor entre las 16 experimentaciones para los dos tipos de funciones de membresía de salida, por lo que se espera que esas características sean parte de la respuesta óptima del objetivo múltiple.

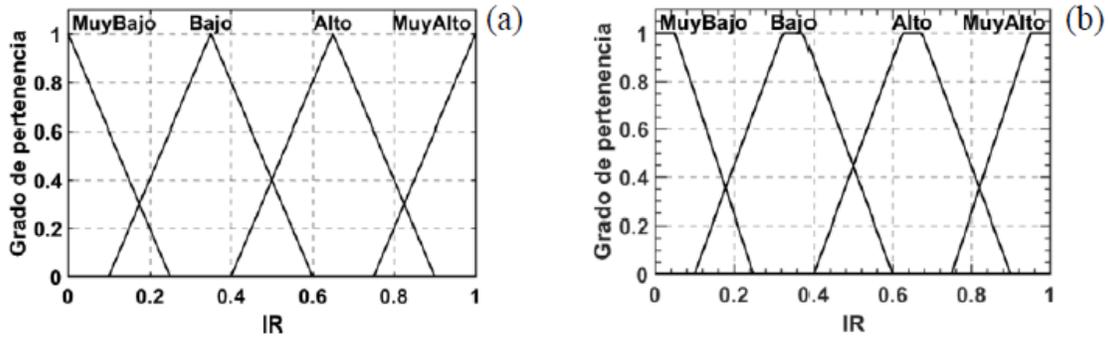


Figura 25. Funciones de pertenencia triangular y trapezoidal para las variables de salida

Cabe destacar que el software utilizado permite la representación tridimensional (Ver **Figura 26**) de una función, en este caso la función de salida o los datos de salida pueden ser visualizados con una gráfica tridimensionalidad. Esto se debe a que se manejan más de dos variables (de entrada) en el estudio.

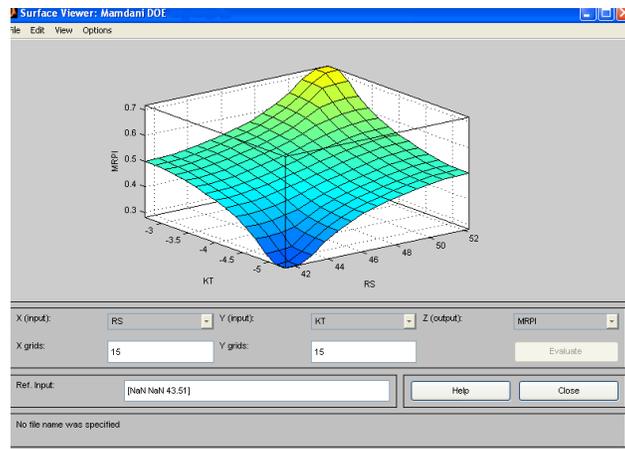


Figura 26. Representación superficial en Matlab del IR

Una de las características de los arreglos del método Taguchi es que son ortogonales, lo que hace posible extraer el efecto de cada uno de los parámetros de los datos experimentales en sus diferentes niveles. Esto se logra al determinar el promedio de IR para cada nivel en los diferentes factores de control, sumando

cada valor de IR de cada nivel y luego dividiendo por el número de datos de ese nivel, apoyándose en el arreglo ortogonal del diseño de experimentos. La **Tabla 10** muestra los valores de cada nivel para cada factor, así como la diferencia entre el valor máximo y el valor mínimo.

Tabla 10.Valores IR promedio para cada factor de control

	Factores de control		
Nivel	Shot	Cobertura	Ángulo de incidencia
1	0.51375	0.37525	0.54525
2	0.576	0.5585	0.4605
3	0.497	0.54025	0.53075
4	0.4515	0.56425	0.50175
Max-min	0.1245	0.189	0.08475
Promedio Total de IR=0.510			

El promedio total de IR es un valor que se espera que sea relativamente elevado, ya que esto significa que la diferencia entre las características de desempeño y el valor deseado es pequeña. Pero a pesar de obtener los diferentes niveles esto no proporciona los valores de las características óptimas de desempeño del proceso de shot peening.

Para poder hacer el análisis de las características óptimas se realizó la gráfica de la **Figura 27** en donde se puede ver el grado de significancia de cada parámetro sobre los efectos de shot peening, ya que muestra el comportamiento de cada parámetro en términos de los promedios de IR de cada factor de control previamente obtenidos.

Observando dicha gráfica, se deduce, por el número que la cobertura tiene la contribución más alta como factor al proceso, seguida de el tamaño de shot y del ángulo de incidencia en ese orden.

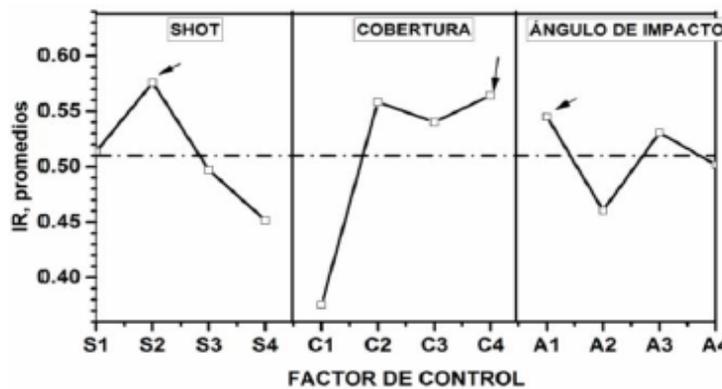


Figura 27. Factores de control promedio con sus respectivos niveles en términos de IR

De la **Tabla 10** a su vez se pueden observar los parámetros que podrían ser los óptimos para aumentar la resistencia a la fatiga después del proceso de shot peening, o que vaya acorde con el mismo. Las flechas que se indican en la **Figura 27** corresponden a dichas condiciones, y corresponde a S2, C4 y A1, que según la de asociación con los niveles corresponde para el factor de shot el CW20, para la cobertura el 400% y un ángulo de incidencia de 30°. Estos resultados permiten observar que la corrida experimental que se observa en la **Tabla 9** con el número 8 corresponde a dichos valores para los factores y los niveles.

2. Discusión

Una vez que se determinaron la combinación de factores de procesamiento que se creen óptimos para la realización de la experimentación con base a los efectos que provoca el shot peening que se consideran en el presente estudio como la multi-respuesta a este proceso con tres funciones objetivo de entrada se procede a realizar una comparación con la corrida experimental inicial para determinar si dichos factores obtenidos son adecuados para la optimización del proceso.

En la **Tabla 11** se pueden observar los resultados de la diferencia experimental de las condiciones iniciales del estudio contra las condiciones óptimas obtenidas en las tablas de IR después del procesamiento de la información.

Tabla 11. Resultados bajo condiciones iniciales y óptimas

Efectos	Combinación óptima	Resultados experimentales	Condiciones iniciales	Resultados experimentales
ER	A2, B4, D1	300 MPa	A4, B4, D4	373 MPa
ED	(CW20, 400%, 30°)	147 HV	(S330, 400%, 90°)	150 HV
CE		1.3		1.8

Los resultados de las corridas experimentales presentan una ligera ganancia en los esfuerzos residuales del material (ER), quedando prácticamente al mismo nivel que el endurecimiento por deformación (ED), pero con un incremento en la concentración de esfuerzos en comparación de las condiciones iniciales contra estas condiciones óptimas.

Como se menciona con anterioridad, el incremento en la concentración repercute negativamente en la resistencia a la fatiga, lo que indica que las condiciones óptimas en contra de las condiciones iniciales se aprecia una mejora significativa en dicha concentración de esfuerzos.

En la **Figura 28** se pueden apreciar los resultados de las condiciones del material sin tratamiento, con el tratamiento de condiciones experimentales y con la experimentación de las condiciones óptimas obtenidas del IR provenientes del sistema de inferencia difuso.

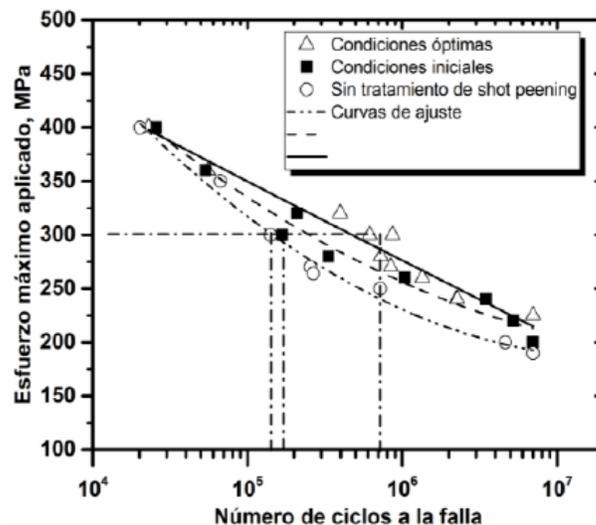


Figura 28. Curvas S-N, bajo carga axial y amplitud constante para probetas con SP y sin SP

En la mencionada gráfica anterior se puede observar por ejemplo que al aplicarse un esfuerzo de 300MPa a la probeta en esta ocurre una fractura (falla) después de unos 150000 ciclos. Mientras tanto la probeta que tiene un tratamiento de shot peening con condiciones iniciales (factores que no están optimizados) se fractura aproximadamente a los 160000 ciclos y por último la probeta a la que se le aplicó el tratamiento empleando las condiciones presumibles como óptimas obtenidas del sistema de inferencia difuso se fracturó a los 700000 ciclos. Esto quiere decir que la resistencia a la falla por fatiga se incrementó hasta en un 300% con respecto a las condiciones iniciales.

CONCLUSIONES

El presente estudio permitió determinar una combinación de factores de control con los que, en las probetas que se sometieron a pruebas fatiga del aluminio 2024-T351, después de un proceso de shot peening incrementaron su resistencia a la misma. Estos factores fueron obtenidos de la aplicación de un sistema de lógica difusa combinado con un diseño de experimentación Taguchi, lo que permitió la optimización del proceso en sí.

Se pudo observar que un modelo de inferencia difuso es conveniente para resolver problemas de diversa índole, (como las aplicaciones ingenieriles) pero si es un sistema multi-respuesta es de suma utilidad ya que permite encontrar ya resultados óptimos de manera relativamente sencilla y con un menor costo. Esto se debe a la reducción del número de experimentos al combinarse con diseño de experimentación robusta y a la aplicación de la inferencia difusa que promueve el control dinámico de la respuesta. Esto valida el uso de diversas técnicas de Inteligencia Artificial como métodos factibles para la implementación en diversos estudios de ingeniería de superficies.

Cabe resaltar que se demostró en los sistemas que tienen múltiples respuestas, las funciones lineales de membresía no presenten diferencias significativas, por lo es indistinto el tipo de función, ya sea triangular o trapezoidal, recordando que la función triangular es una generalización de la función triangular.

Es por ello que la lógica difusa reduce el tiempo de respuesta de un sistema así como el costo en la investigación de los procesos no lineales, tales como el shot peening.

Para estudios posteriores una de las recomendaciones podría ser intentar obtener los valores óptimos con un número menor de reglas al que se establece para ver si se obtiene una varianza significativa en los resultados, así como cambiar las condiciones del sistema de inferencia difuso, ya sea la forma de las funciones de membresía o el método de inferencia.

REFERENCIAS

- [1] S. Kalpakjian y S. R. Schmid, *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*, México: Person Educación, 2008.
- [2] D. R. Askeland, *Ciencia e ingeniería de los materiales*, México: International Thomson Editores, 1998.
- [3] G. Pajares Martisanz y M. Santos Peñas, *Inteligencia Artificial e Ingeniería del conocimiento*, Madrid: Alfaomega, 2006.
- [4] E. Mamdani, «Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis,» *IEEE Transactions on Computers.*, pp. 196-202, 1977.
- [5] P. Ponce Cruz, *Inteligencia artificial con aplicaciones a la ingeniería*, México: Alfaomega Grupo Editor S.A de C.V, 2010.
- [6] W. Bolton, *Ingeniería de control*, México: Alfaomega, 2006.
- [7] P. H. Guitierrez y S. H. De la Vara, *Análisis y diseño de experimentos*, México: McGraw Hill Interamericana, 2008.
- [8] H. Gutiérrez Pulido y R. De la Vara Salazar, «Introducción al diseño robusto (Taguchi),» de *Análisis y diseño de experimentos (2a Edición)*, Ciudad de México, McgrawHill, 2008, p. 564.
- [9] M.-L. Huang, H. Yung-Hsiang y Z.-S. Yang, «Validation of a method using Taguchi, response surface, neural network, and genetic algorithm,» *Measurement*, nº 94, pp. 294-294, 2016.
- [10] B. James C., *Pattern recognition with fuzzy objective function algorithms*, New York: Plenum Press, 1981.
- [11] Varios, «Mathworks,» 12 Marzo 2018. [En línea]. Available:

<https://la.mathworks.com/help/fuzzy/fuzzy-inference-process.html>.

- [12] R. L. Mott, *Resistencia de Materiales Aplicada*, México: Prentice-Hall.
- [13] W. F. Hosford, *Mechanical Behaviour of Materials*, New York: Cambridge University Press, 2010.
- [14] F. Beer P., R. E. J. Johnston, D. J. T. y D. F. Mazurek, *Mecánica de Materiales*, México: McGrawHill, 2010.
- [15] R. W. Fitzgerald, *Mecánica de Materiales*, México: Alfaomega, 2007.
- [16] C. A. Rodopoulos, S. A. Curtis, E. R. de los Rios y J. Solis Romero, «Optimisation of the fatigue resistance of 2024-T351 aluminium alloys by controlled shot peening—methodology, results and analysis.,» *International Journal of Fatigue*, vol. 26, n° 8, pp. 849-856, 2004.
- [17] B. S. 7290, *Standard practice for conducting constant amplitude axial fatigue tests of metallic materials*, United Kingdom: British Standards, 1990.
- [18] S. S. Shiu y S. K. Pal, «Case Based reasoning: Concepts, Features and Soft Computing.,» *Applied Intelligence*, vol. 21, n° 3, pp. 233-238, 2004.
- [19] T. J. Ross, *Fuzzy Logic with Engineering applications*, United Kingdom: John Wiley and Sons Ltd., 2010.
- [20] A. Gupta y H. A. A. Singh, «Taguchi-fuzzy multi output optimization (MOO) in high speed CNC turning of AISI P-20 tool steel,» *Expert Systems with Applications*, vol. 6, n° 38, pp. 6822-68281, 2011.
- [21] J. L. Lin, K. S. Wang, B. H. Yan y Y. S. Tarn, «Optimization of the electrical discharge machining process based on the Taguchi method with fuzzy logics,» *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 102, n° 1, pp. 48-45, 2000.

ANEXOS

Aplicación de lógica difusa en el proceso de shot peening del aluminio 2024-T351

Guadalupe Lazcano Herrera¹, Sandra Silvia. Roblero Aguilar^{1,2}, José Solís Ro-mero,
Héctor Rafael Orozco Aguirre², y Víctor Augusto Castellanos Escamilla¹

¹ SEP/SES/TecNM/Instituto Tecnológico de Tlalnepantla, Estado de México, México

² Centro Universitario UAEM Valle de México, Estado de México, México

alicia_gpe_hg@hotmail.com, ssrauaemex@hotmail.com, josoesolis@infinitum.com.mx,
rafilla.orozco@gmail.com,

Resumen. El proceso de granallado o shot peening se emplea rutinariamente para incrementar la resistencia a la fatiga de componentes y estructuras. Los efectos que se producen en la superficie del material tratado son esfuerzos compresivos residuales, rugosidad superficial y endurecimiento por deformación, los cuales dependen de la correcta elección de los parámetros de procesamiento. En esta investigación se aplica el método de lógica difusa para determinar la mejor combinación de factores de control que inciden en las respuestas multi-objetivo de una aleación de aluminio 2024-T351 (AA) tratada con shot peening. Los factores de control de entrada son el tipo de bolilla (shot), la cobertura y el ángulo de incidencia. Para fines estadísticos, los parámetros experimentales se trabajaron utilizando un arreglo fraccional ortogonal L_{16} . Las tres propiedades que se determinaron en forma experimental directamente sobre AA tratada son las entradas para el sistema de inferencia difuso y la salida es el índice de respuesta (IR). Se realizó una comparación del IR entre las condiciones de tratamiento inicial con las óptimas, resultando una mejora en la resistencia a la fatiga.

Palabras clave: Lógica difusa, sistema de inferencia difuso, Shot peening/Gra-nallado

Application of fuzzy logic in the process of shot peening of aluminium 2024-T351

Abstract. Shot peening is widely used to enhance the fatigue properties of components and structures. Compressive residual stresses, surface roughness, and work hardening are the immediate effects induced on the surface/subsurface layer of the treated material, which depend on the correct choice of the peening process parameters. This research aims to apply the fuzzy logic method for determining the best optimal selection of the control factors that directly influence the multi-objective response properties of a peened 2024-T351 aluminium alloy (AA). The

Aplicación de lógica difusa en el proceso de shot peening del aluminio 2024-T351

Resumen. El proceso de granallado o shot peening se emplea rutinariamente para incrementar la resistencia a la fatiga de componentes y estructuras. Los efectos que se producen en la superficie del material tratado son esfuerzos compresivos residuales, rugosidad superficial y endurecimiento por deformación, los cuales dependen de la correcta elección de los parámetros de procesamiento. En esta investigación se aplica el método de lógica difusa para determinar la mejor combinación de factores de control que inciden en las respuestas multi-objetivo de una aleación de aluminio 2024-T351 (AA) tratada con shot peening. Los factores de control de entrada son el tipo de bolilla (shot), la cobertura y el ángulo de incidencia. Para fines estadísticos, los parámetros experimentales se trabajaron utilizando un arreglo fraccional ortogonal L_{16} . Las tres propiedades que se determinaron en forma experimental directamente sobre AA tratada son las entradas para el sistema de inferencia difuso y la salida es el índice de respuesta (IR). Se realizó una comparación del IR entre las condiciones de tratamiento inicial con las óptimas, resultando una mejora en la resistencia a la fatiga.

Palabras clave: Lógica difusa, sistema de inferencia difuso, Shot peening/Granallado

Application of fuzzy logic in the process of shot peening of aluminium 2024-T351

Abstract. Shot peening is widely used to enhance the fatigue properties of components and structures. Compressive residual stresses, surface roughness, and work hardening are the immediate effects induced on the surface/subsurface layer of the treated material, which depend on the correct choice of the peening process parameters. This research aims to apply the fuzzy logic method for determining the best optimal selection of the control factors that directly influence the multi-objective response properties of a peened 2024-T351 aluminium alloy (AA). The

input parameters taken into consideration are shot, coverage and incidence angle. For statistical purposes, the experimental parameters were put in place with a L_{16} orthogonal fractional array. The three induced properties extracted experimentally from the treated AA are fed as inputs to fuzzy inference system and output withdrawn is the response index (IR). A comparison of the IR between the initial and optimal peening conditions shows an improvement in fatigue resistance.

Keywords: Fuzzy logic, fuzzy inference system, shot peening.

1 Introducción

Los componentes utilizados tanto en la industria aeroespacial como en la industria automotriz a menudo están sujetos a condiciones de carga fluctuantes o cíclicas, dando origen a la fatiga de componentes. Las grietas por fatiga se originan normalmente desde la superficie de la parte debido, entre otros, a defectos contenidos en el material [1]. Cuando la carga dinámica continúa, la grieta crece hasta que alcanza una longitud tal que ninguna barrera le podrá disminuir su velocidad de crecimiento o detener. Sin embargo, cuando la grieta creciente se obstruye en su camino por diversas barreras muy compactas, como ocurriría en microestructuras que contienen granos pequeños, entonces el crecimiento de la grieta disminuye la velocidad de crecimiento debido a que su trayectoria se desvía lo que resulta en un incremento en la resistencia a la fatiga. Es por ello que la resistencia a la fatiga usualmente se cuantifica como la resistencia a la propagación de grietas ofrecida por el material [2]. Para acondicionar la superficie en forma tal que permita detener o disminuir la velocidad de propagación de grietas, el proceso de granallado o *shot peening* (SP) es una alternativa sencilla y económica, en donde se introducen muchas y variadas formas de barreras de textura o distorsión microestructural en la superficie y capas sub-superficiales. En este proceso, esencialmente, bolillas esféricas conocidas como shots, que están hechas de acero al carbón, hierro, acero inoxidable, vidrio o trozos redondeados de cerámico, se proyectan en forma deliberada para golpear la superficie de un componente metálico. Las bolillas se aceleran ya sea por medio de aire comprimido o por fuerzas centrífugas. Las velocidades al impacto son suficientes para que se origine una indentación (huella) en la superficie del material tratado, en donde el régimen que domina es completamente plástico. Precisamente ese régimen plástico da origen a un estado de esfuerzos residuales compresivos y un endurecimiento por deformación en la sub-superficie, los cuales forman parte de esas barreras que inherentemente obstruyen el libre movimiento de las grietas.

En el proceso de SP la magnitud de los parámetros de procesamiento, así como todos los efectos inducidos deben controlarse a fin de lograr un beneficio en términos de resistencia a la fatiga y evitar o reducir la introducción de daño severo (por ejemplo, iniciación de grieta causada por una excesiva rugosidad) [3, 4]. Por lo tanto, el desarrollo de un método rápido y eficiente para optimizar el proceso es una importante área de estudio para realizar investigación. Bajo este contexto, el diseño de experimentos estadístico (DoE por sus siglas en inglés) está considerado como una herramienta consolidada para resolver problemas relacionados con la elección de los parámetros óptimos de procesamiento [5]. Unal [6] utilizó el DoE para la optimización de los parámetros

en SP sobre probetas estandarizadas llamadas tiras Almen. La optimización se realizó extrayendo los niveles óptimos de cada propiedad y posteriormente se compilaron los parámetros de procesamiento. Por otro lado, George [7] aplicó la metodología DoE con Taguchi para lograr la optimización de parámetros críticos, así como establecer el orden de predominancia, utilizando el análisis de varianza (ANOVA) para finalmente predecir un arreglo óptimo de cada parámetro. En breve, el DoE emplea diseños ortogonales para examinar las características de calidad por medio de un número reducido de experimentos. Sin embargo, esta técnica está limitada cuando se trata del tratamiento de problemas multi-respuesta, en otras palabras, el nivel óptimo de los parámetros de procesamiento es verdadero para la optimización de una respuesta individual del proceso. Para contrarrestar lo anterior, la técnica de lógica difusa [8] tiene la capacidad de trabajar con diversas entradas, como por ejemplo, características funcionales de procesos, para eventualmente convertir el comportamiento múltiple en un solo índice multi-respuesta (IR) [9]. El procedimiento de cómputo suave como la lógica difusa está ganando una aceptación progresiva en una variedad de situaciones ingenieriles [10-12], en virtud de su utilidad cuando no se encuentra disponible información matemática exacta. En comparación con otros métodos de la inteligencia artificial, el desarrollo de la lógica difusa es moderadamente más sencillo y no necesita de mucho software ni demasiado hardware. Sin embargo, hasta donde los autores tienen conocimiento, no se reportan trabajos dedicados a la aplicación de esta metodología como una estrategia para optimizar el proceso de SP con la intención de incrementar la resistencia a la fatiga de materiales metálicos.

En el presente trabajo, se emplea un mecanismo de inferencia difuso para determinar los parámetros óptimos de procesamiento en el tratamiento superficial del aluminio 2024-T351, utilizando las respuestas experimentalmente determinadas como son los esfuerzos residuales, el endurecimiento por deformación y la rugosidad superficial en términos de concentración de esfuerzos.

2 Generalidades de la lógica difusa

La lógica difusa (LD) está relacionada y fundamentada en la teoría de los conjuntos difusos, en la cual, el grado de pertenencia de un elemento a un conjunto está determinado por una función de pertenencia (FP) [13-15] que puede adoptar valores reales comprendidos en el intervalo $[0,1]$. De esta manera, mientras que en el marco de la lógica clásica un parámetro tiene pertinencia o no, dándole un valor de 1 si es pertinente y 0 en caso contrario; En la LD, se obtiene un nivel de cumplimiento de la pertinencia, es decir, entre más cercano a cero, será menos pertinente y cuando sea más cercano a 1 será más pertinente.

Las fases que completan el montaje de un sistema de inferencia difuso Mandani [15, 16] se muestran en la Fig. 1. Textualmente se describen como sigue:

- Fase 1: se basa en un proceso donde las variables tienen un grado de incertidumbre metalingüístico. Es decir, el rango de valores de cada variable puede clasificarse por conjuntos difusos, originando el universo del discurso. Con ello, los valores pasan a un proceso de fusificación que los categoriza en un nivel de pertenencia entre 0 y 1

que pertenece a un conjunto difuso. Los conjuntos difusos son caracterizados mediante funciones de pertenencia, las cuales están sintonizadas al punto de operación adecuado para el funcionamiento del sistema, es decir, las reglas de inferencia que serán empleadas

- Fase 2: se proponen reglas lingüísticas conocidas como de inferencia. Con esto, el grado de pertenencia de cada una de las variables se evalúa en un subconjunto de estas reglas.
- Fase 3: aquí se determinan los valores óptimos de salida, mediante un mecanismo conocido como defusificación, el cual consiste en pasar el grado de pertenencia, proveniente de la consecuencia de la regla de inferencia activada, a un valor nítido o real, con el fin de obtener un valor cuantificable.



Fig. 1. Esquema general de funcionamiento de un sistema de inferencia difuso

3 Caso de estudio: aplicación de lógica difusa en la selección óptima de parámetros del proceso de *shot peening*

El desarrollo del presente estudio se llevó a cabo bajo la consideración de las siguientes etapas: recopilación de datos, fusificación, generación de reglas y la aplicación del sistema de inferencia difuso (FIS, por sus siglas en inglés).

3.1 Recopilación de datos

En general, del proceso SP previamente descrito en la introducción, la información que se utiliza en el presente análisis 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). Por su parte, las propiedades de respuesta experimentalmente determinados son los (A) esfuerzos residuales, (B) rugosidad en términos de concentraciones de esfuerzos y (C) endurecimiento por deformación. Con la intención de clarificar los datos que intervienen en el proceso, en la Fig. 2 se ilustra cada uno de los factores y efectos que modifican el estado superficial de un componente.

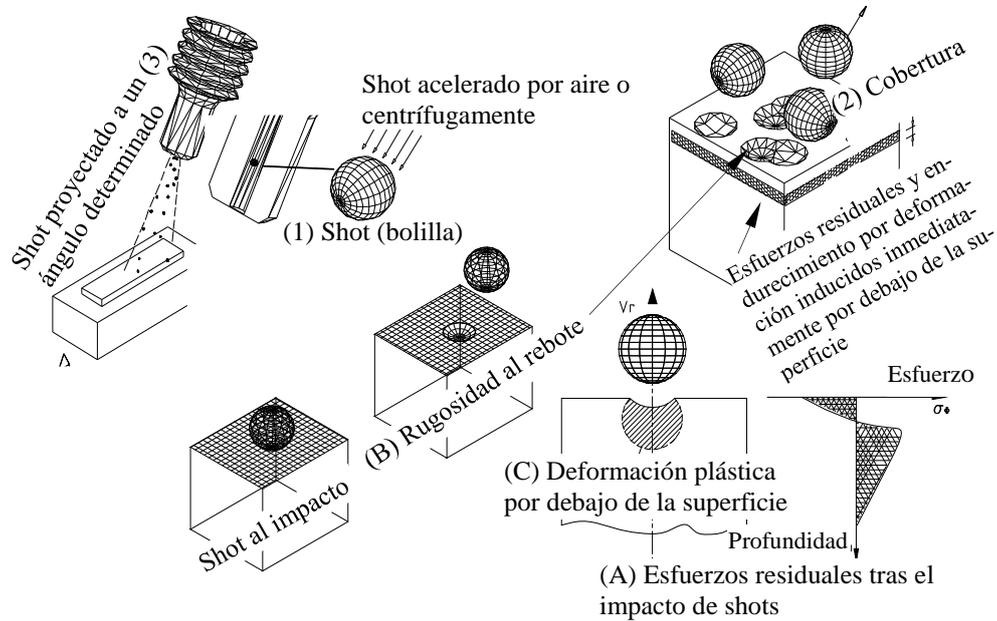


Fig. 2. Representación esquemática para ilustrar los parámetros de proceso y los efectos inducidos por el shot peening.

En los tres factores de control o de procesamiento que se consideraron, se evaluaron cuatro niveles de acción, como se muestra en la Tabla 1. Los factores elegidos son de fundamental importancia para la industria aeroespacial y automotriz [17].

Tabla 1. Factores y sus respectivos niveles de control

Factor	Nivel del factor			
	1	2	3	4
A Tipo de shot	S230	CCW20	S110	S330
B Cobertura	50	100	200	400
D Ángulo de incidencia	30	90	45	90

Basándose en los diferentes factores y niveles, y utilizando la metodología diseño de experimentos, se eligió un arreglo ortogonal factorial fraccionado $L_{16} (4)^5$. Este enfoque permite alcanzar conclusiones que son válidas en un rango de condiciones experimentales, además de que representa una elección razonable en términos de la reducción del número de experimentos sin pérdida de calidad en la obtención de resultados. El arreglo ortogonal se ilustra en la Tabla 2.

Tabla 2. Arreglo ortogonal para la experimentación

Arreglo ortogonal					Factores asignados y sus niveles					
Exp.	A	B	C	D	E	SHOT (A)	Cobertura (%) (B)	Vacío (C)	Ángulo (°) (D)	Vacío (E)
1	1	1	1	1	1	S230	50	—	30	—
2	1	2	2	2	2	S230	100	—	90	—
3	1	3	3	3	3	S230	200	—	45	—
4	1	4	4	4	4	S230	400	—	90	—
5	2	1	2	3	4	CCW20	50	—	45	—
6	2	2	1	4	3	CCW20	100	—	90	—
7	2	3	4	1	2	CCW20	200	—	30	—
8	2	4	3	2	1	CCW20	400	—	90	—
9	3	1	3	4	2	S110	50	—	90	—
10	3	2	4	3	1	S110	100	—	45	—
11	3	3	1	2	4	S110	200	—	90	—
12	3	4	2	1	3	S110	400	—	30	—
13	4	1	4	2	3	S330	50	—	90	—
14	4	2	3	1	4	S330	100	—	30	—
15	4	3	2	4	1	S330	200	—	90	—
16	4	4	1	3	2	S330	400	—	45	—

Cabe mencionar que el arreglo ortogonal está construido para usarse con cinco factores, por lo que se necesitó dejar dos columnas vacías. Esta acción apoyó en forma positiva el diseño experimental porque todos los parámetros que influyen los efectos del proceso son considerados.

Las propiedades de respuesta que resultan de los experimentos de acuerdo con la Tabla 2, se muestran en la Tabla 3. Los esfuerzos residuales se determinaron utilizando el método del agujero ciego, mientras que para el endurecimiento por deformación se usó un durómetro Vickers y para la concentración de esfuerzos se consideró un perfilómetro. Para los detalles específicos, se puede consultar [18].

Tabla 3. Propiedades de respuesta experimental.

No. Exp.	Esfuerzos residuales (Mega Pascales)	Endurecimiento (Dureza Vickers)	Concentración de esfuerzos (adimensional)
	ER	ED	CE
1	-124.80	144.61	1.36
2	-233.70	145.15	1.55
3	-197.20	154.74	1.66
4	-246.65	166.90	1.62
5	-173.15	135.65	1.56
6	-243.00	147.45	1.72
7	-164.95	150.08	1.63
8	-245.55	157.55	1.84

9	-280.00	145.26	1.55
10	-131.50	153.50	1.58
11	-379.20	157.50	1.57
12	-149.37	151.75	1.53
13	-257.90	134.50	1.45
14	-170.00	159.00	1.43
15	-308.50	157.89	1.57
16	-292.30	153.58	1.54

3.2 Fusificación

Establecidos los datos, se procede a definir las variables y valores lingüísticos, así como la función de pertenencia para realizar la fusificación. Dos subconjuntos difusos (bajo y alto) se asignaron uniformemente en tres variables de entrada, designadas como: Esfuerzo Residual (ER), Concentración de Esfuerzos (CE) y endurecimiento por deformación (ED). Bajo esta premisa, los valores que se asignaron en términos de pertenencia se compilan en la Tabla 4.

Los valores de los datos de entrada se deben definir como FPs. Una FP puede adoptar diferentes formas: trapezoidal, triangular sigmoïdal, gaussiana, o una combinación de formas para cada entrada. Las FPs triangulares y trapezoidales se consideraron para las entradas debido a su frecuencia de uso en aplicaciones de ingeniería, con la intención de encontrar los mejores resultados entre ellas. En la Fig. 3 se representa gráficamente las funciones de pertenencia para las tres entradas, las cuales se generaron por medio del software comercial Matlab.

Tabla 4. Funciones de pertenencia de las propiedades respuesta con valores nítidos.

Variable Lingüística	Valores Lingüísticos	Función de pertenencia Triangular	Función de pertenencia Trapezoidal
ER (K_1)	Bajo (L_1)	$\mu_{L_1}^{k_1}: (-570, -379.2, -188.4)$	$\mu_{L_1}^{k_1}: (-570, -379.2, -359.2, -188.4)$
	Alto (L_2)	$\mu_{L_2}^{k_1}: (-315.6, -124.8, 315.6)$	$\mu_{L_2}^{k_1}: (-315.6, -144.8, -124.8, 315.6)$
ED(K_2)	Bajo (L_1)	$\mu_{L_1}^{k_2}: (110.2, 134.5, 158.8)$	$\mu_{L_1}^{k_2}: (110.2, 134.5, 136.5, 158.8)$
	Alto (L_2)	$\mu_{L_2}^{k_2}: (142.6, 166.9, 191.2)$	$\mu_{L_2}^{k_2}: (142.6, 164.9, 166.9, 191.2)$
CE (K_3)	Bajo (L_1)	$\mu_{L_1}^{k_3}: (1.0, 1.36, 1.72)$	$\mu_{L_1}^{k_3}: (1.0, 1.36, 1.39, 1.72)$
	Alto (L_2)	$\mu_{L_2}^{k_3}: (1.48, 1.84, 2.2)$	$\mu_{L_2}^{k_3}: (1.48, 1.81, 1.84, 2.2)$

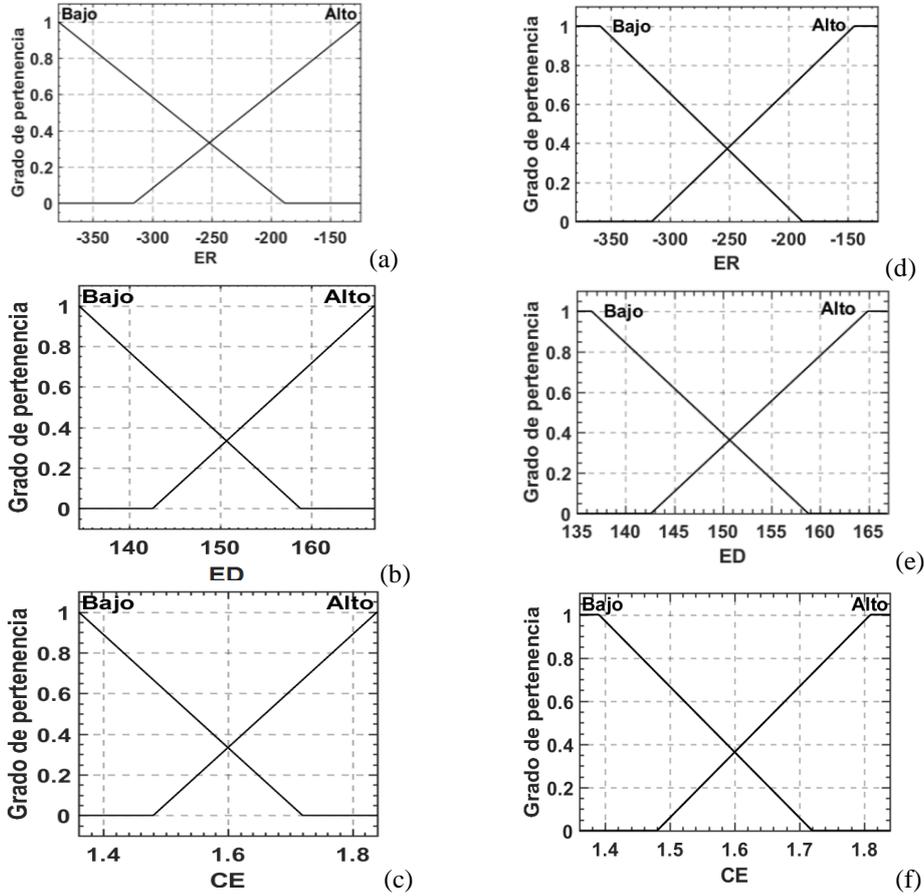


Fig. 3. Funciones de pertenencia de las propiedades de respuesta como variables de entrada: triangulares (a-c), y trapezoidales (d-f).

3.3 Definición de las reglas difusas

El método Mandani se eligió como el motor de inferencia, el cual se basa en la colección de reglas de control del tipo *si-entonces*, y (*if-then, and*, por su nombre en inglés, respectivamente) las cuales se definieron con la siguiente configuración:

- Regla 1: *if ER es Bajo and ED es Bajo and CE es Bajo then IR es MuyBajo*
 Regla 2: *if ER es Bajo and ED es Bajo and CE es Alto then IR es Bajo*
 Regla 3: *if ER es Bajo and ED es Alto and CE es Bajo then IR es Bajo*
 Regla 4: *if ER es Bajo and ED es Alto and CE es Alto then IR es Alto*
 Regla 5: *if ER es Alto and ED es Bajo and CE es Bajo then IR es Bajo*
 Regla 6: *if ER es Alto and ED es Bajo and CE es Alto then IR es Alto*
 Regla 7: *if ER es Alto and ED es Alto and CE es Bajo then IR es Alto*

Regla 8: *if ER es Alto and ED es Alto and CE es Alto then IR es MuyAlto*

3.4 Aplicación del sistema de inferencia difuso

Para la defusificación se definió una variable de salida, designada como índice de respuesta (IR), con cuatro valores lingüísticos: Muy Bajo, Bajo, Alto y Muy Alto, como se puede apreciar en la Fig. 4.

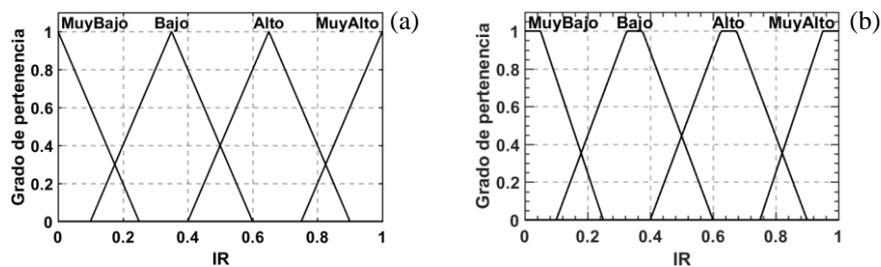


Fig. 4. Funciones de pertenencia de la salida en términos del índice de respuesta (IR). Triangular (a) y trapezoidal (b).

Es importante señalar 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 pertenencia. En la Fig. 5 se muestra el esquema del modelo difuso propuesto descrito en este apartado, tomando como ejemplo un elemento en cada etapa.

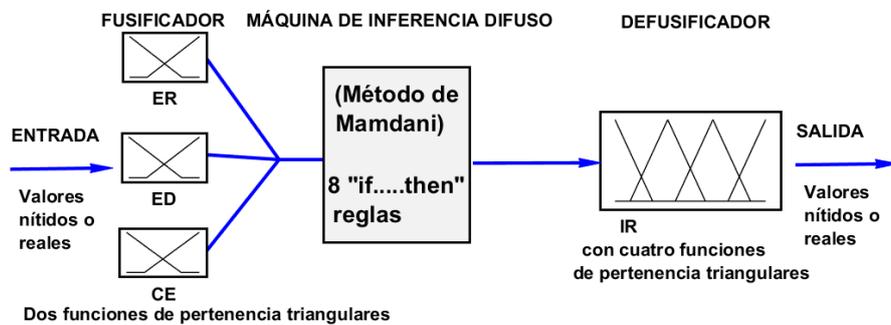


Fig. 5. Representación esquemática de la arquitectura de la unidad de inferencia difusa, ejemplificada con las funciones de pertenencia triangulares.

4 Análisis de resultados

El índice IR determinado de las propiedades multi-respuesta se obtiene utilizando la herramienta de lógica difusa que trabaja con el software comercial Matlab. Los valores

numéricos nítidos se muestran en la Tabla 5. Evidentemente los valores numéricos de cada función de pertenencia utilizada prácticamente no presentan discrepancia significativa, lo que claramente indica que las formas de pertenencia lineales no influyen en el tratamiento de entradas multi-respuesta a fin de alcanzar un índice de respuesta.

Entre más alto sea el valor del IR más alta la posibilidad de que esa corrida experimental represente la óptima. Al respecto, la corrida experimental No. 8 adopta las mejores características de rendimiento múltiple de entre los 16 experimentos para ambas funciones de pertenencia.

Tabla 5. Salida de FIS mostrando los IRs como valores nítidos.

Exp. No.	Valores nítidos de entrada			Valores nítidos de salida (IRs)	
	ER	ED	CE	FP:Triangular	FP: Trapezoidal
1	-124.8	144.61	1.36	0.392	0.391
2	-233.7	145.15	1.55	0.424	0.422
3	-197.2	154.74	1.66	0.647	0.65
4	-246.65	166.9	1.62	0.592	0.594
5	-173.15	135.65	1.56	0.454	0.453
6	-243	147.45	1.72	0.561	0.56
7	-164.95	150.08	1.63	0.593	0.593
8	-245.55	157.55	1.84	0.696	0.698
9	-280	145.26	1.55	0.388	0.387
10	-131.5	153.5	1.58	0.599	0.599
11	-379.2	157.5	1.57	0.455	0.455
12	-149.37	151.75	1.53	0.546	0.546
13	-257.9	134.5	1.45	0.267	0.267
14	-170	159	1.43	0.65	0.65
15	-308.5	157.89	1.57	0.466	0.466
16	-292.3	153.58	1.54	0.423	0.424

La ortogonalidad hace posible extraer el efecto de cada uno de los parámetros de los datos experimentales a sus diferentes niveles, porque cuando se determina el promedio para un nivel de factor, los otros factores en cada uno de sus niveles toman un número equivalente de veces. Así, el promedio de IR para cada uno de los niveles de los parámetros de prueba, al igual que el promedio total de los IRs se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6. Valores promedio IRs para cada nivel de cada factor.

Nivel	Factores de control		
	Shot	Cobertura	Ángulo de incidencia
1	0.51375	0.37525	0.54525
2	0.576	0.5585	0.4605

3	0.497	0.54025	0.53075
4	0.4515	0.56425	0.50175
Max-min	0.1245	0.189	0.08475
Promedio total de IR = 0.510			

En la tabla se exhiben valores delta (máx.-mín.), cuyo número más alto es indicativo del nivel de significancia de un factor en particular. Con la intención de visualizar el grado de significancia de cada parámetro sobre los efectos del SP, en la gráfica de la Fig. 6 se muestra el comportamiento de cada parámetro en términos de los promedios IR por nivel. En este caso, inmediatamente se puede deducir que la cobertura tiene la contribución más alta seguida por el shot y al final el ángulo de incidencia. De la misma tabla de respuesta es posible extraer los parámetros que podrían ofrecer la condición óptima para incrementar la resistencia a la fatiga. De acuerdo con la gráfica, la combinación óptima de parámetros, señalada por las flechas, corresponde a S2, C4 y A1, es decir, de la Tabla 1, shot (A2)=CW20, cobertura (B4) = 400 % y ángulo de incidencia (D1) = 30°. Como se esperaba, este resultado confirma el que se determinó en la Tabla 5, resaltando el experimento 8 como el óptimo, el cual tiene el mismo orden de factores y niveles.

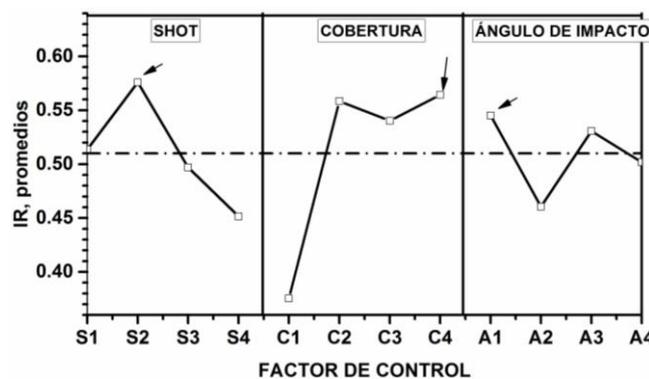


Fig. 6. Factores de control promedio con sus respectivos niveles en términos del IR.

4.1 Pruebas de confirmación

Toda vez que se determinó la combinación óptima de parámetros de procesamiento con base a los efectos que provoca el SP considerados aquí como la multi-respuesta o tres funciones objetivo, se procede a realizar la comparación con la corrida experimental inicial. Los resultados se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7. Resultados experimentales bajo condiciones iniciales y óptimas.

Efectos	Combinación óptima	Resultados experimentales	Condiciones iniciales	Resultados experimentales
---------	--------------------	---------------------------	-----------------------	---------------------------

ER	A2,	B4,	D1	300 MPa	A4,	B4,	D4	373 MPa
ED	(CW20,400%, 30°)			147 HV	(S330,400%,90°)			150 HV
CE				1.3				1.8

Los resultados experimentales exhiben una ligera ganancia en los esfuerzos residuales (ER), quedando prácticamente el mismo nivel de endurecimiento por deformación (ED), pero con un incremento en concentración de esfuerzos (CE) en las condiciones iniciales respecto a la combinación óptima. Este último resultado repercute negativamente en la resistencia a la fatiga, lo que significa que las condiciones óptimas efectivamente resultaron en una mejora significativa, como se puede apreciar en la Fig. 7. Puede observarse, por ejemplo, que, a 300 MPa de esfuerzo aplicado, la probeta sin tratamiento de SP se fractura (falla) por los 150000 ciclos, entre tanto, la probeta con las condiciones iniciales (sin optimizar) fracturó por los 160000 ciclos y la probeta con la que se aplicó tratamiento empleando las condiciones determinadas con lógica difusa se fracturó por los 700000 ciclos. La resistencia a la falla por fatiga se incrementó hasta por un 300% con respecto a las condiciones iniciales.

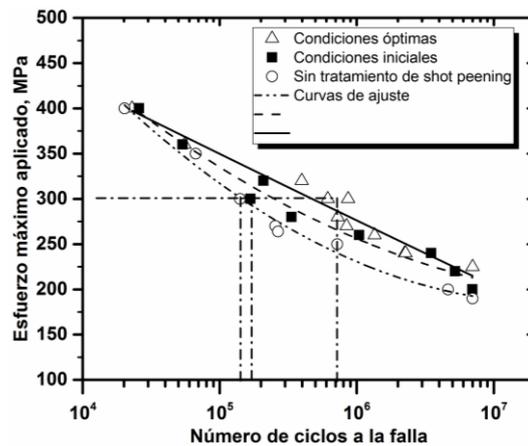


Fig. 7. Curvas S-N, bajo carga axial y amplitud constante para probetas con SP y sin SP.

5 Conclusiones

En relación con los resultados alcanzados en las pruebas de confirmación, se pueden configurar las siguientes conclusiones:

- ⇒ El modelo de inferencia difuso es efectivo para tratar con aplicaciones ingenieriles multi-respuesta, en forma sencilla y con bajo costo. El proceso de shot peening, así como otros procesos de la ingeniería de superficies (como recubrimientos) son factibles para implementar el uso de la inteligencia artificial.
- ⇒ En el presente estudio, el proceso de SP, se determinó una combinación de factores de control, mediante los cuales se generaron las pruebas de fatiga que resultaron con

un incremento apreciable en la resistencia a la fatiga del aluminio 2024-T351, comúnmente utilizado en estructuras de aeronaves.

- ⇒ La metodología asociada entre el diseño de experimentos y lógica difusa ofrece una alternativa positiva en la reducción de tiempo y costo en las investigaciones que tratan con resultados no lineales ya que evita el típico trato de prueba y error, así como la realización de una gran cantidad de experimentos que no ofrecen mejores resultados.
- ⇒ Las funciones de pertenencia lineales no presentan discrepancia significativa cuando se trabaja con respuestas multi-objetivo, por lo que resulta indistinto utilizar la función de pertenencia triangular o trapezoidal para este tipo de aplicaciones.
- ⇒

Referencias

1. Suresh, S., *Fatigue of Materials. Second ed.* . 1998: Cambridge, University press, Cambridge.
2. Miller, K. J., Materials science perspective of metal fatigue resistance. *Materials Science and Technology*. 9(6): p. 453-462, (1993).
3. Chadwick, D. J., Ghanbari, S., Bahr, D. F., and Sangid, M. D., Crack incubation in shot peened AA7050 and mechanism for fatigue enhancement. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 41(1): p. 71-83, (2018).
4. Croccolo, D., Cristofolini, L., Bandini, M., and Freddi, A., Fatigue strength of shot-peened nitrided steel: optimization of process parameters by means of design of the experiment. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 25(7): p. 695, (2002).
5. Khany, S. E., Moyeed, M. A., Siddiqui, M. S., Ahmed, G. M. S., and Baig, M. M. A., An Experimental Study of the Effect of Shot Peening on the Low Carbon Steel and Identification of Optimal Process Parameters. *Materials Today: Proceedings*. 2(4): p. 3363-3370, (2015).
6. Unal, O., Optimization of shot peening parameters by response surface methodology. *Surface and Coatings Technology*. 305: p. 99-109, (2016).
7. George, P. M., Pillai, N., and Shah, N., Optimization of shot peening parameters using Taguchi technique. *Journal of Materials Processing Technology*. 153-154: p. 925-930, (2004).
8. Zadeh, L. A., Toward a theory of fuzzy information granulation and its centrality in human reasoning and fuzzy logic. *Fuzzy Sets and Systems*. 90(2): p. 111-127, (1997).
9. Lin, J. L., Wang, K. S., Yan, B. H., and Tarn, Y. S., Optimization of the electrical discharge machining process based on the Taguchi method with fuzzy logics. *Journal of Materials Processing Technology*. 102(1): p. 48-55, (2000).
10. Gupta, A., Singh, H., and Aggarwal, A., Taguchi-fuzzy multi output optimization (MOO) in high speed CNC turning of AISI P-20 tool steel. *Expert Systems with Applications*. 38(6): p. 6822-6828, (2011).
11. Kamble, P. D., Waghmare, A. C., Askhedkar, R. D., and Sahare, S. B., Multi Objective Optimization of Turning AISI 4340 Steel Considering Spindle Vibration Using Taguchi-Fuzzy Inference System. *Materials Today: Proceedings*. 2(4): p. 3318-3326, (2015).

12. Moayyedian, M., Abhary, K., and Marian, R., Optimization of injection molding process based on fuzzy quality evaluation and Taguchi experimental design. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. (2018).
13. Zadeh, L., Fuzzy sets. *Information and Control*. 8: p. 338-353, (1965).
14. Dubois, D. and Prade, H., *Fuzzy sets and systems: Theory and Applications*. Academic Press. (1980).
15. Kosko, B., Fuzzy systems as universal approximators. *IEEE*. 43(11): p. 1329-1333, (1994).
16. Mandani, Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis, *IEEE Transactions on Computers*. (1977).
17. Nam, Y.-S., Jeon, U., Yoon, H.-K., Shin, B.-C., and Byun, J.-H., Use of response surface methodology for shot peening process optimization of an aircraft structural part. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 87(9): p. 2967-2981, (2016).
18. Rodopoulos, C. A., Curtis, S. A., de los Rios, E. R., and SolisRomero, J., Optimisation of the fatigue resistance of 2024-T351 aluminium alloys by controlled shot peening—methodology, results and analysis. *International Journal of Fatigue*. 26(8): p. 849-856, (2004).



TECNOLOGICO
NACIONAL DE MEXICO



computer
computec
services

Av. Ing. Jose Loreto Fabela #8
Col. La Comunidad
Tlalnepantla Edo. de México
Tel: 6363-0713
computec_cafe@hotmail.com