



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería  
Maestría en Calidad y Productividad

MODELADO DE EFECTOS DE VARIABLES DEL PROCESO DE  
RECUBRIMIENTO ENDURECIDO POR SOLDADURA EN ÁLABES DE TURBINA  
DE BAJA PRESIÓN

Opción de titulación  
**Tesis**

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de  
Maestría en Calidad y Productividad

**Presenta:**

Ing. René Salvador Z. Flores Yáñez

Dirigido por:  
Dra. Aurora Femat Díaz

D.I. Aurora Femat Díaz  
Presidenta

  
Firma

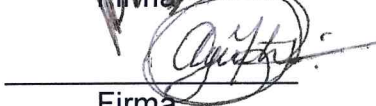
M.I. Javier García Pérez  
Secretario

  
Firma

M.I. Arturo Escoto García  
Vocal

  
Firma

M.A.P José Agustín Martínez Rodríguez  
Suplente

  
Firma

M.I. Eric Leonardo Huerta Manzanilla  
Suplente

  
Firma

  
Dr. Manuel Toledano Ayala  
Director de la Facultad

  
Dra. Mª Guadalupe Flavia Loarca Piña  
Directora de Investigación y Posgrado

Centro Universitario  
Querétaro, Qro.  
Febrero 2019



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería  
Maestría en Calidad y Productividad

MODELADO DE EFECTOS DE VARIABLES DEL PROCESO DE  
RECUBRIMIENTO ENDURECIDO POR SOLDADURA EN ÁLABES DE TURBINA  
DE BAJA PRESIÓN

Opción de titulación  
**Tesis**

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de  
Maestría en Calidad y Productividad

**Presenta:**  
Ing. René Salvador Z. Flores Yáñez

Dirigido por:  
Dra. Aurora Femat Díaz

D.I. Aurora Femat Díaz  
Presidenta

\_\_\_\_\_  
Firma

M.I. Javier García Pérez  
Secretario

\_\_\_\_\_  
Firma

M.I. Arturo Escoto García  
Vocal

\_\_\_\_\_  
Firma

M.A.P José Agustín Martínez Rodríguez  
Suplente

\_\_\_\_\_  
Firma

M.I. Eric Leonardo Huerta Manzanilla  
Suplente

\_\_\_\_\_  
Firma

\_\_\_\_\_  
Dr. Manuel Toledano Ayala  
Director de la Facultad

\_\_\_\_\_  
Dra. M<sup>a</sup> Guadalupe Flavia Loarca Piña  
Directora de Investigación y Posgrado

Centro Universitario  
Querétaro, Qro.  
Febrero 2019

## RESUMEN

Los álabes de turbina de baja presión sufren desgaste y corrosión causados por la misma naturaleza de su función en el turborreactor, así como su interacción con algunos elementos como la fricción, la presión, la temperatura y el medio ambiente.

Con el fin de proveer a los álabes de la turbina de baja presión con propiedades tribológicas, un proceso de endurecimiento por soldadura es utilizado para añadir una aleación base cobalto (KC28WN), resistente a la fricción en los puntos de contacto de la aleación base (DS200+Hf).

El proceso objeto de este trabajo de tesis es el de soldadura por arco en gas tungsteno (GTAW por sus siglas en inglés). Uno de los principales problemas de producción relacionado con este proceso es el agrietamiento por choque térmico. Por lo que se desarrolló un diseño de experimentos factorial completo que incluyera las variables del proceso objeto de estudio para determinar aquellas que mayormente influyeran en las características de calidad del producto. Lo anterior con el objeto de encontrar la mejor combinación de variables y niveles que ayudará a reducir el rechazo causado por el proceso GTAW de endurecimiento.

Los datos recopilados durante la experimentación fueron analizados bajo un MANOVA así como un ANOVA tipo I para poder detectar la variación asociada con cada factor así como su significancia. Se encontró que el tiempo y la corriente así como su interacción, juegan un papel importante en determinar la aparición o el tamaño de las grietas. Posteriormente se realizó una corrida de comprobación para confirmar la efectividad de los resultados experimentales y que permitirá la implementación de esta mejora en campo.

**(Palabras clave:** álabes, GTAW, recubrimiento, cobalto, soldadura, níquel, superaleación).

## SUMMARY

Low pressure turbine blades suffer from wear and corrosion caused by the very nature of their function in a turbojet engine, as well as their interaction with some elements such as friction, pressure, temperature and the environment.

In order to provide the low pressure turbine blades with tribological properties, a welding hardfacing process is used to add a cobalt base alloy (KC28WN), resistant to friction on the contact points of the base alloy (DS200+Hf).

The process scope of this thesis work is GTAW (Gas Tungsten Arc Welding). One of the main production problems related to this process is thermal shock cracking. Therefore, a full factorial design of experiments was developed including the process variables under study to determine those that mostly influence the quality characteristics of the product. The main objective is to find the best combination of variables and levels that will help reduce the rejection caused by the GTAW hardening process.

The data collected during the experimentation was analyzed under a MANOVA as well as a type I ANOVA in order to detect the variation associated with each factor as well as its significance. It was found that time, current and their interaction, play an important role in determining the appearance or size of cracks. Subsequently, a test run was carried out to confirm the effectiveness of the experimental results which allowed the implementations of this improvement in the industrial field.

**(Key words:** blades, GTAW, hardfacing, cobalt, superalloy, welding, nickel).

A mi familia y hasta el cielo, a mi Prietita.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a la Universidad Autónoma de Querétaro por la oportunidad de realizar este trabajo de tesis, a su personal altamente preparado y en entera disposición de contribuir al desarrollo del conocimiento. Asimismo, agradezco al CONACyT por la valiosa beca que ayudó al logro de mis objetivos personales y profesionales.

# TABLA DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	8
ÍNDICE DE TABLAS.....	10
INTRODUCCIÓN .....	12
<b>1. OBJETIVOS .....</b>	<b>15</b>
1.1 JUSTIFICACIÓN .....	16
1.2 VARIABLES DE INVESTIGACIÓN.....	18
1.3 HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN .....	20
1.4 OBJETIVO GENERAL .....	21
1.5 OBJETIVOS PARTICULARES .....	21
1.6 ALCANCES.....	22
1.7 LIMITACIONES .....	22
<b>2. REVISIÓN DE LA LITERATURA.....</b>	<b>22</b>
2.1 REQUERIMIENTOS MECÁNICOS.....	22
2.2 SÚPERALEACIONES .....	24
2.2.1 <i>Propiedades de las súperaleaciones</i> .....	26
2.2.2 <i>Solidificación direccionada (D.S.)</i> .....	27
2.2.3 <i>Súperaleaciones base níquel</i> .....	29
2.2.3.1 <i>Superalación NW12KCA+Hf (DS200+Hf ó MAR-M200+Hf)</i> .....	29
2.3 RECUBRIMIENTO ENDURECEDOR POR SOLDADURA “HARDFACING” .....	31
2.3.1 <i>Usos del recubrimiento endurecido por soldadura en componentes de turbina de baja presión.</i>	32
2.3.2 <i>Métodos de recubrimiento por soldadura</i> .....	32
2.3.2.1 <i>Gas Tungsten Arc Welding (GTAW)</i> .....	33
2.3.2.2 <i>Plasma Transferred Arc Welding (PTAW)</i> .....	36
2.3.3 <i>Aleaciones base cobalto para recubrimientos</i> .....	36
2.4 INSPECCIÓN POR LÍQUIDOS PENETRANTES.....	39
<b>3. MATERIALES Y METODOLOGÍA .....</b>	<b>40</b>
3.1 EQUIPOS Y MATERIALES .....	41
3.2 CONSIDERACIONES DE SEGURIDAD Y ÉTICA.....	41
3.3 INTEGRACIÓN DEL EQUIPO DE PROYECTO.....	41
3.4 CARACTERÍSTICAS DE CALIDAD.....	42

3.5	SELECCIÓN DE LA MUESTRA .....	43
3.6	MEDICIÓN Y RECOLECCIÓN DE DATOS .....	43
3.7	DISEÑO DE EXPERIMENTOS .....	44
3.7.1	<i>Diseño experimental</i> .....	46
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>48</b>
4.1	ANÁLISIS DE DATOS .....	48
4.2	COMPROBACIÓN .....	62
4.3	CONCLUSIONES .....	67
<b>5.</b>	<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>68</b>
<b>6.</b>	<b>APÉNDICE .....</b>	<b>70</b>



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 0.1 Estructura básica de un turborreactor (Visual inspections of commercial jet engines, 2017).....	13
Figura 0.2 Materiales de un turborreactor (Cervenka, 2000).....	14
Figura 1.1 Gama de proceso de producción para los álabes etapa 2 de la turbina de baja presión (Fuente: Elaboración propia).....	16
Figura 1.2 Diagrama de factores de proceso (Fuente: Elaboración propia).....	19
Figura 2.1 Curva esquemática de la vida total de tensión (Williams et al., 2003)..	24
Figura 2.2 Tipos de fundición para álabes de turbina (Giamei, 2013).....	26
Figura 2.3 Proceso de fundición para grano columnar (Duhl and Giamei, 1980)..	28
Figura 2.4 Vistas laterales de un álabe M2 (Fuente: Elaboración propia).....	31
Figura 2.5 Dos álabes de la referencia M2 ensamblados (fuente: Elaboración propia).....	32
Figura 2.6 Esquema de proceso de soldadura TIG (Faraji, 2014).....	34
Figura 2.7 Esquema del proceso de revestimiento PTAW para la deposición de recubrimientos resistentes al desgaste (Mendez et al., 2013).....	36
Figura 3.1 Esquema de indicaciones tipo "A", "B", "C" y "D".....	43
Figura 4.1 Diagrama de cajas para el factor corriente y las variables de respuesta. ....	51
Figura 4.2 Diagrama de cajas para el factor frecuencia y las variables de respuesta.....	52
Figura 4.3 Diagrama de cajas para el factor ángulo de afilado del electrodo y las variables de respuesta. ....	53

Figura 4.4 Diagrama de cajas para el factor flujo de gas protector y las variables de respuesta.....	54
Figura 4.5 Diagrama de cajas para el factor tiempo de incidencia del arco eléctrico y las variables de respuesta. ....	55
Figura 4.6 Diagrama de cajas de la variable de respuesta "Tipo A" respecto a la interacción de las variables tiempo, corriente y frecuencia. ....	56
Figura 4.7 Gráfico de análisis de residuales.....	61
Figura 4.8 Gráfico de análisis de cuantiles residuales. ....	61
Figura 4.9 Pareto de resultados de la corrida de comprobación. ....	63
Figura 4.10 Comparación de tamaño de indicaciones tipo A en muestras "antes" y "después" de la implementación de la mejora.....	65
Figura 4.11 Histograma de frecuencias de tiempo de inducción de arco. ....	66

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Evolución del porcentaje de rechazo a causa de grieta tipo A para los álabes M2 (Fuente: Safran Aircraft Engines, 2017).....	17
Tabla 1.2 Parámetros del proceso de recubrimiento endurecedor por GTAW (Gas Tungsten Arc Welding).....	18
Tabla 2.1 Propiedades físicas típicas de las súperaleaciones (Pollock, 2016).....	26
Tabla 2.2 Composición química de la superaleación MAR-MS200+Hf (Duhl and Giamei, 1980).....	30
Tabla 2.3 Parámetros y niveles experimentales para la mejora en las propiedades contra la erosión por partículas sólidas (Venkatesh et al., 2018).....	35
Tabla 2.4 Tabla de factores y niveles utilizados para la optimización de las características en soldadura de arco manual (Saha and Mondal, 2017).....	35
Tabla 2.5 Propiedades generales que aportan algunos elementos a las aleaciones base cobalto (Cárdenas and Díaz del Castillo, 2015). ....	37
Tabla 2.6 Composición química de la aleación base cobalto KC28WN. Fuente. Selectrac industries. ....	37
Tabla 3.1 Variables, unidades de medida y tolerancias de aceptación del diseño experimental.....	43
Tabla 3.2 Parámetros del proceso de recubrimiento endurecedor por GTAW (Fuente: Elaboración propia).....	45
Tabla 3.3 Factores de proceso y niveles experimentales.....	46
Tabla 3.4 Diseño factorial completo (Fuente: Elaboración propia).....	47
Tabla 4.1 Medias de los resultados experimentales.....	48
Tabla 4.2 Desviaciones estándar de los resultados experimentales. ....	49

Tabla 4.3 MANOVA modelo general para prueba estadística de Pillai. ....	57
Tabla 4.4 MANOVA para la variable de respuesta tipo A.....	57
Tabla 4.5 MANOVA para la variable de respuesta tipo B.....	57
Tabla 4.6 MANOVA para la variable de respuesta tipo C. ....	58
Tabla 4.7 MANOVA para la variable de respuesta tipo D. ....	58
Tabla 4.8 MANOVA para las variables de respuesta en función de los factores tiempo, corriente e interacción. ....	59
Tabla 4.9 ANOVA Tipo I para la variable de respuesta tipo A y los factores tiempo, corriente e interacción. ....	59
Tabla 4.10 Resultados de la regresión lineal.....	60
Tabla 4.11 Resultados de la corrida de comprobación. ....	62
Tabla 4.12 Resultados antes de la implementación de la mejora. ....	64
Tabla 4.13 Resultados de la prueba T. ....	66

## INTRODUCCIÓN

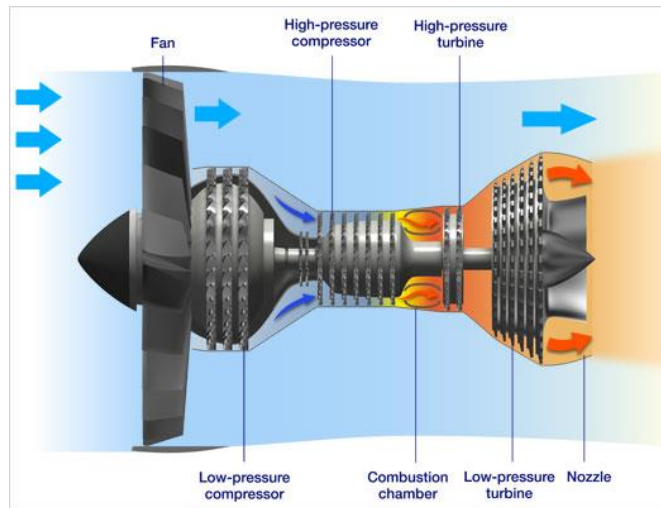
La industria aeroespacial ha evolucionado a lo largo del último siglo, ha progresado de manera exponencial, transportando a más personas y de manera más segura que cualquier otro medio de transporte vigente en el mundo. Al mismo tiempo, los fabricantes de aeronaves han tenido que evolucionar junto con las necesidades del mercado, sin dejar de garantizar la confiabilidad de los elementos componentes de las mismas y cumpliendo con las exigencias de un mercado global y competitivo.

Las exigencias actuales del mercado aeronáutico residen principalmente en disminuir los costos ligados al mantenimiento de las aeronaves, incrementar la eficiencia de combustible y las distancias recorridas, así como la durabilidad de los elementos que componen a las aeronaves. Asimismo, las altas demandas del mercado han llevado a un incremento en la presión económica de los fabricantes de motores (Werner et al., 2014).

Particularmente, en la fabricación de turborreactores, la apuesta principal para lograr cumplir con las exigencias del mercado ha sido el desarrollo científico y la innovación en los materiales con los cuales los componentes de los mismos son elaborados (Pollock, 2016). Dichos materiales necesitan cumplir, por su parte, con características específicas para asegurar su durabilidad y evitar así los altos costos de mantenimiento y recambio por desgaste prematuro.

Los materiales de los componentes principales de un turborreactor están esencialmente ligados a las exigencias de cada una de las etapas del motor (Figura 1.1). Del mismo modo es la economía de combustible la que marca la pauta en el diseño aeroespacial civil moderno. Los compuestos se introdujeron en el diseño de aeronaves con el propósito de mejorar el desempeño (M'Saoubi et al., 2015). Bajo este principio, los principales materiales que componen a un turborreactor se distribuyen como se muestra en la Figura 1.2. Siendo el titano el principal elemento componente de la estructura del fan y el compresor de baja

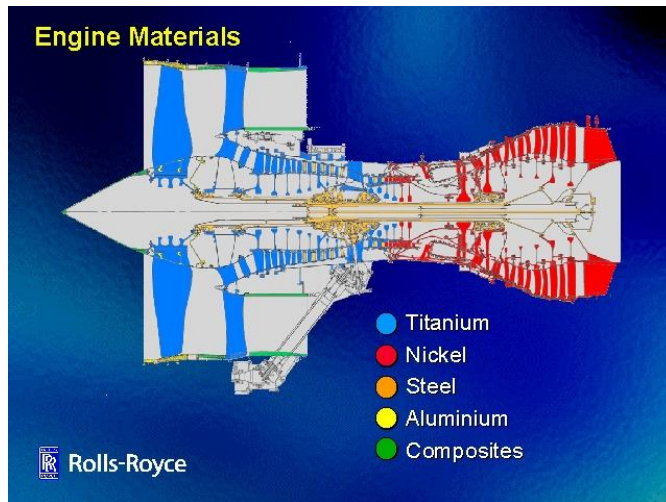
presión; el níquel para la cámara de combustión y la turbina de baja presión y otros elementos como el aluminio y materiales compuestos para componentes externos que recubren al turborreactor.



**Figura 0.1** Estructura básica de un turborreactor (Visual inspections of commercial jet engines, 2017)

Esencialmente, el rendimiento de un turborreactor reside en los materiales que lo componen y que aseguran el correcto funcionamiento del mismo; aquellos que darán mayor vida útil al motor, medida en ciclos despegue-aterrizaje. La presente tesis se centra en el estudio de un componente básico en la turbina de baja presión fabricado en una superaleación base níquel: Los álabes móviles.

El término “superaleaciones” fue primeramente introducido a finales de los años 1950’s para describir aquellos materiales que contaban con alta resistencia mecánica a altas temperaturas y que son principalmente utilizados en las turbinas de gas de motores de aeronaves (Betteridge and Shaw, 1987).



**Figura 0.2** Materiales de un turborreactor (Cervenka, 2000).

Dada la naturaleza del funcionamiento de los álabes de la turbina de baja presión, se presenta el fenómeno de desgaste en estos componentes. Dicho fenómeno es complejo y depende en gran parte de los materiales, medio ambiente y parámetros influyentes como lo son los tipos de interacciones, velocidad de fricción, temperatura, presión, entre otros. Este es el caso de los álabes de turbina; piezas en las cuales algunas partes se encuentran en contacto con otras, esto es conocido también como tribosistemas (Werner et al., 2014).

Para dotar a estas piezas de propiedades tribológicas y resistencia a la corrosión a la que pueden estar sujetas durante su funcionamiento, se emplea una técnica de recubrimiento endurecido por soldadura (también conocida como “revestimiento por fusión”<sup>1</sup>). Este procedimiento es extensamente utilizado en la industria dado su bajo costo en comparación con otros métodos de revestimiento tales como la proyección térmica (Venkatesh et al., 2018).

Existen diferentes procesos de soldadura para la aplicación de recubrimientos endurecedores, tales como: Shielded Metal Arc Welding (SMAW), Gas Tungsten Arc Welding (GTAW), Oxyacetylene Welding (OAW), Plasma

---

<sup>1</sup> “Fusion surfacing” por su nomenclatura en inglés.

Transferred Arc Welding (PTAW) y Submerged Arc Welding (SAW). Entre los diferentes métodos de aplicación del recubrimiento, los mayormente utilizados en la industria aeroespacial son el GTAW y PTAW (Shanmugam and Murugan, 2006a). El GTAW ha sido ampliamente utilizado en la industria de soldadura semiautomática desde hace poco más de medio siglo y más tarde en soldadura automática de muchos metales y aleaciones utilizados en aplicaciones industriales (Ghosh, 2017a). Éste último siendo el proceso objeto de estudio del presente trabajo de tesis.

Los elementos mayormente utilizados para el recubrimiento endurecido por soldadura son a base de cobalto (Co), debido a que las propiedades intrínsecas de su composición química los vuelve resistentes al desgaste. Una de las principales problemáticas de este método de recubrimiento son la aparición de agrietamientos, ya que como resultado de la contracción de la soldadura, la ductilidad del recubrimiento soldado disminuye y aparecen las grietas (Tsai et al., 2014).

El siguiente estudio se basa en la determinación de las variables que mayor influencia aportan al proceso de soldadura, así como los niveles que ayudan a disminuir la aparición de grietas en los álabes de turbina de baja presión, con el fin de aumentar la rentabilidad de su producción en la empresa Safran Aircraft Engines (SAE).

## **1. OBJETIVOS**

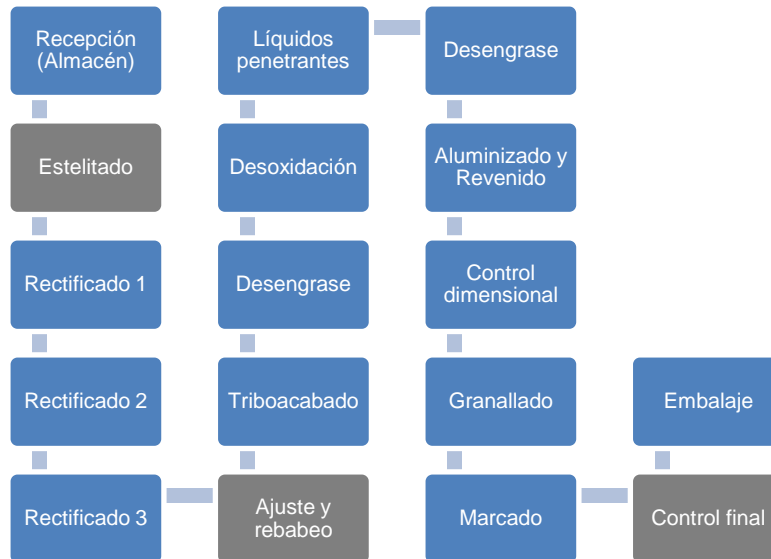
Safran Aircraft Engines produce, entre otros productos, componentes para la turbina de baja presión. Más específicamente los álabes y distribuidores de las etapas 1 y 2 para los motores CFM56 y LEAP. Éste último siendo industrializado desde mediados del año 2016.

Actualmente la producción de componentes para el motor LEAP, en sus dos variantes: LEAP-1A y LEAP-1B, va en incremento, pues será el motor que



reemplazará al CFM56 en las aeronaves emblema de los fabricantes Boeing y Airbus: El 737MAX y el A319Neo respectivamente.

El proceso de producción de los álabes LEAP no difiere de la gama utilizada para CFM56, sin embargo, al tratarse de piezas con geometrías distintas, resulta de particular dificultad en las operaciones manuales, que se muestran en el diagrama 2.1 en color gris. Entre estas tres operaciones, el recubrimiento endurecido por soldadura (también conocido como “estelitaje” en la jerga de la industria aeroespacial) es clave para garantizar la calidad en la producción debido a que ha resultado ser la causa de hasta un 14% de rechazo entre los meses de junio a septiembre 2017.



**Figura 1.1** Gama de proceso de producción para los álabes etapa 2 de la turbina de baja presión (Fuente: Elaboración propia).

### 1.1 Justificación

Las principales razones de rechazo son debidas a grietas en el metal de base, resultado del proceso de estelitado. Estas anomalías son detectadas en la operación de control por líquidos penetrantes y son evaluadas respecto a las exigencias descritas en la documentación de la pieza.

Al ser identificadas, las indicaciones FPI se caracterizan manualmente por medio de espaciadores (laminas) calibrados y/o escalas graduadas. Posteriormente se realiza un reporte para las piezas que no cumplen con las especificaciones de conformidad y se pasan entonces al departamento de calidad para disposición de las piezas rechazadas.

En la Tabla 1.1 se puede observar la evolución del indicador de rechazos respecto a la producción mensual de la referencia álabe M2:

**Tabla 1.1** Evolución del porcentaje de rechazo a causa de grieta tipo A para los álabes M2 (Fuente: Safran Aircraft Engines, 2017)

	JUNIO 2017		JULIO 2017		AGOSTO 2017		SEPTIEMBRE 2017	
Cantidad de piezas producidas →	2592		2717		1848		2400	
	Cant. Scrap	% Scrap	Cant. Scrap	% Scrap	Cant. Scrap	% Scrap	Cant. Scrap	% Scrap
GRIETA TIPO A	260	10.0%	94	3.5%	89	4.8%	326	14%

Actualmente la problemática abordada en este trabajo representa una pérdida importante de recurso en cuanto a piezas rechazadas y sin posibilidad de recuperación. Se estima que el costo promedio de cada pieza rechazada es de \$116.59USD, por lo que el costo de la falta de calidad a causa del proceso de recubrimiento por soldadura asciende hasta \$38,000.00USD. Dicha problemática representa un riesgo potencial para las entregas semanales de esta referencia por posibilidad de no completar las entregas previstas semanales. Hoy en día, para poder mitigar este riesgo, el plan de suministro aumenta proporcionalmente al porcentaje de defectivos, con el propósito de absorber el promedio de partes rechazadas de acuerdo a los registros históricos de los indicadores de calidad, y no comprometer las entregas. Esto también genera actividades sin valor agregado al proceso además de provocar un incremento en inventarios de recepción y calidad por las piezas rechazadas.

## 1.2 Variables de investigación

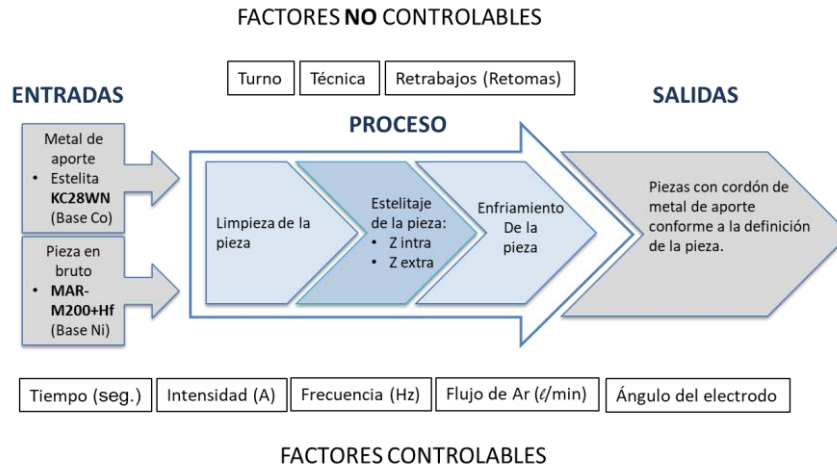
Uno de los primeros pasos en la experimentación, es identificar los factores o parámetros asociados al proceso en cuestión. En el caso de la presente tesis, el recubrimiento endurecido por soldadura GTAW.

La Tabla 1.2 muestra de manera general los parámetros propios del proceso GTAW que pueden ser identificadas en el proceso de soldadura en Safran Aircraft Engines.

**Tabla 1.2** Parámetros del proceso de recubrimiento endurecedor por GTAW (Gas Tungsten Arc Welding).

Parámetros GTAW	Comentarios
Material del electrodo	Tungsteno 2% Cerio ó Tungsteno E3+1.5%La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +0.08%ZrO <sub>3</sub> +0.08%Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Diámetro del electrodo	1.6mm
Gas protector	Argón
Corriente de soldadura	Variable continua, unidades: Amperes.
Frecuencia de pulsos	Variable continua, unidades: Hertz.
Ángulo de filo del electrodo	Variable discreta, valores: 20°, 30°, 40°, 50° y 60°.
Diámetro de la varilla de material de aporte	1.6mm
Tipo de enfriamiento	Variable discreta, valores: Lento, rápido.
Diámetro de la copa cerámica	Variable discreta, valores: #10 ó #12.
Flujo del gas protector	Variable continua, unidades: l/seg.

De la previa lista de factores de proceso, se eligen los más significativos a ser incluidos en el diseño experimental de acuerdo a la experiencia en el proceso, así como en función también de los factores que es posible manipular de acuerdo a las exigencias establecidas por SAFRAN Aircraft Engines. Es entonces que las diferentes variables identificadas en el proceso se muestran en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** de parámetros:



**Figura 1.2** Diagrama de factores de proceso (Fuente: Elaboración propia).

De acuerdo al diagrama anterior, las variables objeto del presente protocolo de tesis son las siguientes:

- Tiempo: Tiempo total de incidencia de la soldadura sobre la pieza. Comienza a contar a partir de la creación del arco eléctrico hasta su corte. Es medido en segundos.
- Intensidad: Es la intensidad medida en amperes utilizada para la creación del arco eléctrico y fusión de la pieza.
- Frecuencia: Es la frecuencia de pulsaciones medida en Hertz que se efectúa sobre la pieza
- Temperatura: Es la temperatura medida en grados Celsius que alcanza la pieza durante el proceso de estelitado.
- Flujo de Argón: Es el flujo de gas protector Argón medido en litros sobre segundo.

Aquellas variables que existen en el proceso pero que no es posible controlar son las siguientes:

- Turno: Es el turno laboral en el que se realiza el proceso de estelitado. Dado que son turnos de 12 horas, puede ser en el primero, de 07:30hrs a 19:30hrs o bien en el segundo, de 19:30hrs a 07:30hrs.
- Técnica: Dado que se trata de un proceso de soldadura manual, la técnica de estelitado varía dependiendo del operador que la lleve a cabo. Las técnicas pueden variar desde si el proceso se lleva a cabo por un operador zurdo o diestro, si el operador se detiene durante el proceso para evaluar su avance, etc.
- Retrabajos (Retomas): Durante el proceso de soldadura, es posible que se presenten faltas de aporte o faltas de unión en la zona estelitada. Por lo anterior, es posible realizar retrabajos de retoma de soldadura. Estos retrabajos son permitidos de acuerdo a la documentación de la pieza y no existe un límite de retomas.

### 1.3 Hipótesis de investigación

Tomando en cuenta las variables anteriormente mencionadas, así como la problemática expuesta, la hipótesis de investigación propuesta es la siguiente:

***“Al disminuir y ajustar la amplitud de rango de las variables intensidad, frecuencia, tiempo y flujo de argón, resultará en una reducción de al menos un 50% en las no conformidades ligadas al proceso de recubrimiento endurecido por soldadura en álabes de la segunda etapa de la turbina de baja presión”.***

#### 1.4 Objetivo General

Con el fin de comprobar o descartar la hipótesis de investigación planteada se formulan los siguientes objetivos generales y específicos:

Objetivo general:

- Alcanzar una disminución de un 50% en el desperdicio a causa del proceso de estelitado en álabes de la etapa 2 de la turbina de baja presión.

#### 1.5 Objetivos particulares

- Determinar los factores significativos a la experimentación, así como las interacciones significativas.
- Encontrar la mejor combinación de parámetros de máquina para disminuir la incidencia en no conformidades ligadas al proceso de estelitado durante el periodo de experimentación de 3 meses.
- Establecer una relación entre las variables: intensidad, frecuencia, tiempo y flujo de argón con el propósito de controlar el proceso.
- Determinar la amplitud de rango de tolerancia para las variables de proceso que mejor se adapte a la operación con el fin de otorgar un margen de libertad para mejor adaptación de los operadores.
- Proponer un modelo de interacción de variables que se adapte al proceso para disminuir la incidencia de no conformidades al término de la experimentación.
- Implementar los cambios a las variables de estudio al proceso de producción normal para un monitoreo de control de 3 meses con el objetivo de comprobar el modelo propuesto.

## 1.6 Alcances

Los resultados obtenidos a través de este proyecto de investigación podrán ser replicados en las demás referencias de álabes de turbina representando un ahorro por costo de no calidad aún mayor.

## 1.7 Limitaciones

Debido al contexto industrial de producción continua en el que se desarrolla la presente experimentación, se está sujeto a la disponibilidad de la producción de la referencia bajo estudio, así como de las necesidades de los demás departamentos involucrados, representando un riesgo potencial en el tiempo de experimentación, análisis de datos, implementación y período de prueba que de este proyecto surjan.

## **2. REVISIÓN DE LA LITERATURA**

La turbina de baja presión está expuesta a diferentes exigencias físicas y mecánicas: Temperaturas que en funcionamiento pueden alcanzar hasta los 1100°C (Pollock, 2016), fuerzas de tensión, atmósferas oxidativas y corrosión por mencionar algunas. Dado lo anterior, desde la década de 1950, álabes especiales y distribuidores para las regiones de alta temperatura de las turbinas, se han elaborado de una combinación de metales basados en el alto punto de fusión del níquel llamadas superaleaciones (Langston, 2015).

### 2.1 Requerimientos mecánicos

El complejo entorno de servicio de los componentes de turbina de baja presión demanda propiedades particulares a las aleaciones de las que están constituidas. Las altas velocidades de rotación generadas en funcionamiento crean esfuerzos centrífugos y vibraciones. Asimismo, el flujo de gas caliente incide con cargas aerodinámicas y altas temperaturas que pueden ser generadores de fatigas térmicas, corrosión u otras formas de desgaste.

Duhl y Giamei (1980) enlistan las propiedades críticas requeridas para los álabes de turbina de baja presión como las siguientes: Resistencia a la fluencia, a la fatiga térmica, a la oxidación y a la corrosión. Estas propiedades deben hacer frente a los dos principales tipos de fatiga de los componentes de un turborreactor: Fatiga de ciclo alto (HCF<sup>2</sup>, por sus siglas en inglés) y la fatiga de ciclo bajo (LCF<sup>3</sup>, por sus siglas en inglés).

La fatiga de ciclo alto (HCF) se presenta en excitación aerodinámica, causada por perturbaciones en el flujo de gas dentro del motor. También a través de vibraciones mecánicas, causadas por un desbalance del rotor y que afecta principalmente a las áreas de contacto de los álabes. Otra forma de HCF es el aleteo de álabes, que se debe a una inestabilidad aerodinámica. Finalmente, la fatiga acústica es también otra forma de HCF (Cowles, 1996). La fatiga de ciclo bajo (LCF) es causada por ciclos térmicos y cargas centrífugas en el ciclo encendido-apagado del motor.

(Williams et al., 2003), mencionan que la vida de inicio de una grieta es estimada por la curva de vida de tensión (Strain-life curve) mostrada en la Figura 2.1 y la fórmula de corrección de esfuerzo medio (Ecuación 2.1).

$$\varepsilon_a^p = \varepsilon_a - \varepsilon_a^e = \varepsilon_a - \frac{\sigma_a}{E}$$

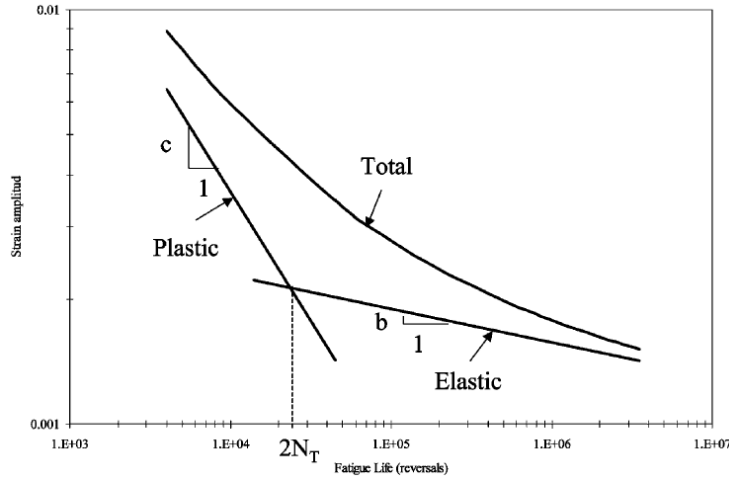
**Ecuación 2.1** Fórmula de corrección de esfuerzo medio (Williams et al., 2003).

---

<sup>2</sup> Alto Cycle Fatigue.

<sup>3</sup> Bajo Cycle Fatigue.





**Figura 2.1** Curva esquemática de la vida total de tensión (Williams et al., 2003).

De la Figura anterior, podemos relacionar la deformación elástica como derivada de esfuerzos relacionados con la HCF, mientras que la deformación plástica se relaciona a los efectos causados por la LCF (Day, 2004a).

## 2.2 Súperaleaciones

Las súperaleaciones base níquel son las más frecuentemente utilizadas para la fabricación de componentes de paso de gases calientes. Lo anterior debido al alto punto de fusión de este elemento. Un amplio rango de estas súperaleaciones se ha desarrollado para alcanzar los requerimientos de rendimiento estructural a altas temperaturas y resistencia ambiental (Henderson et al., 2004a).

La década de los 60's se caracterizó por el uso de materiales de alta resistencia convencionalmente fundidos, tales como la aleación B-1900+Hf<sub>m</sub> IN100 y René80. Los avances que sobrevinieron a finales de los 60's y durante los 70's se centraron en el desarrollo y aplicación de la fundición de solidificación direccionada ("D.S."<sup>4</sup> Por sus siglas en ingles). La introducción de álabes y distribuidores de solidificación unidireccional por Pratt & whitney Aircraft (P&WA),

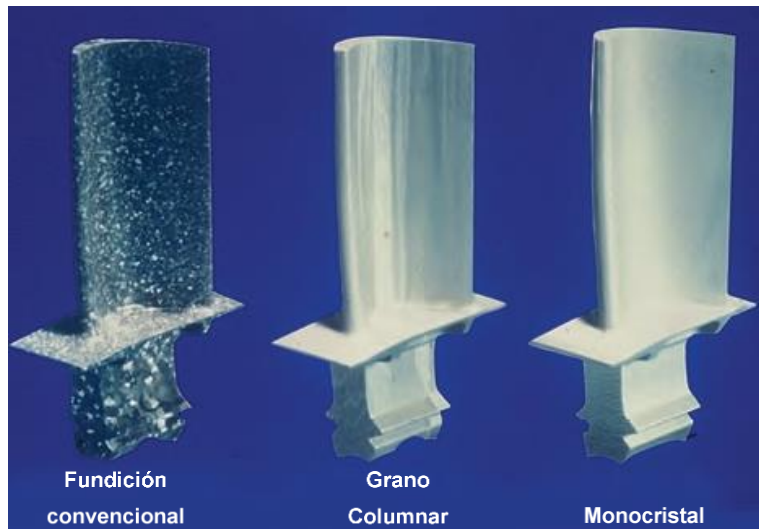
---

<sup>4</sup> Directional Solidification.

dio como resultado mejoras significativas en temperaturas permitidas para metales y velocidad de los rotores. Esta innovación se implementó en un principio en motores militares en el año de 1969 y posteriormente en motores comerciales en 1974.

La solidificación direccionada representó el siguiente paso en la tecnología de la fundición. Las fundiciones D.S. producen componentes con granos columnares largos que corren a través del largo de la dirección de fundición. La base del molde de fundición es enfriada y lentamente descendida para promover el crecimiento de granos columnares. Los álabes de turbina fabricados bajo esta técnica, tienen límites de grano paralelos al eje de vaciado y, por ende, son menos propensos a formarse vacíos a causa de la fluencia ya que éstos se forman en los límites de grano perpendiculares al eje de vaciado, haciéndolos mejores que aquellas aleaciones con estructura de grano equiaxial que tienen la peor resistencia a la fluencia (Day, 2004a; Wang, 2005).

Las aleaciones de grano columnar parecían ideales para la fabricación de álabes de turbina, ya que el estrés primario es axial debido a la fuerza centrífuga proveniente de la rotación a alta velocidad (Giamei, 2013). No fue sino hasta el desarrollo de fundiciones monocristales que se encontró una mejora en la estructura de grano para componentes de turbina. En la Figura 2.2 se pueden apreciar los diferentes tipos de fundición para el mismo componente, un álabe de turbina.



**Figura 2.2** Tipos de fundición para álabes de turbina (Giamei, 2013).

### 2.2.1 Propiedades de las súperaleaciones

Las súperaleaciones constituyen una de las principales fuentes de materiales para la fabricación de motores de avión dada su combinación única de propiedades físicas y mecánicas. En la Tabla 2.1 se pueden apreciar las principales propiedades de las súperaleaciones.

**Tabla 2.1** Propiedades físicas típicas de las súperaleaciones (Pollock, 2016).

Propiedad	Rangos Típicos
Densidad	7.7-9.0 g/cm <sup>3</sup>
Temperatura de fundición	1320-1450°C
Módulo elástico	Temperatura ambiente: 210 GPa. 800°C: 160 GPa.
Expansión térmica	8–18 x 10 <sup>-6</sup> /°C
Conductividad térmica	Temperatura ambiente: 11 W/m·K 800°C: 22 W/m·K

Las propiedades mecánicas de principal interés incluyen: Propiedades de tensión, fluencia, fatiga y crecimiento cíclico de grietas. Dependiendo de los

detalles del componente fabricado en superaleación, cualquiera de estas cuatro propiedades pueden ser limitantes de vida útil del componente (Pollock, 2016).

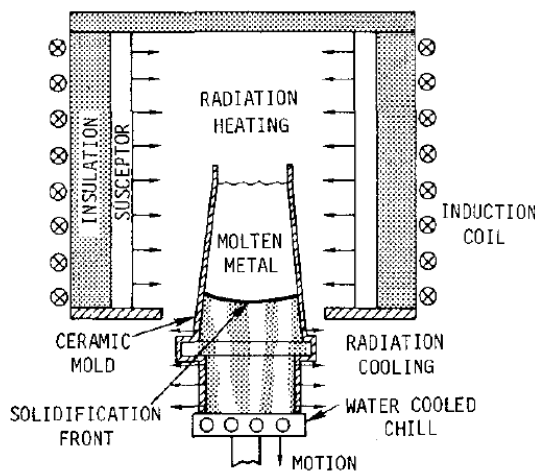
- a. Propiedades de tensión: Las súperaleaciones base níquel tienen una fuerza de tensión relativamente alta que normalmente se encuentra entre el rango de 900-1300 MPa y entre 1200-1600 MPa a temperatura ambiente.
- b. Propiedades de fluencia: Dado que las súperaleaciones experimentan periodos extensos bajo esfuerzos a altas temperaturas, una alta resistencia a la deformación por fluencia es necesaria. Esto es de suma importancia para los álabes ya que estarán expuestos a temperaturas de hasta 1100°C.
- c. Fatiga y crecimiento de grieta por fatiga: Los componentes de turbina están sujetos a fluctuaciones significativas en esfuerzos y temperatura durante los ciclos repetitivos de despegue, crucero y aterrizaje. Dichos ciclos pueden resultar en pequeñas distensiones plásticas localizadas. En ciclo bajo, la fatiga de baja frecuencia es de interés para el diseño de motores. Las vibraciones y el flujo de aire a través de las diferentes etapas de la turbina puede resultar también en fatiga de ciclo alto (HCF) con una rápida acumulación de ciclos en los álabes a frecuencias mucho más altas en el rango de kHz.

### 2.2.2 Solidificación direccional (D.S.)

Frank VerSnyder, antiguo investigador de la compañía manufacturera de motores de avión General Electric, desarrolló un concepto que iba más allá de la fundición convencional ya que eliminaba los límites de grano en múltiples direcciones a lo largo de los álabes durante la fundición. La primera invención de VerSnyder y patente de Pratt & Whitney, desarrollada en 1966, fue un álabe de turbina que sólo contenía granos columnares formados a lo largo de todo el álabe. VerSnyder logró esta formación de grano a través de un proceso llamado

“solidificación direccional” que después perfeccionaría para lograr la fundición monocristalina (Giamei, 2013; Langston, 2015).

La solidificación direccional se lleva a cabo en un horno de vacío. Esta consiste en vaciar la superaleación metálica en un molde cerámico que contiene alúmina, sílice y/o zirconio (Pollock, 2016). El horno montado verticalmente es calentado a temperaturas de fundición metálica y llenado desde el fondo hacia la punta. El fondo del molde está formado por una placa de cobre enfriada con agua y que tiene una superficie moleteada que se encuentra expuesta al metal fundido. La superficie que se encuentra en contacto con el metal fundido, al enfriarse, causa que se formen cristales en la superaleación líquida y entonces la interface sólida avanza (Langston, 2015).



**Figura 2.3** Proceso de fundición para grano columnar (Duhl and Giamei, 1980).

Una cubierta con temperatura controlada rodea el molde y mantiene una distribución de temperatura uniforme en las superficies externas del molde para que el calor latente de la solidificación sea removido a través de su conducción por la superaleación solidificada hacia la placa de enfriamiento (Figura 2.3). Mientras la solidificación avanza desde el fondo hacia arriba, el molde es lentamente descendido de su cubierta de temperatura controlada (Langston, 2015).

El resultado final es un álabe de turbina compuesto de cristales columnares. En el caso de los álabes móviles de turbina, donde la fuerza centrífuga ejercida cuando el motor se encuentra en funcionamiento alcanza aceleraciones de hasta 20,000 veces la fuerza de gravedad, los granos columnares, que se encuentran alineados paralelamente al eje de mayor esfuerzo, dan mayor resistencia al álabe y ayudan a eliminar los inicios de agrietamiento entre granos. En las operaciones de turbinas de gas, la solidificación direccionada ha mejorado de manera considerable la ductilidad y la vida de fatiga térmica (Langston, 2015).

### 2.2.3 Súperaleaciones base níquel

Las súperaleaciones base níquel tienen una temperatura de servicio máxima de hasta 1200°C y nuevas aleaciones se están desarrollando con el fin de aumentar este límite de temperatura. Sin embargo, la temperatura no es la única condicional a considerar cuando se diseña y fabrica un álabe de turbina. Algunos de los elementos aleantes como el cromo, son comunes, dada su habilidad de crear una capa protectora contra el óxido en la superficie del componente. Otros elementos comunes en aleaciones base níquel son el titanio, el aluminio, el cobalto y el molibdeno, que son agregados con el fin de dar fuerza.

#### 2.2.3.1 Superaleación NW12KCA+Hf (DS200+Hf ó MAR-M200+Hf)

La mayoría de las súperaleaciones base níquel comerciales contienen, además del Ni que es el elemento principal de la aleación, otros elementos tales como: Al o Ti (hasta un 8%), Cr (entre 10-20%) que es esencial para la resistencia a la oxidación, Co (5-10%), y (en pequeñas proporciones) que ayuda principalmente a la cascarilla de óxido a cohesionar al sustrato, y pequeñas cantidades de Br, Zr y C. Algunas otras adiciones comunes son: Mo, W, Ta, Hf y Nb (Cárdenas and Díaz del Castillo, 2015).

La aleación aquí estudiada, DS200+Hf, tiene un alto contenido de Hafnio, que fue elegido con el fin de lograr una mayor fuerza de unión de grano a altas

temperaturas, lo cual es de suma importancia para garantizar la durabilidad durante el servicio en operación. La Tabla 2.2 muestra la composición química estándar de esta superaleación.

**Tabla 2.2** Composición química de la superaleación MAR-MS200+Hf (Duhl and Giamei, 1980).

	<b>W</b>	<b>Cr</b>	<b>Al</b>	<b>Ti</b>	<b>Cb</b>	<b>Co</b>	<b>Hf</b>	<b>C</b>	<b>B</b>	<b>Zr</b>	<b>Ni</b>
<b>D.S.</b>											
<b>MAR-M200+Hf</b>	12%	9%	5%	2%	1%	10%	1.8%	0.14%	0.02%	0.08%	Bal.

A pesar de tratarse de una superaleación desarrollada hace ya más de 40 años, aún es usada para el diseño de componentes de motores de avión modernos, básicamente gracias a su excelente colabilidad que permite formas de perfiles sofisticadas y bordes de fuga extremadamente delgados (Mataveli Suave et al., 2016).

Los álabes móviles (Figura 2.4) de la turbina de baja presión son fabricados en súperaleaciones base níquel que, de manera general, les otorga propiedades físicas y mecánicas importantes para su correcto desempeño bajo altas temperaturas. Estos son componentes resistentes a la corrosión y oxidación a altas temperaturas, cuentan con buena resistencia mecánica, resistencia a la fluencia y a la fatiga, y con buena estabilidad superficial.



**Figura 2.4** Vistas laterales de un álabo M2 (Fuente: Elaboración propia).

### 2.3 Recubrimiento endurecedor por soldadura “Hardfacing”<sup>5</sup>

La soldadura es un procedimiento utilizado para unir materiales diferentes. Es un procedimiento más efectivo en términos de costo y a la vez más rápido que procesos como la fundición. Los procesos de revestimiento por fusión, son básicamente utilizados con el fin de ampliar o mejorar la vida de servicio de ciertos componentes (Saha and Mondal, 2017).

El proceso de recubrimiento endurecedor, “Hardfacing” por su nomenclatura en inglés, y “estelitado” por su nomenclatura dentro del marco de esta investigación en SAEM, es utilizado para obtener propiedades específicas en un material a través de la deposición integral de una capa de metal o aleación sobre una superficie.

Particularmente, el recubrimiento endurecedor lidia con la preservación de las partes, protegiéndolas de elementos ambientales, químicos o de desgaste, siendo este último uno de los que mayor impacto tiene sobre los costos de ciclos de vida en los componentes de motores (Werner et al., 2014).

---

<sup>5</sup> “Hardfacing” por su nomenclatura en inglés.



### 2.3.1 Usos del recubrimiento endurecido por soldadura en componentes de turbina de baja presión.



**Figura 2.5** Dos álabes de la referencia M2 ensamblados (fuente: Elaboración propia).

La necesidad de este proceso en la fabricación de álabes de turbina de baja presión reside en el daño potencial por desgaste en la zona “Z”, como se puede apreciar al ensamblar 2 álabes en la Figura 2.5, Ya que esta es una sección de contacto y fricción constante con otros álabes.

El fenómeno de desgaste es complejo y depende generalmente de factores como el tipo de interacción de los componentes, la velocidad de fricción, presión, temperatura, etc. (Werner et al., 2014). Este es el caso de los álabes de turbina de baja presión, donde varias zonas se encuentran en contacto con otros componentes. De éstos tribosistemas, aquel formado por el contacto entre los talones de los álabes en las zonas “Z”, genera un desgaste por fricción e impacto y con el fin de mitigar o reducir este tipo de desgaste, un revestimiento endurecido por soldadura es aplicado en esta zona durante la producción de estos componentes.

### 2.3.2 Métodos de recubrimiento por soldadura

Existen diferentes procesos de soldadura para la aplicación de recubrimientos endurecedores, tales como: Shielded Metal Arc Welding (SMAW), Gas Tungsten Arc Welding (GTAW), Oxyacetylene Welding (OAW), Plasma Transferred Arc Welding (PTAW) y Submerged Arc Welding (SAW).

Sin embargo, entre los diferentes métodos de aplicación del recubrimiento, los mayormente utilizados en la industria aeroespacial son el GTAW y PTAW (Shanmugam and Murugan, 2006a).

#### *2.3.2.1 Gas Tungsten Arc Welding (GTAW)*

También conocido como “TIG”<sup>6</sup> por el uso de argón como gas protector y electrodos de tungsteno, el GTAW ha sido ampliamente utilizado en la industria de soldadura semiautomática desde hace poco más de medio siglo y más tarde en soldadura automática de muchos metales y aleaciones utilizados en aplicaciones industriales (Ghosh, 2017b). Tradicionalmente, las reparaciones y rehabilitaciones de aleaciones de níquel son también conducidas con soldadura GTAW y estos métodos se encuentran bien establecidos en la industria aeroespacial, así como para las turbinas de gas.

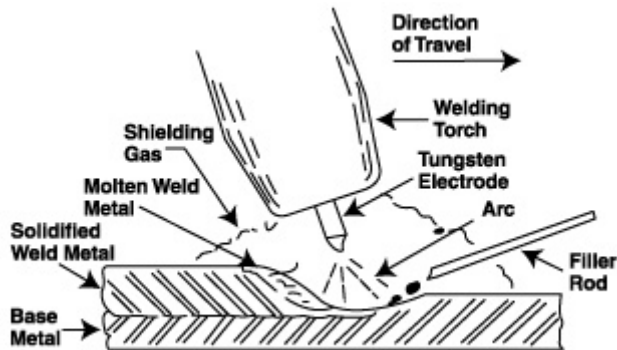
El término GTAW es actualmente más utilizado dado el uso de otras mezclas de gas diferentes al argón y helio, este método trajo consigo un cambio en las prácticas de soldadura, ya que el electrodo no es consumido por el proceso y puede actuar como ánodo y cátodo. También puede ser utilizado con corriente alterna o directa dependiendo del metal que se procese (Day, 2004a).

Un arco es generado entre el electrodo de tungsteno y la pieza en proceso. El calor del arco ioniza el gas protector entre el espacio del electrodo y el metal, produciendo un calor intenso y luz en un arco cónico. La gota fundida es protegida de la oxidación por el gas protector que frecuentemente es argón. La deposición del revestimiento bajo el proceso GTAW, requiere que la aleación a ser depositada se encuentre en forma de alambre, para que manualmente sea alimentado en la pieza sustrato y forme una gota en la superficie de trabajo (Day, 2004b). El metal de aporte no pasa a través del arco sino que es insertado directamente en la gota de fundición y fundido dentro de la atmósfera protectora

---

<sup>6</sup> Tungsten Inert Gas Welding

del gas argón por el calor que genera la pieza (Wang, 2005). Este proceso se puede apreciar en la Figura 2.6.



**Figura 2.6** Esquema de proceso de soldadura TIG (Faraji, 2014).

Asimismo, la soldadura GTA presenta varias ventajas respecto al resto de los métodos: Calidad de soldadura superior, alta precisión y bajo costo de equipamiento (Cornu, 1988). Entre los materiales más utilizados para mejorar las propiedades de la superficie endurecida de partes metálicas, las aleaciones de cobalto son las que lideran en el proceso de recubrimientos endurecedores por soldadura.

Tsai et al. (2014) utilizaron esta técnica de revestimiento para demostrar que un tratamiento de granallado sobre la soldadura, es de ayuda para mitigar el estrés residual por ella causado e induciendo un gran número de límites de grano de ángulo bajo, lo que ayuda a prevenir la propagación de grietas causadas por la soldadura. Para esta experimentación, estableció el proceso a una corriente de 140A y a una velocidad de avance de soldadura de 10 cm/min.

Venkatesh, et al. (2018) en búsqueda de una mejora en las propiedades de recubrimientos base cobalto contra la erosión por partículas sólidas, decidieron experimentar evaluando la influencia de las condiciones de proceso TIG en temperatura ambiente tomando en cuenta las variables voltaje, corriente, velocidad de soldadura y presión de gas protector, así como los niveles descritos en la Tabla 2.3 y tomando como resultado, entre otros, la dureza de la soldadura.

**Tabla 2.3** Parámetros y niveles experimentales para la mejora en las propiedades contra la erosión por partículas sólidas (Venkatesh et al., 2018).

<b>Parámetros</b>	<b>Valores</b>
Voltaje aplicado (V)	440
Corriente aplicada (A)	70, 80 y 90
Velocidad de soldadura (mm/seg)	2.25, 2.75 y 3.00
Presión (kg/cm <sup>2</sup> ) de gas (argón)	10

Los resultados de esta experimentación fueron satisfactorios, obteniendo una mejora sustancial en la resistencia del sustrato a la corrosión.

Asimismo, Saha y Mondal (2017), establecieron los parámetros y niveles mostrados en la Tabla 2.4 para la experimentación que los llevaría a encontrar la mejor combinación de niveles con el fin de optimizar la soldadura de arco manual (MMAW<sup>7</sup>) basándose en un sistema de análisis de función deseada junto con la idea de diseño robusto de Taguchi. Tomando como variables de salida el ancho del cordón de soldadura, la penetración de la soldadura en la unión de dos partes y la dureza del cordón.

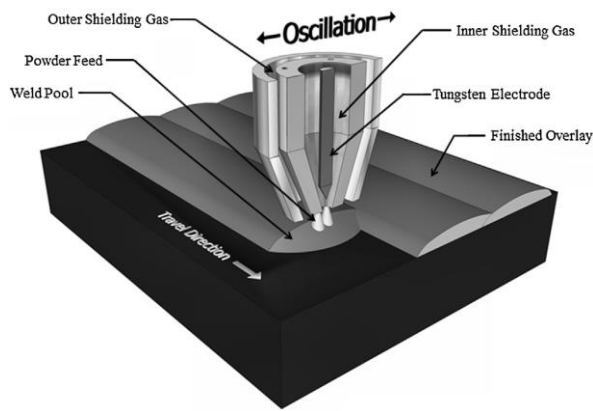
**Tabla 2.4** Tabla de factores y niveles utilizados para la optimización de las características en soldadura de arco manual (Saha and Mondal, 2017).

<b>Factor</b>	<b>Nivel bajo</b>	<b>Nivel Alto</b>
Corriente de soldadura (A)	140	160
Voltaje de arco (V)	17	25
Velocidad de soldadura (mm/min)	20	60

<sup>7</sup> Manual Metal Arc Welding.

### 2.3.2.2 Plasma Transferred Arc Welding (PTAW)

El PTAW es un proceso especial de soldadura utilizado para la deposición de revestimientos protectores resistentes al desgaste sobre superficies metálicas. El PTAW es parecido al proceso GTAW en que un arco es formado entre un electrodo de tungsteno y el metal de base rodeado de un gas protector que ayuda a evitar la oxidación y a que contaminantes externos afecten la calidad de la soldadura. Sin embargo, la antorcha PTAW utiliza un constrictor de arco enfriado por agua que incrementa la densidad del arco, también, a diferencia del GTAW donde el consumible se encuentra en forma de alambre, el PTAW típicamente usa consumibles en polvos que son proyectados alrededor del arco (Mendez et al., 2013). En la Figura 2.7 se aprecia el esquema de funcionamiento de la soldadura PTAW.



**Figura 2.7** Esquema del proceso de revestimiento PTAW para la deposición de recubrimientos resistentes al desgaste (Mendez et al., 2013).

### 2.3.3 Aleaciones base cobalto para recubrimientos

Las aleaciones base cobalto para recubrimientos resistentes al desgaste, son ideales debido a su resistencia al calor, por lo que suelen emplearse para el revestimiento de componentes expuestos a temperaturas mayores a los 1,000°C. Estas aleaciones cuentan también con una excelente resistencia al desgaste y propiedades mecánicas a altas temperaturas. Asimismo, contienen metales refractarios, carburos metálicos y niveles elevados de cromo con el fin de

aumentar la resistencia a la corrosión. En la Tabla 2.5 se muestran las principales propiedades que aportan algunos de los elementos de aleación en aleaciones a base de cobalto.

**Tabla 2.5** Propiedades generales que aportan algunos elementos a las aleaciones base cobalto (Cárdenas and Díaz del Castillo, 2015).

METAL	PROPIEDAD GENÉRICA
Co	Rigidez, dureza y resistencia.
Cr	Resistencia a la corrosión.
Mo	Aumenta dureza y resistencia.
Si	Mejora la fluidez durante la fundición.
Mn	Mejora la fluidez durante la fundición.
C	Aumenta la dureza y resistencia.

Es gracias a las propiedades de estas aleaciones que son la elección para los recubrimientos endurecidos en álabes de turbina, ya que resisten los esfuerzos y condiciones del entorno de funcionamiento mejor que la aleación de base, aquella que compone a la pieza.

La aleación utilizada para el presente trabajo de tesis es KC28WN, por su nomenclatura de acuerdo con la AFNOR<sup>8</sup>, también conocida como “Stellite”, se compone por los siguientes elementos y porcentajes mostrados en la siguiente tabla.

**Tabla 2.6** Composición química de la aleación base cobalto KC28WN. Fuente. Selectrac industries.

AFNOR	C	Si	Mn	Cr	Ni	W	Fe	B	V	Co
<b>KC28WN</b>	0.85%	0.6%	0.3%	28%	5.8%	20%	<3%	<0.05%	1%	Bal.

<sup>8</sup> Association Française de Normalisation

La característica más importante y que tiene relación directa con la calidad de los depósitos endurecedores es el grado de dilución de este con el metal de base. El control de la dilución resulta en mejores propiedades metalúrgicas y mecánicas del depósito endurecedor (Shanmugam and Murugan, 2006b; Das et al., 2007).

Asimismo, los métodos de recubrimiento endurecedor por soldadura, cuyo principio es la unión metalúrgica entre el recubrimiento y el sustrato, si bien pueden afectar la microestructura del sustrato (metal de base), pueden proveer mejor resistencia al desgaste si la dilución es controlada (Day, 2004b).

Actualmente, existe un creciente requerimiento para llevar a cabo soldaduras de alta integridad y libre de defectos (o limitados), con alta capacidad de resistencia mecánica a altas temperaturas. Aleaciones de endurecimiento por precipitación como el IN718, Waspaloy IN939, IN738, entre otros, así como aleaciones más avanzadas como aquellas de solidificación direccionada y monocristales como el MAR-M247, MAR-M200+Hf, CMSX-4 que son utilizadas para la manufactura de una gama de componentes para paso de gases calientes como discos, carcasas, segmentos de estatores y álabes de turbina.

La soldadura de tales componentes presenta una problemática considerable, debido a su naturaleza de alta aleación y sus límites de grano más complejos. Es sabido que los límites de grano pueden ser considerados como “fases” cuasi bidimensionales que pueden sufrir transiciones de fases en las cuales su estructura y química cambia abruptamente en valores críticos de parámetros termodinámicos (Cantwell *et al.*, 2014). Es por ello por lo que las capacidades inherentes a dichas aleaciones frecuentemente interactúan de manera perjudicial con las cargas térmicas y mecánicas generadas por la fuente de calor, la masa del componente y las limitantes aplicadas al proceso de soldadura.

En un intento de minimizar estas interacciones, algunas aleaciones son soldadas en condiciones de recocido o ablandadas, sin embargo, a pesar de estos

esfuerzos, las aleaciones de mayor endurecido continúan a ser susceptibles a 3 tipos de agrietamientos y defectos: Agrietamiento por solidificación, agrietamiento por recalentamiento y fisuración de zona afectada térmicamente (Henderson et al., 2004b).

#### 2.4 Inspección por líquidos penetrantes

Todo tipo de agrietamiento o fisura ocasionada por un proceso de soldadura puede ser detectado a través de un control no destructivo. Algunos de estos controles pueden ser: Inspección por partículas magnéticas (MPI), Pruebas ultrasónicas (UT), Prueba por corriente de Eddy e inspección por líquidos penetrantes (FPI<sup>9</sup>). Siendo este último, el tipo de control utilizado en Safran Aircraft Engines.

La inspección por líquidos penetrantes es un control no destructivo ampliamente utilizado en la industria aeroespacial ya que, comparado con otras pruebas no destructivas, resulta más económica, fácil de aplicar y mejor para inspeccionar partes aeroespaciales con pequeños defectos superficiales y geometrías complejas. Además, con FPI se pueden procesar un gran número de partes o áreas de superficie, lo que vuelve a este tipo de control uno de los más efectivos en cuanto a costo y que mantiene alta sensibilidad en tareas de inspección tales como la detección de defectos en álabes de turbina (Zheng et al., 2015a).

Actualmente, la inspección FPI se apoya enormemente en personal de inspección, es decir que las discontinuidades y grietas son detectadas por el ojo humano bajo la luz ultravioleta por lo que, dependiendo del entrenamiento y experiencia del inspector, los resultados pueden variar entre ellos.

En estudios recientes se han desarrollado patentes y métodos para la inspección a través de procesamiento de imágenes. A. Femat-Díaz *et al* (2013),

---

<sup>9</sup> Fluorescent Penetrant Inspection.



desarrollaron una técnica para la caracterización de microgrietas en recubrimientos endurecedores. Por otro lado Jeffrey P. Nissen y Edward Hohman (2015) desarrollaron una patente para un sistema y método que sirve a la detección de desperfectos en una parte a través de capturas de imágenes y la detección de éstos por medio de un algoritmo computarizado. Las indicaciones se perciben de un verde brillante y el fondo es comparativamente oscuro, en lugar de utilizar la imagen RGB (Red, Green and blue) estándar en función de escala de grises (Ecuación 4.1), se encontró que los componentes verdes del RGB original pueden sobresaltar las indicaciones verdes de las imágenes FPI.

$$Greyscale = 0.299 \times R + 0.587 \times G + 0.114 \times B \dots$$

**Ecuación 2.2** Función RGB a escala de grises (Zheng et al., 2015b).

Jeffrey P. Nissen y Edward Hohman desarrollaron una técnica para enaltecer los verdes de una imagen RGB, suavizar la imagen y reducir el ruido junto con funciones de segmentación de imagen que combinan operaciones morfológicas con el método de umbral de Otsu y la detección de borde de Canny para segmentar la imagen de entrada. La imagen es entonces separada en una imagen de fondo y una de primer plano y una imagen de mapa de bits para la indicación. La función de extracción y de clasificación fue desarrollada para clasificar las indicaciones en dos tipos y cuatro clases. Finalmente desarrollaron un software que puede ayudar a personal de inspección a llevar a cabo análisis FPI para medir y clasificar de manera efectiva las indicaciones encontradas.

### 3. MATERIALES Y METODOLOGÍA

Dado que la presente experimentación tuvo lugar en una planta de producción del ramo aeroespacial, dedicada a la fabricación de álabes y distribuidores de turbina, la información sensible es tratada bajo confidencialidad por parte del autor respetando los lineamientos en vigor de la empresa al momento de la realización del presente trabajo de tesis.

### 3.1 Equipos y materiales

Los equipos y materiales utilizados para los diferentes procesos involucrados en la presente experimentación son los siguientes:

- Soldadura TIG (GTAW): TransTIG 2200 Job, Fronius International.
  - Gas protector: Argon pureza 99%
- Línea de inspección por líquidos penetrantes: PROCECO 504.
  - Líquido penetrante: RC65 Sensibilidad 3, Sherwin Williams.
  - Emulsificante Hidrofílico: ER83A, Sherwin Williams.
  - Polvo revelador: Polvo seco D-90G, Sherwin Williams.
- Línea de desengrase y limpieza: ELMA.
  - Desengrasante: ARDROX 6333A.
  - Líquido de enjuague: Agua desionizada.

### 3.2 Consideraciones de seguridad y ética

La operación de estelitado, dado que implica la manipulación de equipo de soldadura y partes extremadamente calientes y de acuerdo a los reglamentos internos de ergonomía y seguridad de Safran Aircraft Engines, debe ser realizada considerando el siguiente equipo de protección personal: Careta para soldadura con un mínimo de sombra 8, guantes para alta temperatura (opción de guantes de carnaza) y camisola de algodón resistente al fuego.

El presente proyecto no implica riesgos adicionales a los ya considerados por el departamento de seguridad e higiene de SAEM. Asimismo, la realización del presente no involucra aspectos éticos fuera de la relación estrictamente laboral y dentro del lugar de trabajo, tampoco se comprometen conflictos de interés ni puntos que deban ser sometidos a consideración por el “Sindicato nacional de trabajadores de la industria arnesera, eléctrica, automotriz y aeronáutica de la república mexicana”.

### 3.3 Integración del equipo de proyecto

Para el desarrollo del presente proyecto de experimentación se formó el equipo pluridisciplinario compuesto del siguiente personal:

- a) Personal operativo: Un operador experimentado de los 12 que actualmente realizan la operación.
- b) Técnico de calidad: Es el técnico responsable de los indicadores de calidad de la pieza bajo estudio.
- c) Ingeniero de calidad: Es el ingeniero a cargo de las acciones, seguimiento y estudios realizados a la referencia bajo estudio.
- d) Ingeniero de procesos especiales: Es el ingeniero especialista en la operación de estelitado. Responsable del proceso y la documentación que lo rige.
- e) Ingeniero de proyectos: Es el responsable de la validación de los cambios realizados a la referencia estudiada.
- f) Especialista nivel 2 en líquidos penetrantes: Es la responsable experta del proceso de inspección por líquidos penetrantes.

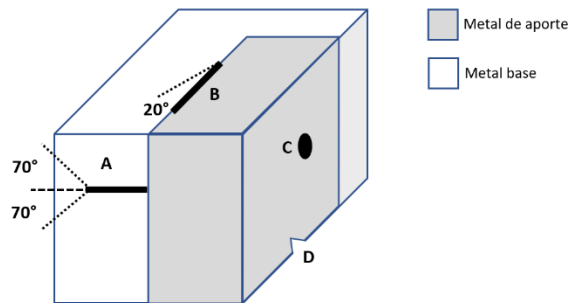
Los operadores siguen un proceso de habilitación ante una entidad externa que forma y certifica bajo la norma ISO-24394: Soldadura para aplicaciones aeroespaciales.

### 3.4 Características de calidad

La principal causa de rechazo en la referencia objeto de estudio, es la grieta "tipo A", sin embargo, existen otras anomalías producto del proceso GTAW de recubrimiento endurecido y que son decisivas en el criterio de aceptación de las piezas de acuerdo a la documentación vigente de las mismas.

Para efectos de la presente investigación y conservando la confidencialidad de la propiedad intelectual de Safran Aircraft Engines, llamaremos indicaciones tipo "B", "C" y "D" a aquellas otras anomalías originadas por el proceso GTAW y que se esquematizan en la Figura 3.1. La relevancia de estas indicaciones metalúrgicas es que pueden presentarse todas ellas en un solo espécimen, encontrarse dentro de las tolerancias especificadas por la

documentación de la pieza y resultar aceptadas. De lo contrario, de encontrarse una sola de ellas fuera de tolerancia, la pieza es rechazada en su totalidad.



**Figura 3.1** Esquema de indicaciones tipo "A", "B", "C" y "D".

La Tabla 3.1 detalla las variables dependientes e independientes que conforman el diseño experimental, así como sus unidades de medida y los criterios de aceptación.

**Tabla 3.1** Variables, unidades de medida y tolerancias de aceptación del diseño experimental.

Variables Independientes					Variables Dependientes			
Corriente de soldadura	Frecuencia de pulsos	Ángulo del electrodo	Flujo de gas	Tiempo	Indicación Tipo A	Indicación Tipo B	Indicación Tipo C	Indicación Tipo D
Amps.	Hertz	Grados	L/seg.	Seg.	≤ 3mm.	≤ 3mm.	≤ 1mm.	≤ 3mm.

### 3.5 Selección de la muestra

Debido al contexto industrial en el que la presente investigación se llevó a cabo, la muestra para cada una de las corridas mostradas en la tabla 3.3 es limitada a 4 piezas, es decir 4 réplicas, lo que hace un total de 128 piezas.

### 3.6 Medición y recolección de datos

El proceso para la recolección de datos para cada una de las corridas experimentales fue el siguiente:

- 1) De las piezas a ingresar a producción, se dividieron lotes de 4 asignados a una corrida experimental con un solo soldador.
- 2) Cada uno de los lotes fue trazado bajo una “Declaración de anomalía” y bloqueado en sistema ya que se trabajó con parámetros fuera de lo establecido en la instrucción de trabajo.
- 3) Se otorgaron instrucciones precisas al operador experimentado para llevar a cabo su operación de acuerdo a los niveles establecidos en cada una de las corridas.
- 4) Las piezas resultantes de la operación de estelitado, continuaron su flujo en producción y sus resultados fueron evaluados al término por la operación de inspección por líquidos penetrantes. Aquí, cada número de serie fue caracterizado de acuerdo a los hallazgos de grietas. Sin embargo toda pieza que presentó agrietamiento haya sido conforme o no, fue caracterizada usando un juego de linternas de valores estándar (entre 0.5mm hasta 4.5mm en incrementos de 0.5mm). Sólo a aquellas piezas que presentaron agrietamientos fuera de la tolerancia se les elaboró un reporte; creado por el inspector nivel 1 y confirmado por el inspector nivel 2.
- 5) Los resultados obtenidos se ingresaron al freeware R-Studio (V. 1.1.423) que corre con la versión de R 3.4.3 para su análisis estadístico.

Las piezas son desbloqueadas en sistema de acuerdo a sus resultados en inspección por líquidos penetrantes. Sólo aquellas cuyo resultado sobrepasó los parámetros de tolerancias son posteriormente declaradas como desperdicio y puestas a disposición del departamento de calidad.

### 3.7 Diseño de experimentos

Como primer paso del diseño experimental, se identificó cada factor (parámetro) asociado con el proceso de recubrimiento GTAW. La Tabla 3.2 muestra de manera general los parámetros que pueden ser medidos en esta propuesta experimental. Estos parámetros fueron elegidos de acuerdo a la naturaleza del proceso, dadas las características de la máquina de soldadura

usada para este propósito, así como los consumibles disponibles en planta y que son propios del proceso como lo son la copa cerámica, los diámetros del electrodo y la varilla de metal de aporte.

**Tabla 3.2** Parámetros del proceso de recubrimiento endurecedor por GTAW (Fuente: Elaboración propia).

<b>Parámetros GTAW</b>	<b>Comentarios</b>
Material del electrodo	Tungsteno 2% Cerio o Tungsteno E3+1.5%La2O3+0.08%ZrO3+0.08%Y2O3.
Diámetro del electrodo	1.6mm.
Gas protector	Argón.
Corriente de soldadura	Variable continua, unidades: Amperes.
Frecuencia de pulsos	Variable continua, unidades: Hertz.
Ángulo de afilado del electrodo	Variable discreta, valores: 20°, 30°, 40°, 50° y 60°.
Diámetro de la varilla de aporte	1.6mm.
Proceso de enfriamiento	Variable discreta: Lento, rápido.
Diámetro de la copa cerámica	Variable discreta, valores: #10 o #12.
Flujo de gas protector	Variable continua, unidades: l/s.

De acuerdo a la literatura analizada a través de la sección 2 de este trabajo, se identificaron las variables críticas para la calidad el proceso:

- Corriente: Amperes.
- Voltaje: Volts.
- Velocidad: mm/s.
- Flujo de gas: l/s.

Sin embargo, debido a la geometría de la parte a estudiar y particularmente de la zona objeto del recubrimiento endurecido por soldadura. La velocidad es un factor difícil de controlar y/o medir para el presente estudio. Por lo que el factor que tomará su lugar será la medición del tiempo de arco inducido en la pieza.

El siguiente paso fue establecer los diferentes niveles para cada factor involucrado en la experimentación. La Tabla 3.3 muestra los factores elegidos así como los niveles propuestos. Considerando que el proceso de endurecimiento por soldadura utilizado en esta experimentación es completamente manual, no fue posible determinar un tiempo exacto de inducción de arco en la pieza, por lo tanto, fue tratado como variable discreta. En el caso específico del tiempo, la experiencia nos llevó a establecer un rango que pudiera considerarse como “lento” y “rápido”. Asimismo, la frecuencia de pulsos (Hz) es una variable que, de acuerdo a la experiencia operacional, debe ser tomada en cuenta. Estos niveles fueron elegidos de acuerdo a los intervalos existentes en el proceso actual, que fueron validados desde la industrialización inicial de la referencia considerada para esta investigación.

Para el establecimiento de los diferentes niveles de los factores seleccionados se tomaron en cuenta 2 niveles para cada una de las variables. La Tabla 3.3 muestra los factores elegidos para el diseño experimental, así como los niveles propuestos.

**Tabla 3.3** Factores de proceso y niveles experimentales.

<b>Parámetros GTAW</b>	<b>Nivel 1</b>	<b>Nivel 2</b>
Corriente de soldadura	20A	30A
Frecuencia de pulsos	100Hz	300Hz
Ángulo de filo del electrodo	20°	60°
Flujo de gas protector	8 l/m	12 l/m
Tiempo (Seg.)	Bajo (<10Seg.)	Alto (>20Seg.)

### 3.7.1 Diseño experimental

Para el diseño experimental a llevar a cabo, se eligió un arreglo factorial que contiene las variables propuestas así como los niveles considerados para este efecto. El arreglo se realizó usando R-Studio (V.1.1.423) con R 3.5.1 (R Core Team, 2018) la Tabla 3.4 muestra el diseño factorial completo que, para efectos

de información en el presente trabajo, no toma en cuenta la aleatoriedad de las corridas, sin embargo, la realización del experimento será de manera aleatoria.

**Tabla 3.4** Diseño factorial completo (Fuente: Elaboración propia)

Corrida	Corriente	Frecuencia	Ángulo	Flujo	Tiempo
1	20	100	20	8	bajo
2	30	100	20	8	bajo
3	20	300	20	8	bajo
4	30	300	20	8	bajo
5	20	100	60	8	bajo
6	30	100	60	8	bajo
7	20	300	60	8	bajo
8	30	300	60	8	bajo
9	20	100	20	12	bajo
10	30	100	20	12	bajo
11	20	300	20	12	bajo
12	30	300	20	12	bajo
13	20	100	60	12	bajo
14	30	100	60	12	bajo
15	20	300	60	12	bajo
16	30	300	60	12	bajo
17	20	100	20	8	alto
18	30	100	20	8	alto
19	20	300	20	8	alto
20	30	300	20	8	alto
21	20	100	60	8	alto
22	30	100	60	8	alto
23	20	300	60	8	alto
24	30	300	60	8	alto
25	20	100	20	12	alto
26	30	100	20	12	alto
27	20	300	20	12	alto
28	30	300	20	12	alto
29	20	100	60	12	alto
30	30	100	60	12	alto
31	20	300	60	12	alto
32	30	300	60	12	alto



## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 ANÁLISIS DE DATOS

El fundamento del análisis de resultados reside en la determinación de la relación entre los diferentes tipos de variables. Por un lado las variables independientes: Corriente, frecuencia, ángulo del electrodo, flujo de gas protector y tiempo de incidencia de arco eléctrico. Por otro lado las variables de respuesta (dependientes): Indicaciones tipo A, B, C y D para la referencia bajo estudio.

Primeramente, observamos los datos de manera general a través de las medias resultantes de cada corrida experimental. Estos resultados se muestran en la Tabla 4.1.

**Tabla 4.1** Medias de los resultados experimentales.

Corrida	Corriente	Frecuencia	Ángulo	Flujo de gas	Tiempo	Medias			
						TipoA	Tipo B	Tipo C	Tipo D
1	20	100	20	8	bajo	1.125	0.25	0	0
2	30	100	20	8	bajo	1.75	0.25	0	0
3	20	300	20	8	bajo	0.875	0.125	0	0
4	30	300	20	8	bajo	1.375	0.125	0	0
5	20	100	60	8	bajo	0.875	0	0	0
6	30	100	60	8	bajo	2.625	0.25	0	0
7	20	300	60	8	bajo	1	0	0	0
8	30	300	60	8	bajo	1.25	0.125	0	0
9	20	100	20	12	bajo	0.5	0	0	0
10	30	100	20	12	bajo	2.125	0.125	0	0
11	20	300	20	12	bajo	1	0	0	0
12	30	300	20	12	bajo	1.875	0	0	0
13	20	100	60	12	bajo	0.625	0	0	0
14	30	100	60	12	bajo	1.75	0.125	0	0
15	20	300	60	12	bajo	0.25	0	0	0
16	30	300	60	12	bajo	1.375	0.125	0	0
17	20	100	20	8	alto	0.25	0.125	0	0
18	30	100	20	8	alto	0.875	0	0	0
19	20	300	20	8	alto	0.625	0.25	0	0
20	30	300	20	8	alto	0.25	0	0.125	0
21	20	100	60	8	alto	0.375	0.125	0	0
22	30	100	60	8	alto	0.25	0.125	0	0

23	20	300	60	8	alto	0.25	0.125	0	0
24	30	300	60	8	alto	1	0	0	0
25	20	100	20	12	alto	0.25	0.125	0.125	0.125
26	30	100	20	12	alto	0.5	0	0	0
27	20	300	20	12	alto	0.25	0.125	0	0
28	30	300	20	12	alto	0.125	0.125	0	0
29	20	100	60	12	alto	1.25	0.125	0	0
30	30	100	60	12	alto	0.25	0	0	0
31	20	300	60	12	alto	0.125	0	0	0.125
32	30	300	60	12	alto	1	0.125	0.125	0

De acuerdo a los datos anteriores, podemos observar que la corrida experimental más exitosa, es decir aquella que generó la menor cantidad de indicaciones o bien las más pequeñas, fue la número 31, con corriente a 20A, frecuencia a 300Hz, ángulo de electrodo de 60°, flujo de gas protector de 12 l/s y un tiempo de incidencia de arco alto (>20s.). Asimismo, la corrida menos favorable (aquella que generó la mayor cantidad de indicaciones o las más grandes) fue la corrida número 6, con una corriente de 30A, frecuencia de 100Hz, ángulo de 60°, flujo de gas de 8l/s y un tiempo de incidencia de arco bajo (<10s).

Asimismo, se obtuvieron las desviaciones estándar de las 4 réplicas de las corridas, con el fin de tener una imagen preliminar de la variación entre los factores de respuesta. Los resultados son mostrados en la Tabla 4.2.

**Tabla 4.2** Desviaciones estándar de los resultados experimentales.

<i>Corrida</i>	<i>Corriente</i>	<i>Frecuencia</i>	<i>Ángulo</i>	<i>Flujo de gas</i>	<i>Tiempo</i>	<b>Desviación estándar</b>			
						<i>Tipo A</i>	<i>Tipo B</i>	<i>Tipo C</i>	<i>Tipo D</i>
1	20	100	20	8	bajo	0.89	0.43	0.00	0.00
2	30	100	20	8	bajo	1.35	0.25	0.00	0.00
3	20	300	20	8	bajo	0.74	0.22	0.00	0.00
4	30	300	20	8	bajo	0.89	0.22	0.00	0.00
5	20	100	60	8	bajo	0.65	0.00	0.00	0.00
6	30	100	60	8	bajo	1.67	0.25	0.00	0.00
7	20	300	60	8	bajo	1.22	0.00	0.00	0.00
8	30	300	60	8	bajo	1.30	0.22	0.00	0.00
9	20	100	20	12	bajo	0.87	0.00	0.00	0.00
10	30	100	20	12	bajo	1.29	0.22	0.00	0.00

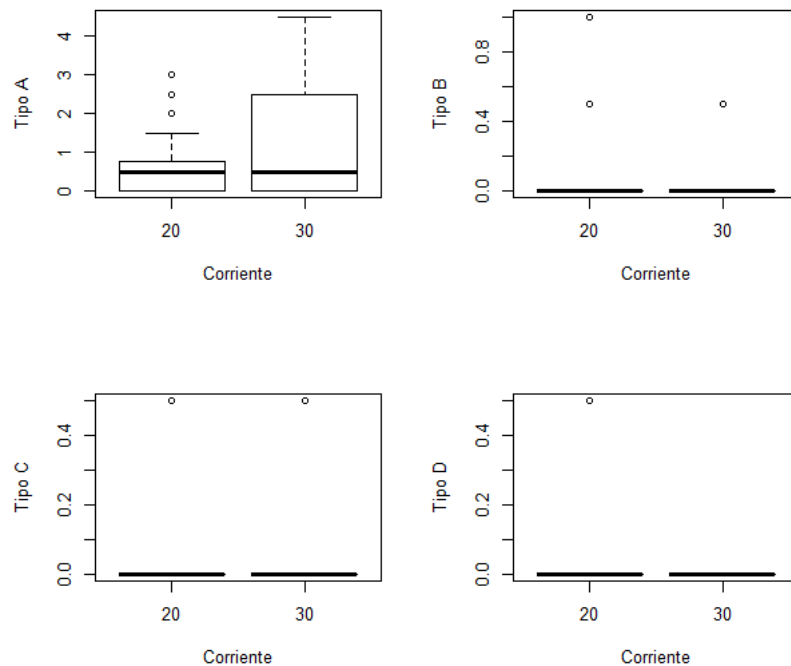
11	20	300	20	12	bajo	1.06	0.00	0.00	0.00
12	30	300	20	12	bajo	1.63	0.00	0.00	0.00
13	20	100	60	12	bajo	0.82	0.00	0.00	0.00
14	30	100	60	12	bajo	1.89	0.22	0.00	0.00
15	20	300	60	12	bajo	0.25	0.00	0.00	0.00
16	30	300	60	12	bajo	1.82	0.22	0.00	0.00
17	20	100	20	8	alto	0.25	0.22	0.00	0.00
18	30	100	20	8	alto	0.96	0.00	0.00	0.00
19	20	300	20	8	alto	0.82	0.25	0.00	0.00
20	30	300	20	8	alto	0.25	0.00	0.22	0.00
21	20	100	60	8	alto	0.22	0.22	0.00	0.00
22	30	100	60	8	alto	0.25	0.22	0.00	0.00
23	20	300	60	8	alto	0.25	0.22	0.00	0.00
24	30	300	60	8	alto	1.46	0.00	0.00	0.00
25	20	100	20	12	alto	0.43	0.22	0.22	0.22
26	30	100	20	12	alto	0.00	0.00	0.00	0.00
27	20	300	20	12	alto	0.43	0.22	0.00	0.00
28	30	300	20	12	alto	0.22	0.22	0.00	0.00
29	20	100	60	12	alto	1.03	0.22	0.00	0.00
30	30	100	60	12	alto	0.43	0.00	0.00	0.00
31	20	300	60	12	alto	0.22	0.00	0.00	0.22
32	30	300	60	12	alto	1.46	0.22	0.22	0.00

De los resultados, podemos observar que la corrida con mayor variabilidad entre réplicas es la número 14, donde la corriente es fijada en 30A, la frecuencia de pulsos en 100Hz, el ángulo de afilado del electrodo en 60°, el flujo de gas protector en 12 l/seg. Y el tiempo de incidencia de arco en bajo. Asimismo, aquella corrida cuyas réplicas presentaron la menor variabilidad entre ellas fue la número 26, con los siguientes factores: 30A, 100Hz, 20° de afilado, 12 l/seg. De gas protector y un tiempo de incidencia alto.

De lo anterior podemos observar que para el experimento de medias y desviación estándar desfavorables, se comparten los mismos niveles de los factores corriente, frecuencia, ángulo de electrodo y tiempo. Siendo únicamente el flujo de gas protector diferente en ambas corridas. Asimismo, aquellas corridas experimentales que presentaron la menor variabilidad y mejor promedio de

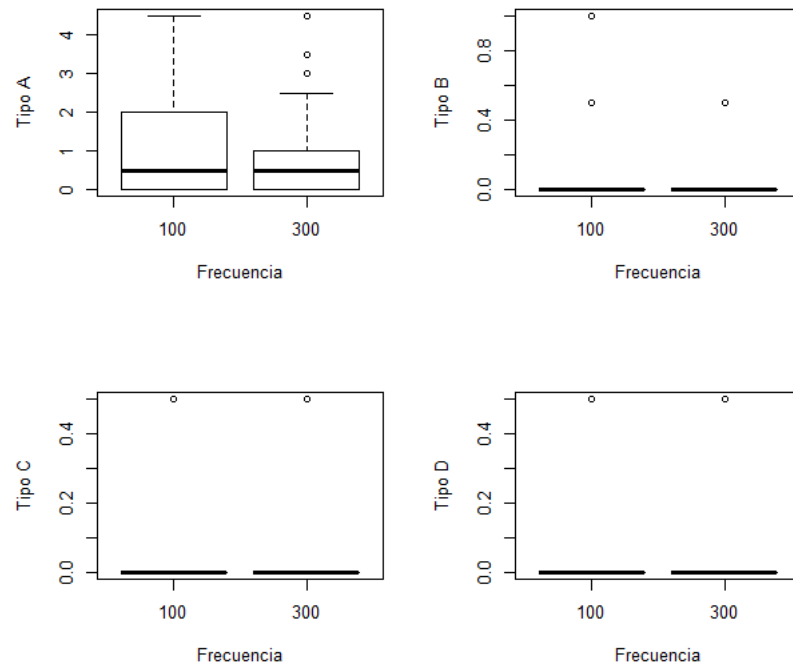
resultados sólo comparten los factores flujo de gas protector y tiempo en los mismos niveles.

Por otro lado, se analizó gráficamente la información de cada tipo de indicación respecto a cada una de las variables independientes de la experimentación. Dado lo anterior, aquí se presentan los diagramas de caja de estos datos que permiten visualizar los valores mínimo y máximos de las observaciones, así como la dispersión y la simetría de las mismas.



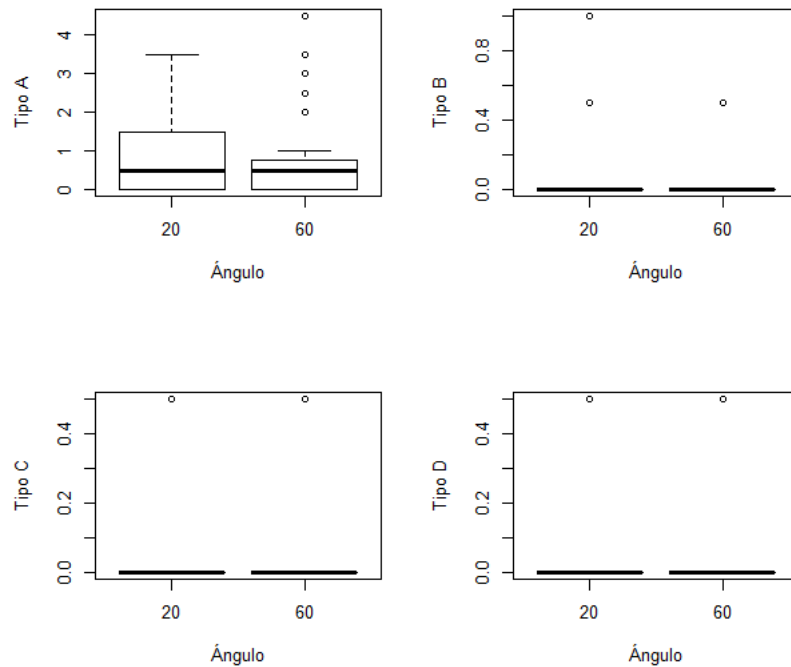
**Figura 4.1** Diagrama de cajas para el factor corriente y las variables de respuesta.

En la Figura 4.1 podemos apreciar que la corriente influye de manera importante principalmente en las indicaciones de tipo A, mientras que para las demás sólo se muestran observaciones atípicas. Para la indicación de tipo A, se muestra mayor dispersión cuando el nivel de la variable se encuentra en 30A, y por lo tanto indicaciones más grandes o mayor aparición de las mismas.



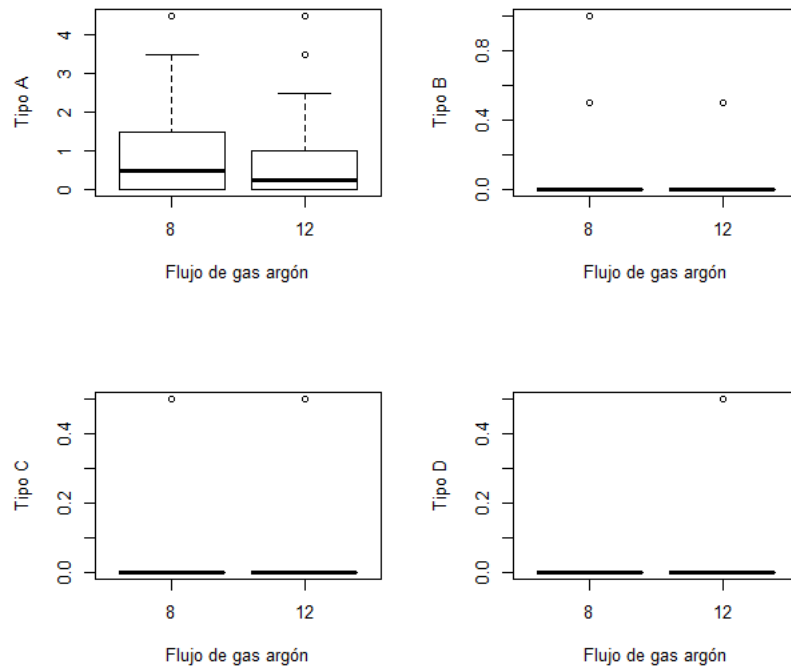
**Figura 4.2** Diagrama de cajas para el factor frecuencia y las variables de respuesta.

En la Figura 4.2, donde se observa la influencia de la frecuencia de pulsaciones sobre las variables de respuesta, es evidente que esta variable independiente, al igual que la corriente, influye de manera importante en la indicación tipo A, mostrando una dispersión más controlada si ésta se encuentra en su nivel alto (300Hz), contrario a lo que sucede cuando se fija en 100Hz. Asimismo, para el resto de las variables de respuesta, sólo existen valores atípicos.



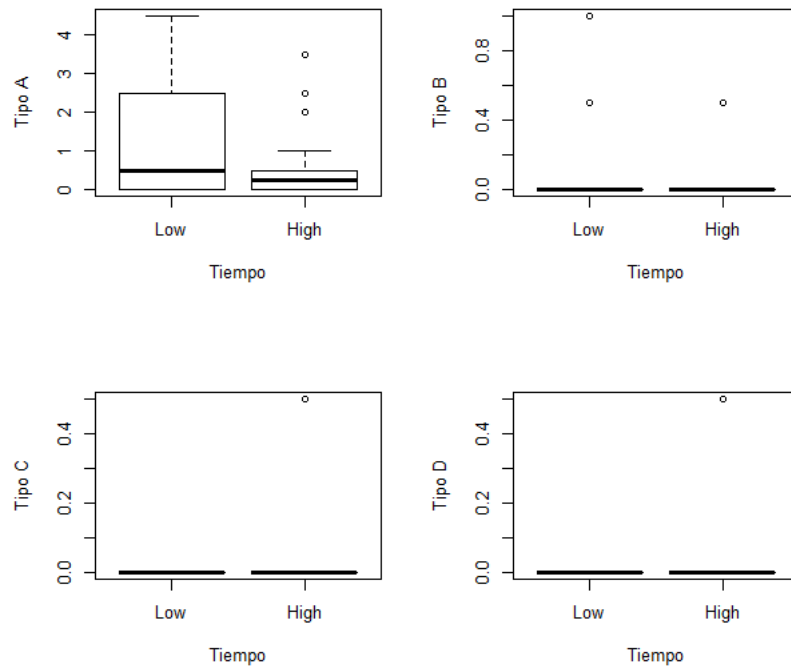
**Figura 4.3** Diagrama de cajas para el factor ángulo de afilado del electrodo y las variables de respuesta.

Para la variable ángulo de afilado del electrodo, observamos que parece influir menos en la dispersión de la indicación tipo A cuando éste es afilado a un ángulo de 60° como se puede apreciar en la Figura 4.3. Aunque del mismo modo, su influencia parece no ser importante para la aparición de indicaciones que sobrepasen los 3mm de tolerancia máxima, por lo que el ángulo de afilado no parece ser una variable significativa.



**Figura 4.4** Diagrama de cajas para el factor flujo de gas protector y las variables de respuesta.

Al igual que la influencia del ángulo de afilado del electrodo, no se aprecia un peso importante de la variable independiente frente a los diferentes tipos de indicaciones. Solamente la indicación tipo A es más dispersa en cuanto a tamaño y aparición cuando la variable independiente se encuentra en su nivel bajo (8 l/seg.) de acuerdo a la Figura 4.4.



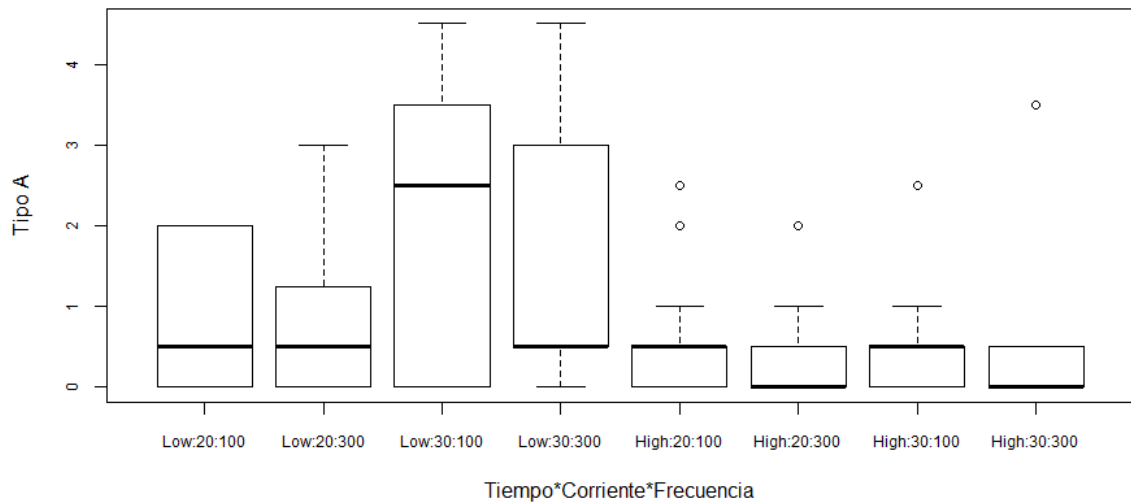
**Figura 4.5** Diagrama de cajas para el factor tiempo de incidencia del arco eléctrico y las variables de respuesta.

La variable independiente tiempo parece tener influencia significativa en la aparición y longitud de las indicaciones tipo A. Así en su valor bajo (< 10 seg.), muestra una dispersión grande con observaciones que van más allá del límite de 3mm máximo para este tipo de indicaciones, como se puede apreciar en la Figura 4.5. Por otro lado, en su valor alto (< 20 seg.) parece tener influencia positiva, es decir, la longitud y aparición de indicaciones tipo A se ve reducida y menos dispersa con 3 observaciones atípicas durante la experimentación.

A partir de la información anterior, se tomaron las variables que parecieron influir más en la indicación tipo A, para analizar los resultados de su interacción respecto al tamaño y aparición de estas indicaciones. En la Figura 4.6 se aprecia que el efecto menos favorable se presenta con la combinación de la corriente en su nivel alto así como el tiempo y la frecuencia en su nivel bajo,



aunque el cambio en la frecuencia pareciera no afectar de manera importante el cambio.



**Figura 4.6** Diagrama de cajas de la variable de respuesta "Tipo A" respecto a la interacción de las variables tiempo, corriente y frecuencia.

En un segundo tiempo, los datos obtenidos se analizaron a través de un análisis de varianza multivariada (MANOVA, por sus siglas en inglés). Para el modelo general, se estudian las variables de respuesta agrupadas respecto a las variables independientes del experimento obteniendo los resultados mostrados en la Tabla 4.3

**Tabla 4.3** MANOVA modelo general para prueba estadística de Pillai.

	<b>Grados de libertad (GL)</b>	<b>Pillai</b>	<b>F aprox.</b>	<b>Núm. de GL</b>	<b>GL den</b>	<b>Pr(&gt;F)</b>	<b>Significancia</b>
<b>Corriente</b>	1	0.075197	2.419	4	119	0.0522707	$\alpha=0.1$
<b>Frecuencia</b>	1	0.011578	0.3485	4	119	0.8446386	n/a
<b>Angulo</b>	1	0.007804	0.234	4	119	0.9187439	n/a
<b>Gas</b>	1	0.035863	1.1066	4	119	0.3567275	n/a
<b>Tiempo</b>	1	0.167405	5.9817	4	119	0.0002021	$\alpha=0.001$
<b>Residuales</b>	122						

El modelo general MANOVA muestra que el tiempo es un factor significativo con un p-value inferior a 0.001, mientras que la corriente parece ser marginalmente significativa con un p-value menor a 0.1 para el modelo con respuestas agrupadas.

Posteriormente, se efectuó el análisis de respuestas desagrupadas donde se observan los efectos de las variables en cada una de las variables de respuesta. Estos resultados se muestran en las Tabla 4.4 a la Tabla 4.7.

**Tabla 4.4** MANOVA para la variable de respuesta tipo A.

<b>Tipo A</b>	<b>GL</b>	<b>Sum. De cuadrados</b>	<b>Media de cuadrados</b>	<b>Valor F</b>	<b>Pr(&gt;F)</b>	<b>Signif.</b>
Corriente	1	9.57	9.5703	7.8439	0.005931	$\alpha=0.01$
Frecuencia	1	0.945	0.9453	0.7748	0.380471	n/s
Angulo	1	0.031	0.0312	0.0256	0.873114	n/s
Gas	1	0.281	0.2813	0.2305	0.632002	n/s
Tiempo	1	20.32	20.3203	16.6547	8.04E-05	$\alpha=0.001$
Residuales	122	148.852	1.2201			

**Tabla 4.5** MANOVA para la variable de respuesta tipo B.

<b>Tipo B</b>	<b>GL</b>	<b>Sum. De cuadrados</b>	<b>Media de cuadrados</b>	<b>Valor F</b>	<b>Pr(&gt;F)</b>	<b>Signif.</b>
Corriente	1	0.002	0.001953	0.0469	0.8289	n/s
Frecuencia	1	0.0176	0.017578	0.422	0.5172	n/s
Angulo	1	0.0176	0.017578	0.422	0.5172	n/s
Gas	1	0.0957	0.095703	2.2975	0.1322	n/s
Tiempo	1	0.002	0.001953	0.0469	0.8289	n/s

Residuales	122	5.082	0.041656
------------	-----	-------	----------

**Tabla 4.6** MANOVA para la variable de respuesta tipo C.

<b>Tipo C</b>	<b>GL</b>	<b>Sum. De cuadrados</b>	<b>Media de cuadrados</b>	<b>Valor F</b>	<b>Pr(&gt;F)</b>	<b>Signif.</b>
Corriente	1	0.00195	0.0019531	0.337	0.5626	n/s
Frecuencia	1	0.00195	0.0019531	0.337	0.5626	n/s
Angulo	1	0.00195	0.0019531	0.337	0.5626	n/s
Gas	1	0.00195	0.0019531	0.337	0.5626	n/s
Tiempo	1	0.01758	0.0175781	3.0331	0.0841	$\alpha=0.1$
Residuales	122	0.70703	0.0057953			

**Tabla 4.7** MANOVA para la variable de respuesta tipo D.

<b>Tipo D</b>	<b>GL</b>	<b>Sum. De cuadrados</b>	<b>Media de cuadrados</b>	<b>Valor F</b>	<b>Pr(&gt;F)</b>	<b>Signif.</b>
Corriente	1	0.00781	0.0078125	2.0333	0.1564	n/s
Frecuencia	1	0	0	0	1	n/s
Angulo	1	0	0	0	1	n/s
Gas	1	0.00781	0.0078125	2.0333	0.1564	n/s
Tiempo	1	0.00781	0.0078125	2.0333	0.1564	n/s
Residuales	122	0.46875	0.0038422			

Del análisis anterior, se pudo observar que la indicaciones de tipo B y D no se relacionan con los factores parte del estudio. Sin embargo, el tiempo y la corriente son significativos para la variable de respuesta tipo A, con p-values menor a 0.01 y 0.001 respectivamente. Por otro lado, para las indicaciones de tipo C, el factor tiempo es marginalmente significativo con un p-value menor a 0.1.

Considerando los resultados de significancia para el modelo desagrupado, se propone entonces uno nuevo que sólo contemple las variables tiempo y corriente así como su combinación.

**Tabla 4.8** MANOVA para las variables de respuesta en función de los factores tiempo, corriente e interacción.

	<b>Corriente</b>	<b>Tiempo</b>	<b>Corriente y Tiempo</b>	<b>Residuales</b>
<b>resp 1</b>	9.57031	20.32031	6.125	143.98438
<b>resp 2</b>	0.00195	0.00195	0.23633	4.97656
<b>resp 3</b>	0.00195	0.01758	0.00195	0.71094
<b>resp 4</b>	0.00781	0.00781	0.00781	0.46875
Grados de libertad:	1	1	1	124
Errores estándar residuales:	1.077573	0.2003336	0.075719	0.06148367

En la regresión múltiple mostrada en la Tabla 4.8 se confirma que los únicos coeficientes significativos son aquellos relacionados con la indicación de tipo A. Asimismo, se comprueba que la interacción de los factores tiempo y corriente también juega un papel importante.

Una vez aisladas los factores y la variable de respuesta que interactúan, se procede con un análisis desagrupado a través de un análisis de varianza tipo I (ANOVA, por sus siglas en inglés) que se muestra en la Tabla 4.9, demostrando la significancia de los factores tiempo, corriente y su interacción sobre la variable de respuesta tipo A.

**Tabla 4.9** ANOVA Tipo I para la variable de respuesta tipo A y los factores tiempo, corriente e interacción.

<b>Tipo A</b>	<b>GL</b>	<b>Sum. De cuadrados</b>	<b>Media de cuadrados</b>	<b>Valor F</b>	<b>Pr(&gt;F)</b>	<b>Signif.</b>
<b>Corriente</b>	1	9.57	9.5703	8.242	0.004815	$\alpha=0.01$
<b>Tiempo</b>	1	20.32	20.3203	17.4999	5.39E-05	$\alpha=0.001$
<b>Corriente y Tiempo</b>	1	6.125	6.125	5.2749	0.023313	$\alpha=0.05$
Residuales	124	143.984	1.1612			

Al haber reducido el modelo a su composición más significativa, se observa que  $S_t^2 = 20.32$  es 17.49 veces mayor que el error de la varianza de  $S_e^2 = 1.16$ , por lo tanto, el tiempo es el mayor contribuyente a la varianza del experimento.

Finalmente, se procedió a realizar el análisis de regresión con el fin de calcular los valores de los coeficientes que forman el modelo propuesto. Este análisis se detalla en la Tabla 4.10.

**Tabla 4.10** Resultados de la regresión lineal.

	<b>Coefficientes</b>	<b>Error std.</b>	<b>Valor t</b>	<b>Pr(&gt; t )</b>
<b>(Intersección)</b>	0.4219	0.1905	2.215	0.0286
<b>Corriente (c) 30</b>	0.1094	0.2694	0.406	0.6854
<b>Tiempo (t) Bajo</b>	0.3594	0.2694	1.334	0.1846
<b>Corriente (c) 30 y Tiempo (t) Bajo</b>	0.875	0.381	2.297	0.0233

También, dado que  $R^2=0.2001$  y  $R^2_{Ajustada}=0.1807$ , se puede concluir que el modelo obtenido de este experimento es confiable dado que no contiene ningún coeficiente no significativo, asimismo la significancia del modelo es importante dado que su  $p\text{-value}=4.015e^{-06}$ . Dicho modelo puede ser expresado a través de la Ecuación 3.

**Ecuación 3** Ecuación del modelo.

$$y = \beta_0 + \beta_1 c + \beta_2 t + \beta_3 ct + \epsilon$$

El análisis de los residuales, indicados en la Figura 4.7, muestra que el modelo subestima efectos grandes. Los cuantiles residuales en la Figura 4.8 muestran una falta de normalidad para este tipo de efectos. Esto puede suponer que el sistema de medición subestima la importancia de valores bajos de grietas o indicaciones y sobreestima las más grandes.

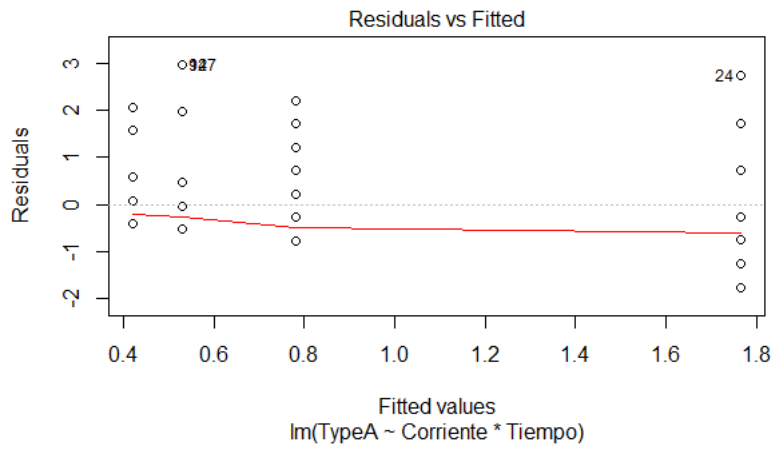


Figura 4.7 Gráfico de análisis de residuales.

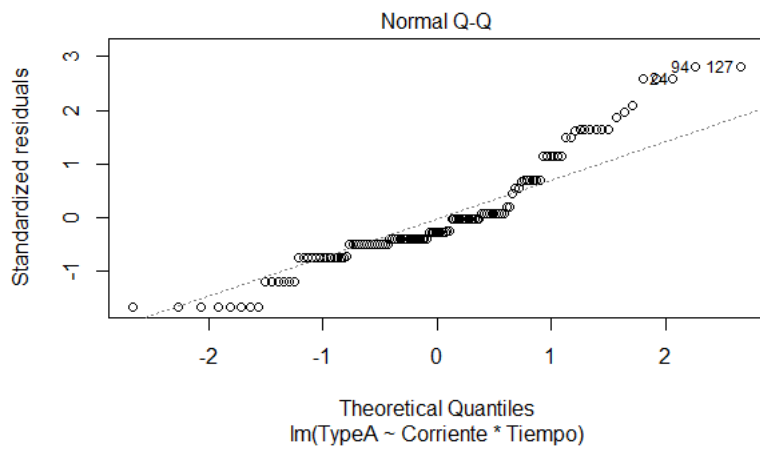


Figura 4.8 Gráfico de análisis de cuantiles residuales.

## 4.2 COMPROBACIÓN

Una vez determinada la combinación de factores más efectiva en la reducción de la aparición de grietas tipo A, se procedió a lanzar una corrida experimental con los factores corriente a 30A y el tiempo alto con una muestra de 100 piezas. Sin embargo, durante esta corrida se cronometró, redondeando al segundo, el tiempo del proceso de soldadura, para de esta forma poder obtener como entregable práctico, un rango de tiempo que pudiese ser aplicado en las instrucciones de trabajo. Lo anterior con el objetivo de facilitar el entrenamiento y la operación posteriores para el personal que la efectúa.

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4.11 y en la Figura 4.9.

**Tabla 4.11** Resultados de la corrida de comprobación.

<b>Indicación tipo A (mm)</b>	<b>Cantidad de piezas</b>	<b>Porcentaje</b>
0	41	41.0%
0.5	21	21.0%
1	15	15.0%
1.5	4	4.0%
2	8	8.0%
2.5	5	5.0%
3	5	5.0%
3.5	1	1.0%

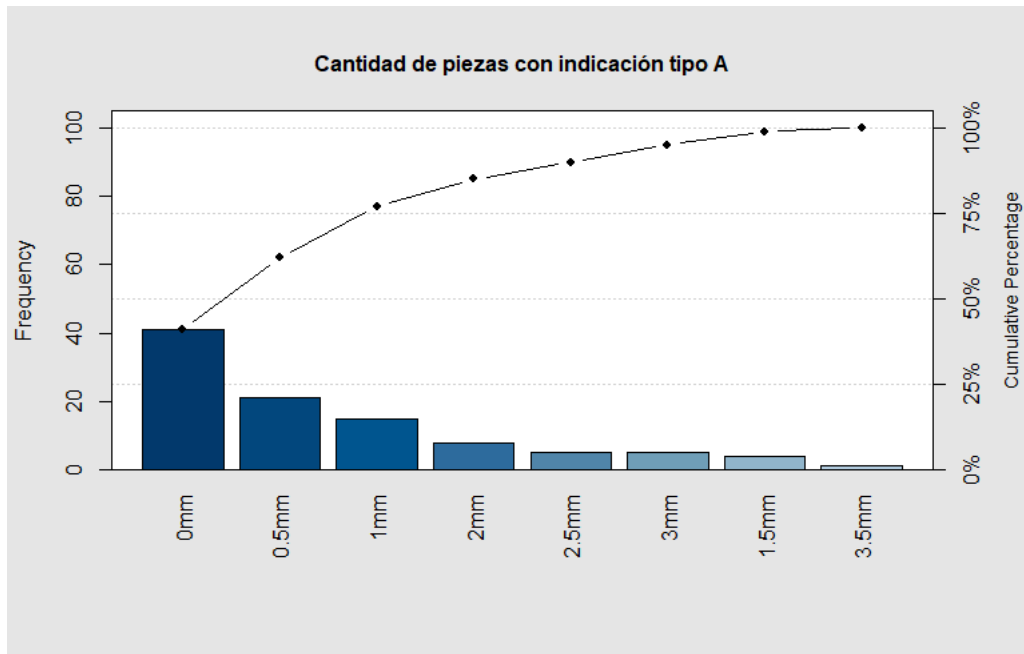


Figura 4.9 Pareto de resultados de la corrida de comprobación.

En la Figura 4.9; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** podemos apreciar claramente una notoria reducción en la aparición de indicaciones tipo A así como en su tamaño. Siendo la ausencia de indicaciones el mayor de los resultados obtenidos con 41 piezas en total, lo que representa un 41.4% del total de la muestra. Asimismo, el 100% de la muestra se encontró dentro de tolerancia, obteniendo solamente 5 piezas al límite máximo de 3mm para indicaciones de tipo A.

Posteriormente se efectuó una comparación entre los resultados antes y después de la implementación de los nuevos valores de las variables de tiempo y amperaje. La comparación se efectúa con una muestra del mismo tamaño que la de comprobación, con piezas producidas en órdenes de fabricación consecutivas utilizando los parámetros establecidos en la instrucción de trabajo: intensidad de 22A a 27A así como un tiempo y retomas indefinidas de influencia sobre la pieza. Estos resultados pueden apreciarse en la Tabla 4.12.



**Tabla 4.12** Resultados antes de la implementación de la mejora.

<b>Indicación tipo A (mm)</b>	<b>Cantidad de piezas</b>	<b>Porcentaje</b>
0	77	38.5%
0.5	32	16.0%
1	26	13.0%
1.5	9	4.5%
2	27	13.5%
2.5	12	6.0%
3	14	7.0%
3.5	3	1.5%

Del mismo modo, en la Figura 4.10 se puede observar la comparación de la muestra antes y después de la implementación de la mejora resultante del análisis aquí presentado. Asimismo, se observa una mayor densidad de frecuencia en los valores bajos de la indicación tipo A para la muestra “después” en comparación con la mayor concentración en valores bajos de la muestra “antes”.



**Figura 4.10** Comparación de tamaño de indicaciones tipo A en muestras "antes" y "después" de la implementación de la mejora.

Posteriormente, se realiza una prueba de hipótesis T (T-Test) para determinar si ambas muestras presentan estadísticamente una diferencia de medias que identifique una mejora entre la muestra antes y después de la implementación. Para dicha prueba se consideran los siguientes supuestos en la Ecuación 4 y Ecuación 5:

**Ecuación 4** Hipótesis nula para prueba T.

$$H_0: \mu_1 - \mu_2 \leq 0$$

**Ecuación 5** Hipótesis alternativa para prueba T.

$$H_1: \mu_1 - \mu_2 > 0$$

Donde  $\mu_1$  es la media de los resultados antes de la implementación de la mejora y  $\mu_2$  la media de los resultados obtenidos en la corrida de comprobación.

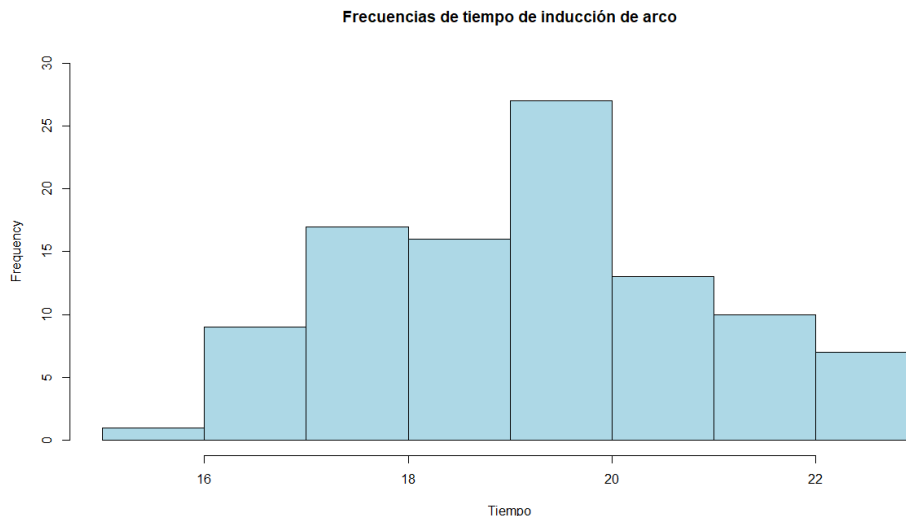
Los resultados de la prueba T con un intervalo de confianza de 95% se muestran en la Tabla 4.13:

**Tabla 4.13** Resultados de la prueba T.

Estadístico t	Grados de libertad	p-value	$\mu_1$	$\mu_2$	Intervalo de confianza
2.4057	198	0.008531	1.135	0.785	0.1095663 – Inf.

Dado que el valor p es menor a 0.05, existe evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula, aceptando entonces la hipótesis alternativa concluyendo que existe diferencia significativa entre ambas medias. Dado lo anterior, se comprueba que de acuerdo a los datos analizados, la implementación de los parámetros amperaje y tiempo de incidencia de arco en 30A y mayor a 20 segundos respectivamente representó una mejora demostrable.

Como durante la corrida de comprobación se midieron los tiempos de inducción de arco redondeando al segundo, se pudo obtener un rango de tiempo que, para efectos prácticos, se consideró en la instrucción de trabajo para otorgar holgura a los operadores que realizan el proceso. El intervalo de tiempo sugerido para este propósito es de 20seg  $\pm$  2seg, ya que fue dentro de este rango que se encontró la mayor frecuencia de tiempos de inducción de arco (83% de los datos). Lo anterior se puede observar en la Figura 4.11:



**Figura 4.11** Histograma de frecuencias de tiempo de inducción de arco.

### 4.3 CONCLUSIONES

El proceso de revestimiento endurecido por soldadura forma parte importante de la industria aeroespacial. Sin embargo, en aplicaciones particulares donde los materiales, sus propiedades y la técnica de revestimiento crean el entorno perfecto para la aparición de agrietamientos, es importante encontrar la combinación de parámetros y niveles correcta para mitigar este riesgo de pérdida dentro de las empresas del ramo. Es por lo anterior que el resultado de diferentes experimentaciones expuestas en el presente trabajo, así como la comprobación del resultado ayudaron a concluir lo siguiente:

El tiempo y la corriente resultaron ser significativos para el modelo obtenido del diseño experimental aunque sólo explica el efecto sobre una variable de respuesta: La indicación tipo "A". El efecto sobre las indicaciones tipo "B", "C" y "D" no puede ser explicado a través de una relación con los niveles propuestos para los factores de control. Sin embargo, la aparición de indicaciones tipo "D" se encuentra ligada a la experiencia del personal operativo, ya que es un tema de gesto manual más allá de una variable dependiente de los factores de control aquí propuestos.

El modelo propuesto en la Ecuación 3 y en la Tabla 4.10 propone los factores tiempo y corriente en sus niveles altos: > 20 seg. Y 30A respectivamente. Asimismo, se comprobó la significancia del modelo ya que su  $p\text{-value} < 0.001$ , al igual que su confiabilidad en función del resultado de  $R^2$  y  $R^2_{\text{Ajustada}}$ . Esto significa que la preparación del proceso de recubrimiento por soldadura necesita ajuste simultáneo de tiempo y corriente; donde la corriente más alta y el menor tiempo parecen estar asociados con una mayor dimensión de agrietamiento por choque térmico. También se puede observar que el tiempo contribuye más en la varianza del experimento con un valor de 20.32 en la suma de cuadrados. Contrario a la corriente cuyo valor es de 9.57 como mostrado en Tabla 4.9. Es importante enfatizar que la interacción de tiempo y corriente es la que cuenta con el coeficiente más grande  $\beta_3 = 0.875$ . Este resultado sugiere que entre mayor tiempo

y a baja corriente se pueden evitar los agrietamientos por choque térmico o bien reducirlos.

Asimismo, una vez realizada la corrida de comprobación y habiéndola comparado con una muestra del mismo tamaño se encontró una mejora estadísticamente representativa de un 30.83% en la aparición y tamaño de las indicaciones de tipo A. En el supuesto de proyectar esta mejora a un volumen de producción promedio mensual la ganancia por reducción de no conformidades sería de aproximadamente \$44,390USD para la empresa después de la implementación de la mejora a un nivel de producción en serie. Del mismo modo, se sugiere estandarizar esta metodología para el resto de las referencias que son sometidas al mismo proceso de soldadura, además de un seguimiento cercano del desempeño de los operadores para el mantenimiento de las buenas prácticas que asegure la sostenibilidad de la mejora.

## 5. REFERENCIAS

Automated magnetic particle and fluorescent penetrant defect detection system. Available from: <http://www.google.com/patents/US20150192526>

Betteridge, W., and S. W. K. Shaw. 1987. Development of superalloys. *Mater. Sci. Technol.* 3:682–694. doi:10.1179/mst.1987.3.9.682.

Cantwell, P. R., M. Tang, S. J. Dillon, J. Luo, G. S. Rohrer, and M. P. Harmer. 2014. Grain boundary complexions. *Acta Mater.* 62:1–48. doi:10.1016/j.actamat.2013.07.037.

Cárdenas, J., and F. Díaz del Castillo. 2015. Lecturas para ingeniería N°23 “Superaleaciones.”

Cornu, J. 1988. *Advanced Welding Systems*. Vol. 2. Consumable Electrode Processes.

Cowles, B. A. 1996. High cycle fatigue in aircraft gas turbines—an industry perspective. *Int. J. Fract.* 80:147–163.

Das, C. R., S. K. Albert, A. K. Bhaduri, and R. Nithya. 2007. Effects of dilution on microstructure and wear behaviour of NiCr hardface deposits. *Mater. Sci. Technol.* 23:771–779.

Day, J. J. 2004a. Gas Turbine Blade Hardfacing Process Development and Microstructural Study of the Interface [PhD Thesis]. Carleton University Ottawa.

Day, J. J. 2004b. Gas Turbine Blade Hardfacing Process Development and Microstructural Study of the Interface. Ott. Carlet. Univ. Mech. Aerosp. Eng. Dep.

Duhl, M. G. D., and A. F. Giamei. 1980. The development of single crystal superalloy turbine blades. *Superalloys Warrendale*. 41.

Faraji, M. 2014. *Welding Processes*.

Femat-Diaz, A., I. Terol-Villalobos, J. Torres-Gonzalez, F. Manríquez-Guerrero, and D. Vargas-Vazquez. 2013. Microcrack parameters characterization in hard-coatings using moments for image processing. *Int J Electrochem Sci*. 8:9677–9691.

Ghosh, P. K. 2017a. *Pulse Current Gas Metal Arc Welding: Characteristics, Control and Applications*. Springer.

Ghosh, P. K. 2017b. *Pulse Current Gas Metal Arc Welding: Characteristics, Control and Applications*. Springer.

Giamei, A. F. 2013. Development of single crystal superalloys: A brief history. *Adv. Mater. Process*. 171:26–30.

Henderson, M. B., D. Arrell, R. Larsson, M. Heobel, and G. Marchant. 2004a. Nickel based superalloy welding practices for industrial gas turbine applications. *Sci. Technol. Weld. Join*. 9:13–21.

Henderson, M. B., D. Arrell, R. Larsson, M. Heobel, and G. Marchant. 2004b. Nickel based superalloy welding practices for industrial gas turbine applications. *Sci. Technol. Weld. Join*. 9:13–21.

Langston, L. S. 2015. Each Blade a Single Crystal. *Am. Sci*. 103:30.

Mataveli Suave, L., J. Cormier, P. Villechaise, D. Bertheau, G. Benoit, G. Cailletaud, and L. Marcin. 2016. Anisotropy in creep properties of DS200+ Hf alloy. *Mater. High Temp*. 33:361–371.

Mendez, P. F., N. Barnes, K. Bell, S. D. Borle, S. S. Gajapathi, S. D. Guest, H. Izadi, A. K. Gol, and G. Wood. 2013. Welding processes for wear resistant overlays. *J. Manuf. Process*. 16:4–25.

M'Saoubi, R., D. Axinte, S. L. Soo, C. Nobel, H. Attia, G. Kappmeyer, S. Engin, and W.-M. Sim. 2015. High performance cutting of advanced aerospace alloys and composite materials. *CIRP Ann.-Manuf. Technol*. 64:557–580.

- Pollock, T. M. 2016. Alloy design for aircraft engines. *Nat. Mater.* 15:809–815.
- R Core Team. 2018. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing., Vienna, Austria. Available from: <https://www.R-project.org/>
- Saha, A., and S. C. Mondal. 2017. Welding Parameters Optimization in MMAW Assisted Nano-Structured Hardfacing Using Desirability Function Analysis Embedded with Taguchi Method. *Res. Des. Communities* Vol. 447.
- Shanmugam, R., and N. Murugan. 2006a. Effect of gas tungsten arc welding process variables on dilution and bead geometry of Stellite 6 hardfaced valve seat rings. *Surf. Eng.* 22:375–383.
- Shanmugam, R., and N. Murugan. 2006b. Effect of gas tungsten arc welding process variables on dilution and bead geometry of Stellite 6 hardfaced valve seat rings. *Surf. Eng.* 22:375–383.
- Tsai, K.-C., S.-L. Jeng, and J.-Y. Huang. 2014. Prevention of delayed cracking of iron based hardfacing welds. *Eng. Fail. Anal.* 48:210–217.
- Venkatesh, B., B. Malvi, M. Roy, and P. Sarkar. 2018. Effect of welding conditions on erosive wear of hard-faced Co-based alloy layer. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part J J. Eng. Tribol.* 1350650117753916.
- Wang, S. 2005. *Welding and Repair of Single Crystal Ni-based Superalloys.* Carleton University.
- Werner, A., W. Smarsly, and J. E's slinger. 2014. Wear Protection for Turbine Blades Made of Titanium Aluminide. *Gamma Titan. Aluminide Alloys 2014 Collect. Res. Innov. Commer. Gamma Alloy Technol.* 111–115.
- Williams, C. R., Y.-L. Lee, and J. T. Rilly. 2003. A practical method for statistical analysis of strain–life fatigue data. *Int. J. Fatigue.* 25:427–436.
- Zheng, J., W. F. Xie, M. Viens, L. Birglen, and I. Mantegh. 2015a. Design of an advanced automatic inspection system for aircraft parts based on fluorescent penetrant inspection analysis. *Insight-Non-Destr. Test. Cond. Monit.* 57:18–34.
- Zheng, J., W. F. Xie, M. Viens, L. Birglen, and I. Mantegh. 2015b. Design of an advanced automatic inspection system for aircraft parts based on fluorescent penetrant inspection analysis. *Insight-Non-Destr. Test. Cond. Monit.* 57:18–34.

## 6. APÉNDICE