



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Mecánica

**METODOLOGÍA PARA EL REACONDICIONAMIENTO DE EJES DE ACERO AL CARBONO,  
AISI 1045, POR MEDIO DE SOLDADURA**

**Estuardo Santiago Celada Rios**

Asesorado por el Ing. Roberto Alejandro Aguilar Rivas

Guatemala, junio de 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**METODOLOGÍA PARA EL REACONDICIONAMIENTO DE EJES DE ACERO,  
AISI 1045, POR MEDIO DE SOLDADURA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

**ESTUARDO SANTIAGO CELADA RIOS**  
ASESORADO POR EL ING. ROBERTO AGUILAR RIVAS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO MECÁNICO**

GUATEMALA, JUNIO DE 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Juan Carlos Molina Jiménez
VOCAL V	Br. Mario Maldonado Muralles
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Roberto Guzmán Ortiz
EXAMINADOR	Ing. Luis Eduardo Coronado Noj
EXAMINADOR	Ing. Raúl Guillermo Izaguirre Noriega
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

## HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

### **METODOLOGÍA PARA EL REACONDICIONAMIENTO DE EJES DE ACERO, AISI 1045, POR MEDIO DE SOLDADURA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha 4 de octubre de 2011.



Estuardo Santiago Celada Rios



FACULTAD DE INGENIERIA  
ESCUELA DE INGENIERIA MECÁNICA

Guatemala, 2 de mayo de 2012

Ing. Julio Cesar Campos Paiz  
Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Ingeniero Campos:

Atentamente le estoy informando que he procedido con la revisión final del trabajo de graduación titulado "METODOLOGÍA PARA EL REACONDICIONAMIENTO DE EJES DE ACERO AL CARBONO, AISI 1045, POR MEDIO DE SOLDADURA" realizado por el estudiante de ingeniería mecánica Estuardo Santiago Celada Rios con número de carne 200815381, quien contó con la asesoría del suscrito.

El trabajo se desarrolló dentro del proyecto de Investigaciones Metalúrgicas de la Escuela de Ingeniería Mecánica, a cargo del suscrito, y, cuenta con mi total aprobación, por lo que estoy solicitándole darle el trámite correspondiente, ya que considero que cumple con los objetivos fundamentales de nuestras líneas de investigación, aportando resultados de suma utilidad en beneficio del conocimiento teórico práctico de los ingenieros mecánicos.

Sin otro particular, me suscribo de usted,

Atentamente;

Ing. Roberto Alejandro Aguilar Rivas.

Colegiado No. 862

Asesor de trabajo de graduación

*Ing. Roberto A. Aguilar Rivas*  
COLEGIADO No. 862

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA  
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA

El Coordinador del Área Complementaria de la Escuela de Ingeniería Mecánica, luego de conocer el dictamen del Asesor y habiendo revisado en su totalidad el trabajo de graduación titulado **METODOLOGÍA PARA EL REACONDICIONAMIENTO DE EJES DE ACERO AL CARBONO, AISI 1045, POR MEDIO DE SOLDADURA**, del estudiante **Estuardo Santiago Celada Ríos** recomienda su aprobación.

**ID Y ENSEÑAD A TODOS**



Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez  
**Coordinador de Área**

Guatemala, mayo de 2012 .

/bchdei.

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA**



**FACULTAD DE INGENIERIA  
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA**

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, después de conocer el dictamen del asesor, con la aprobación del Coordinador del Área Complementaria, al Trabajo de Graduación titulado **METODOLOGÍA PARA EL REACONDICIONAMIENTO DE EJES DE ACERO AL CARBONO, AISI 1045, POR MEDIO DE SOLDADURA**, del estudiante **Estuardo Santiago Celada Rios**, procede a la autorización del mismo.

**ID Y ENSEÑAD A TODOS**

Ing. Julio César Campos Paiz  
**DIRECTOR**



Guatemala, junio de 2012

JCCP/behdei



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al trabajo de graduación titulado: **METODOLOGÍA PARA EL REACONDICIONAMIENTO DE EJES DE ACERO AL CARBONO, AISI 1045, POR MEDIO DE SOLDADURA**, presentado por el estudiante universitario **Estuardo Santiago Celada Ríos**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

A large, handwritten signature in black ink, consisting of a large oval shape with a vertical line through it, positioned over the printed name of the Dean.

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos  
Decano

Guatemala, junio de 2012

## **AGRADECIMIENTO A:**

<b>Dios</b>	Por dame la vida y todos los éxitos que he alcanzado.
<b>Mis padres</b>	Por todo el apoyo que me han dado en mi vida y por darme la enseñanza ética.
<b>Ing. Roberto Aguilar Rivas</b>	Por todo el apoyo y conocimientos que me brindó para la elaboración de este trabajo.
<b>Armando Estrada</b>	Por haber contribuido con la investigación.
<b>INTECAP</b>	Por haber ofrecido sus instalaciones para la elaboración de este trabajo.
<b>SIE LTDA</b>	Por haber apoyado el presente trabajo.
<b>USAC</b>	Por los conocimientos adquiridos.
<b>Escuela de Ingeniería Mecánica</b>	Por la oportunidad de realizar mi trabajo de graduación y los conocimientos adquiridos.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	IX
GLOSARIO .....	XI
RESUMEN .....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
INTRODUCCIÓN .....	XIX
1. ANTECEDENTES .....	1
1.1. Ubicación del tema .....	2
1.2. Planteamiento del problema .....	5
1.2.1. Cuestionamientos .....	5
1.2.2. Justificación .....	5
1.3. Metodología.....	6
2. PRINCIPIOS FUNDAMENTALES .....	9
2.1. Ejes o árboles.....	9
2.1.1. Ejes lisos.....	9
2.1.2. Ejes escalonados.....	10
2.1.3. Eje ranurado o con tallas especiales .....	10
2.1.4. Eje hueco.....	11
2.1.5. Eje acodado.....	12
2.2. Aplicaciones de los ejes .....	12
2.3. Materiales empleados en la construcción de ejes .....	13
2.4. Desgaste en ejes.....	15
2.4.1. Abrasión .....	16

	2.4.1.1.	Abrasión de bajo esfuerzo.....	16
	2.4.1.2.	Abrasión de alto esfuerzo.....	17
	2.4.1.3.	Abrasión por desgarramiento .....	18
	2.4.2.	Adhesión .....	19
	2.4.2.1.	Ludimiento.....	20
	2.4.3.	Corrosión.....	20
	2.4.4.	Fatiga superficial .....	21
3.	SOLDADURA POR ARCO ELÉCTRICO .....		23
3.1.	Soldadura por arco manual con electrodo revestido (SMAW).....		25
3.2.	Soldadura con arco manual con gas de protección (GMAW).....		27
3.3.	Soldadura de arco de tungsteno con gas (GTAW) .....		29
4.	ACERO AISI 1045 Y SUS PROPIEDADES MECÁNICAS.....		33
4.1.	Composición química .....		34
4.2.	Soldabilidad .....		35
5.	PROCESO EXPERIMENTAL DE RECUPERACIÓN DE EJES AFECTADOS POR DESGASTE .....		39
5.1.	Verificación de las medias iniciales .....		39
	5.1.1.	Método de ensayo visual.....	39
5.2.	Proceso de reacondicionamiento .....		40
	5.2.1.	Preparación de la superficie .....	40
	5.2.1.1.	Remoción del defecto.....	40
	5.2.1.2.	Ensayo de partículas magnéticas.....	41
5.3.	Proceso de soldadura.....		43
5.4.	Selección del material de aporte .....		43

5.5.	Parámetros de soldadura.....	45
5.5.1.	Temperatura de precalentamiento.....	45
5.5.2.	Parámetros del electrodo.....	46
5.6.	Composición química resultante.....	47
5.7.	Tratamiento térmico postsoldadura .....	48
5.8.	Acabado final.....	49
5.9.	Inspección de la calidad de la soldadura .....	49
6.	PROCESO EXPERIMENTAL DE LOS PROCEDIMIENTOS DE REACONDICIONAMIENTO .....	51
6.1.	Métodos experimentales.....	52
6.1.1.	Equipo .....	52
6.1.2.	Procedimiento para la realización de cordones .....	52
6.1.3.	Ensayo microscópico.....	57
6.2.	Análisis e interpretación de resultados .....	58
	CONCLUSIONES .....	71
	RECOMENDACIONES .....	73
	BIBLIOGRAFÍA.....	75
	APÉNDICE.....	79
	ANEXOS .....	81



# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1. Eje liso.....	10
2. Eje escalonado.....	10
3. Eje ranurado.....	11
4. Eje hueco .....	11
5. Eje acodado .....	12
6. Abrasión de bajo esfuerzo.....	17
7. Abrasión de alto esfuerzo.....	18
8. Abrasión por desgarramiento .....	19
9. Diagrama esquemático del proceso SMAW .....	25
10. Diagrama esquemático del proceso GMAW.....	28
11. Diagrama esquemático del proceso GTAW .....	29
12. Primer ensayo de levantado de cordones .....	53
13. Segundo ensayo de levantado de cordones .....	53
14. Tercer ensayo de levantado de cordones .....	54
15. Probeta terminada primer ensayo con electrodo E 8018-B2.....	55
16. Probeta terminada con electrodo E 9018-B3.....	55
17. Segundo ensayo terminado con electrodo E 9018-B3 .....	55
18. Tercer ensayo terminado con electrodo E 9018-B3 .....	56
19. Probeta terminada con electrodo E 8018-B2.....	56
20. Segundo ensayo terminado con electrodo E 8018-B2 .....	56
21. Tercer ensayo terminado con electrodo E 8018-B2 .....	57
22. Probetas ensayo microscópico.....	58

23. Probeta con electrodo E 9018-B3 evaluada con partículas magnéticas secas. ....	61
24. Probeta con electrodo E 8018-B2 evaluada con partículas magnéticas secas. ....	61
25. Probeta método primer ensayo evaluada con tintas penetrantes, a) líquido penetrante, y, b) revelador .....	62
26. Probeta con electrodo E 9018-B3 evaluada con tintas penetrantes, a) líquido penetrante, y, b) revelador .....	62
27. Probeta con electrodo E 8018-B2 evaluada con tintas penetrantes, a) líquido penetrante, y, b) revelador .....	63
28. Probeta método primer ensayo con electrodo E 8018-B2 defectos encontrados con tintas penetrantes.....	63
29. Probeta segundo ensayo con electrodo E 9018-B3 defectos encontrados con tintas penetrantes .....	64
30. Probeta segundo ensayo con electrodo E 8018-B2 defectos encontrados con tintas penetrantes .....	64
31. Radiografía de las probetas soldadas.....	65
32. Núcleo de probeta acero 1045.....	66
33. Núcleo de probeta acero 1045 soldada con E 8018-B2.....	66
34. Zona afectada por el calor, acero 1045 soldada con electrodo E 8018-B2. ....	67
35. Núcleo de probeta soldada, acero 1045 soldada con electrodo E 8018-B2. ....	67
36. Zona afectada por el calor, acero 1045 soldada con electrodo E 9018-B3 .....	68
37. Zona de transición entre ZAC parte de arriba y la zona de soldadura (línea de fusión), acero 1045 soldada con electrodo E 9018-B3.....	68
38. Núcleo de probeta soldada, acero 1045 soldada con electrodo E 9018-B3 .....	69

39. Zona afectada por el calor, acero 1045 soldada con electrodo E 9018-B3 .....	69
40. Zona de soldadura, acero 1045 soldada con E 8018-B2.....	70

## TABLAS

I. Gases inertes para GTAW.....	30
II. Propiedades del acero AISI 1045 .....	34
III. Composición química del acero AISI 1045 .....	34
IV. Clasificación de los procesos de soldadura en función de los parámetros de la soldadura y sus características.....	43
V. Composición química del electrodo E 9018-B3 .....	44
VI. Parámetros del electrodo E 9018-B3.....	46
VII. Porcentaje de dilución de los procesos de soldadura.....	48
VIII. Composición química resultante.....	48



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>Amp</b>	Amperaje
<b>C</b>	Carbono
<b>cm</b>	Centímetro
<b>DC</b>	Corriente continua
<b>Cr</b>	Cromo
<b>END</b>	Ensayo no destructivo
<b>°C</b>	Grado Celsius
<b>°F</b>	Grado Fahrenheit
<b>kJ</b>	Kilo Joule
<b>kgf/mm<sup>2</sup></b>	Kilogramo fuerza por milímetro cuadrado
<b>MPa</b>	Mega pascales
<b>m/s</b>	Metro por segundo
<b>ksi</b>	Mil libras por pulgada cuadrada
<b>mg/hr</b>	Miligramo por hora
<b>mm</b>	Milímetro
<b>Mo</b>	Molibdeno

**Ni**

Níquel

**“**

Pulgada

**V**

Voltaje

## **GLOSARIO**

<b>AISI</b>	Instituto Americano del Hierro y el Acero
<b>Alotropía</b>	Se denomina a la propiedad que poseen determinados metales de presentarse bajo estructuras metalográficas diferentes en el estado sólido.
<b>ASTM</b>	Sociedad Americana de Ensayo de Materiales
<b>Austenita</b>	Es la forma estable del hierro puro a temperaturas que oscilan entre los 900 a 1400 °C. Está formada por una disolución sólida del carbono en el hierro, lo que supone un porcentaje máximo de C del 2,11%. Es dúctil, blanda y tenaz.
<b>AWS</b>	Sociedad Americana de la Soldadura

**Cementita**

Es un constituyente de los aceros, y otras aleaciones férreas como las fundiciones blancas, que aparece cuando el enfriamiento de la aleación sigue el diagrama meta estable F-Fe<sub>3</sub>C en vez de seguir el diagrama estable hierro-grafito. La cementita tiene un 6,67% en peso de carbono, y es un compuesto intermetálico de inserción. La composición química de la cementita es Fe<sub>3</sub>C y la estructura cristalina es del tipo ortorrómbica.

**Cojinete**

Es el elemento de máquina sobre el que se soporta y gira el árbol transmisor de momento giratorio de una máquina.

**Ferrita**

O hierro- $\alpha$  (alfa) es, en metalurgia, la estructura cristalina del hierro. Admite hasta un 0,02 % C en solución a la temperatura eutectoide. Cristaliza en el sistema cúbico centrado en el cuerpo (BCC) y tiene propiedades magnéticas.

**Fragilidad**

Se define como la capacidad de un material de fracturarse con escasa deformación, a diferencia de los materiales dúctiles que se rompen tras sufrir acusadas deformaciones plásticas.

**Martensita**

Es el principal constituyente de los aceros templados, está conformado por una solución sólida sobresaturada de carbono o carburo de hierro en ferrita y se obtiene por enfriamiento rápido de los aceros desde su estado auténtico a altas temperaturas. Sus propiedades físicas varían según su contenido en carbono hasta un máximo de 0.7%. Es muy frágil y presenta un aspecto acicular formando grupos en zigzag con ángulos de 60 grados.

**Recocido**

Se puede entender el recocido como el calentamiento del acero por encima de las temperaturas de transformación a la fase austenítica seguida de un enfriamiento lento. El resultado de este lento enfriamiento es el de obtener un equilibrio estructural y de fase en los granos del metal.

**Revenido**

Consiste en calentar el acero después de normalizado o templado, a una temperatura inferior al punto crítico, seguido de un enfriamiento controlado que puede ser rápido cuando se pretenden resultados altos en tenacidad, o lento, para reducir al máximo las tensiones térmicas que pueden generar deformaciones.

**SAE**

Sociedad Americana de Ingenieros Automotores

**SAW**

Soldadura por arco sumergido

**Templabilidad**

Es la capacidad de una aleación de reaccionar al temple desde la superficie hasta el núcleo del elemento. Depende de la composición química del acero, del tamaño y forma de la pieza. Todos los aceros aleados tienen una relación específica entre las propiedades mecánicas y la velocidad de enfriamiento durante el temple, por lo que unos son más templables que otros.

**Temple**

Es un proceso de calentamiento seguido de un enfriamiento, generalmente rápido con una velocidad mínima llamada crítica. El temple es una condición que se produce en el metal o aleación por efecto del tratamiento térmico impartiendo estructuras y propiedades mecánicas particulares.

**Tenacidad**

Es la energía total que absorbe un material antes de alcanzar la rotura, por acumulación de dislocaciones.

**Torsión**

Se entiende por torsión la deformación de un eje, producto de la acción de dos fuerzas paralelas con direcciones contrarias en sus extremos.

## RESUMEN

El presente trabajo consiste en elaborar una fuente metodológica para la reconstrucción de ejes de acero que han sufrido desgaste u otro tipo de fallas mediante soldadura al arco. Ya que el trabajo posee diversos temas (ejes, soldadura, propiedades, etc.) estos fueron separados por capítulos. Toda la delimitación de la investigación se encuentra en el capítulo I.

El capítulo II trata el tema específico de ejes, tipos, aplicaciones y materiales con los que se construyen. Al mismo tiempo, se pone de manifiesto, los diversos tipos de desgaste que estos elementos sufren cuando se les aplica una fuerza.

El capítulo III, describe los diversos procesos de soldadura al arco, SMAW, GMAW, GTAW, y las ventajas y desventajas que estos poseen. Ya que el tema sería muy amplio al intentar enmarcar todos los tipos de acero, se tomó el caso específico del acero AISI 1045, por ser el más usado en la construcción de mencionados elementos. Las propiedades del acero citado las encontramos en el capítulo IV.

El capítulo V es la metodología empírica, propia empleada en la reconstrucción de ejes de acero 1045, precalentamiento, tipos de electrodo, proceso de soldadura, tratamiento térmico post soldadura, etc. Por último en la fase experimental se pusieron a prueba los métodos empleados para el levantado de cordones (convencional y traslape), y también dos tipos de electrodo, para comprobar su compatibilidad con el acero mencionado.



# OBJETIVOS

## General

Proponer una metodología específica para la reconstrucción de ejes de acero al carbono AISI 1045 que han sufrido desgaste u otro tipo de falla, empleando procesos de soldadura adecuados según sea el caso.

## Específicos

1. Proponer el método más adecuado para la reconstrucción de ejes de acero de medio carbono por soldadura.
2. Diseñar una técnica para la reconstrucción de ejes de acero de medio carbono por medio de procesos específicos de soldadura.
3. Aportar al área de procesos de manufactura, en el tema de reconstrucción de elementos de maquinas, un método de reconstrucción de piezas por soldadura.
4. Proporcionar las bases que coadyuven a la implementación de un laboratorio de soldadura orientado a la recuperación de elementos de máquinas.



## INTRODUCCIÓN

Cumpliendo con los objetivos específicos de investigación de la Escuela de Ingeniería Mecánica, específicamente dentro del proyecto de investigaciones metalúrgicas de la misma, coadyuvando a la implementación del material de apoyo en el curso de seminario de investigación, en el presente trabajo se propone un marco metodológico para la reconstrucción de ejes de aceros específicos por medio de soldadura.

Los ejes son los elementos encargados de transmitir movimiento en las máquinas, y es común que estos se desgasten, ya sea, prematuramente o después de un largo periodo de trabajo. En muchas ocasiones, estos elementos son desechados al momento de fallar, pero cuando la falta de repuestos o la inexistencia de los mismos afecta a los usuarios, se hace necesario realizar una reconstrucción del elemento.

Es común, que en la práctica, se escuche el procedimiento como calzar el eje. El jefe o encargado de mantenimiento, en algunas ocasiones, deja a disposición del soldador, escoger la técnica, el electrodo, temperaturas y demás aspectos del reacondicionamiento. Lo que conlleva en desperdicio de material, pérdidas de equipo o problemas más serios.

El propósito de este trabajo es dejar a un lado la variabilidad del proceso de reconstrucción, poniendo en manifiesto, todos los parámetros necesarios, temperatura, limpieza, identificación del defecto, etc., y la técnica más adecuada para el levantado de cordones, misma que ha sido utilizada con éxito durante años, y así, evitar todos los problemas antes descritos. En tal sentido,

se hace uso de los ensayos no destructivos en la identificación de defectos, siguiendo los lineamientos básicos de inspección de la *American Welding Society* (AWS).

## 1. ANTECEDENTES

La reconstrucción de piezas por medio de soldadura es uno de los procedimientos ingenieriles más completos y complejos, ya que este implica muchos factores que dependen de las características propias del material y de la aplicación del mismo.

La reconstrucción por soldadura, es una forma de solventar cualquier imprevisto o cuando la falta de repuestos amerita la reconstrucción de piezas desgastadas. Pero, para que el elemento reconstruido soporte las cargas y esfuerzos a los cuales está sometido, se debe realizar todo el procedimiento de reconstrucción de forma consistente y puntual. Es difícil encontrar en un libro de texto o en alguna otra fuente un método específico que ayude al proyectista, ingeniero o estudiante a realizar dicha reconstrucción.

La falta de conocimiento por parte de los involucrados, repercute en la vida de otros elementos dentro de la máquina a la que pertenece la pieza reconstruida, generando pérdidas monetarias y desperdicio de material entre otros inconvenientes. Sin embargo, existen normas específicas principalmente las de la *American Welding Society* (AWS) que contribuyen a solucionar esta problemática.

Otro problema observado para la realización de un procedimiento, en particular, es la gran diversidad de los aceros lo que no permite realizar un método unificado que abarque todas las piezas que se fabrican con este material, y, por ello se debe hacer los análisis respectivos, dependiendo de los elementos de maquinaria y equipo en que se emplean, es decir, tratando de

identificar los materiales de las piezas dañadas, para poder especificar el material necesario para la reconstrucción, esto es el tipo de electrodo.

### **1.1. Ubicación del tema**

Con la creciente demanda de mejorar la calidad de los procesos en la industria y asegurar el correcto funcionamiento de los equipos de producción se ha originado una significativa evolución en el mantenimiento industrial en las últimas décadas, optando por nuevas técnicas en la detección pronta de fallas y seguimiento funcional del equipo, con la finalidad de predecir el comportamiento de los elementos y así reducir al mínimo las averías y paros no deseados.

El concepto de mantenimiento puede definirse de varias formas, atendiendo al enfoque que se le dé en cada caso. Resulta obvio que mantenimiento son todas aquellas tareas orientadas a corregir y preservar el correcto funcionamiento del equipo así como prevenir fallas antes que se susciten y corregir las que ya se han presentado. En un sentido más amplio, se podría definir como todos los procesos que involucra una empresa desde el operador hasta el más alto ejecutivo. Bajo este principio podríamos encontrar diversas definiciones como tipos de mantenimiento, pero enfocándonos en la investigación presente, la primera definición se adecua perfectamente a los propósitos planteados.

Siguiendo en el mismo contexto, como se mencionó previamente, una de las tareas del mantenimiento es corregir todas aquellas fallas que se presentan en la maquinaria, ya sea por ruptura de los elementos o sustitución de piezas que han sufrido desgaste, enfocando las acciones en este último, siendo el eje principal del proyecto. Aun más, el mantenimiento no solo se refiere al remplazo de piezas y preservación de la maquinaria, sino que también al

aprovechamiento de los recursos disponibles, siendo necesario reducir costos en reparaciones y disminuir al mínimo los paros en la maquinaria.

Por lo anterior, el procedimiento de reacondicionamiento se hace esencial para las áreas de mantenimiento. El reacondicionamiento es el procedimiento mediante el cual se reconstruye o se readecua algo llevándolo a sus condiciones iniciales de funcionamiento, esto repercute en los conceptos de economía de escala, beneficiando directamente a las empresas que pueden invertir más en mano de obra calificada.

En lo referente al desgaste, este consiste en el fenómeno que ocurre de manera natural a todos los objetos existentes, pero, enfocado a los elementos de máquinas, se define como la pérdida de material en la interface de dos cuerpos, cuando se les somete a un movimiento relativo bajo la acción de una fuerza. Es decir, que todos los elementos de máquinas sufren desgaste, ya que estos están sometidos a esfuerzos y momentos que los afectan de una u otra manera.

Pero como cada uno de los elementos sufre desgaste de manera diferente y también depende del material del cual están constituidos, esto imposibilitaría realizar una investigación generalizada, por ello el presente trabajo se enfoca en los ejes de acero de medio carbono, específicamente, en el acero AISI 1045, que es el acero de mayor utilización en la fabricación de ejes.

Una de las formas para reacondicionar piezas que han sufrido desgaste prematuro, en este caso ejes, es utilizar soldadura, que comúnmente es con arco eléctrico de tipo SMAW, GMAW o GTAW. En el primero, se utiliza electrodo revestido, y, en los dos últimos, se protege el cordón de soldadura

con gas, pero dependerá del ingeniero o tecnólogo escoger el equipo que tenga la disposición o el que mejor se adecue a sus necesidades para realizar el trabajo.

La facilidad para soldar aceros depende, en cada caso, de sus propiedades físicas y químicas. Es frecuente, especialmente cuando se hacen trabajos de recuperación, que el ingeniero deba identificar de manera general el tipo de material base, para poder seleccionar el material de aporte. Esto significa que debe contar con varios métodos confiables, precisos y rápidos para identificar los metales, aquí juega un papel importante el ensayo a la chispa.

Así mismo, debe tener conocimiento del desgaste que se presenta en el elemento, ya que de esto dependerá el tipo de material de aporte necesario para la soldadura. Aun más, se debe conocer los tratamientos térmicos pre, durante y post soldadura para conservar las propiedades mecánicas de la pieza. De esta manera puede definirse la metodología a emplear en cada caso particular.

La operación de reacondicionamiento es un procedimiento complejo que involucra muchos factores, pero resulta sumamente efectivo cuando se realiza de manera adecuada. Pero cuando no se realiza apropiadamente, por ejemplo, si la calidad del recubrimiento es inferior al material base, sufrirá fallas prematuras, que además del desgaste, podrían inducir fracturas. Por otro lado, si es superior, podría afectar a los componentes mecánicos vecinos y agravar la falla.

Es por eso, que es indispensable contar con un marco de referencia que permita realizar la operación de reacondicionamiento de manera rápida, efectiva

y confiable, que sea fácil de comprender y de aplicar, para así, asegurar la calidad del trabajo, reducir costos de operación y de repuestos y prolongar la vida del elemento; en este caso ejes de acero AISI SAE 1045.

## **1.2. Planteamiento del problema**

El deterioro de los ejes de transmisión de maquinaria y equipo implica grandes gastos de remplazo, lo cual puede evitarse por medio de métodos de reconstrucción. En el caso específico del presente trabajo, se plantea la metodología para el reacondicionamiento de ejes que han sufrido desgaste, por medio de soldadura al arco.

### **1.2.1. Cuestionamientos**

¿Es posible la reconstrucción de ejes de acero que han sufrido desgaste? ¿Por qué se debe implementar un método para la reconstrucción de piezas por soldadura? ¿Dónde es necesario realizar el procedimiento de reconstrucción de piezas por soldadura? ¿Cuándo se emplea el procedimiento de reconstrucción de piezas por soldadura? ¿Qué factores afectan la reconstrucción de piezas por soldadura? ¿Es posible la reconstrucción de ejes que han sufrido otro tipo de falla diferente al desgaste?

### **1.2.2. Justificación**

La reconstrucción de piezas es uno de los procedimientos ingenieriles más común, ya que este permite reducir costos, ampliar tiempos en producción o simplemente solucionar parcialmente un problema. Como es habitual que un ingeniero trate con piezas de acero al carbono, es indispensable que este posea una herramienta útil que le permita guiarse en la reconstrucción de

piezas por soldadura. En muchos casos, este trabajo se realiza en forma empírica o con total desconocimiento por parte de la persona involucrada; esto puede generar problemas monetarios, pérdidas de material y de maquinaria, y de esta forma afectar la confiabilidad del ingeniero o estudiante de ingeniería.

Es por ello, que la propuesta de una base metodológica que sirva como guía para la realización de reconstrucción de ejes de acero de medio carbono por soldadura, queda más que justificada.

### **1.3. Metodología**

Para la realización del presente proyecto se efectuó la investigación bibliográfica pertinente, cuyos resultados se sintetizan en el marco teórico, complementándose con el marco conceptual del suscrito. Posteriormente, se realizó un análisis crítico de los procesos de soldadura al arco, buscando el procedimiento que se pudiese aplicar con mayor compatibilidad con los resultados esperados. Finalmente se procedió a aplicar un método experimental de levantado por cordones de soldadura. El desarrollo total del tema puede observarse en los capítulos siguientes:

- Capítulo II
  - Principios fundamentales
    - ✓ Ejes
    - ✓ Materiales empleados en la fabricación de ejes
    - ✓ Desgaste en ejes
  
- Capítulo III
  - Soldadura por arco eléctrico
    - ✓ Soldadura por arco manual con electrodo revestido

- ✓ Soldadura con arco manual con gas de protección
- ✓ Soldadura de arco de tungsteno con gas
  
- Capítulo IV
  - Acero AISI 1045 y sus propiedades mecánicas
  
- Capítulo V
  - Proceso experimental de reacondicionamiento de ejes afectados por desgaste
    - ✓ Verificación de las medidas iniciales
    - ✓ Proceso de reacondicionamiento
    - ✓ Proceso de soldadura
    - ✓ Selección del material de aporte
    - ✓ Parámetros de soldadura
    - ✓ Composición química resultante
    - ✓ Tratamiento térmico postsoldadura
    - ✓ Acabado final
    - ✓ Control de calidad
  
- Capítulo VI
  - Proceso experimental de los procedimientos de reacondicionamiento
    - ✓ Métodos experimentales
    - ✓ Análisis e interpretación de resultados



## **2. PRINCIPIOS FUNDAMENTALES**

Para poder realizar el reacondicionamiento de ejes es necesario conocer los principios y conceptos involucrados en el proceso. Los mismos se dan a conocer a continuación:

### **2.1. Ejes o árboles**

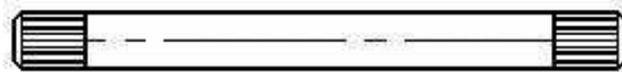
Se define eje o árbol, como un componente de dispositivos mecánicos que transmite movimiento rotatorio y potencia. Un eje se aloja por un diámetro exterior al diámetro interior de un agujero, como el de cojinete o un cubo, con el cual tiene un determinado tipo de ajuste. En algunos casos el eje es fijo y no gira; un sistema de rodamientos o de bujes insertadas en el centro de la pieza permite que ésta gire alrededor del eje. En otros casos, la rueda gira solidariamente al eje y el sistema de guiado se encuentra en la superficie que soporta el eje.

Para esta investigación es importante conocer los diferentes tipos de ejes o árboles que existen, estos se clasifican de la siguiente forma:

#### **2.1.1. Ejes lisos**

Exteriormente tienen una forma perfectamente cilíndrica, pudiendo variar la posición de apoyos, cojinetes, etc. Este tipo de ejes se utilizan cuando ocurre una torsión media.

Figura 1. **Eje liso**

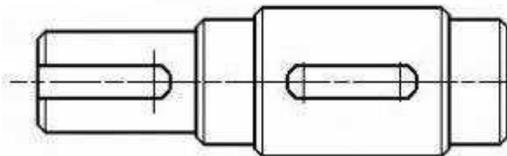


Fuente: ejesarboles.wordpress.com. Consulta: noviembre de 2011.

### 2.1.2. **Ejes Escalonados**

A lo largo de su longitud presenta varios diámetros. Este tipo de eje soporta diferentes momentos torsores y al igual que el anterior, se utiliza para la situación en que ocurran unas tensiones de torsión media haciéndoles los más utilizados.

Figura 2. **Eje escalonado**

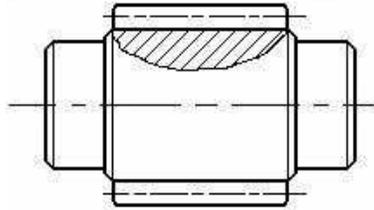


Fuente: ejesarboles.wordpress.com. Consulta: noviembre de 2011.

### 2.1.3. **Eje ranurado o con tallas especiales**

Presenta exteriormente ranuras siendo también de pequeña longitud. Se emplean para transmitir momentos torsores elevados.

Figura 3. **Eje ranurado**



Fuente: ejesyarboles.wordpress.com. Consulta: noviembre de 2011.

#### 2.1.4. **Eje hueco**

Se emplea por su menor inercia y por permitir que otro eje macizo pase por su centro. El interés radica en que las tensiones debidas al momento torsor son decrecientes al acercarse al centro del eje.

Figura 4. **Eje hueco**



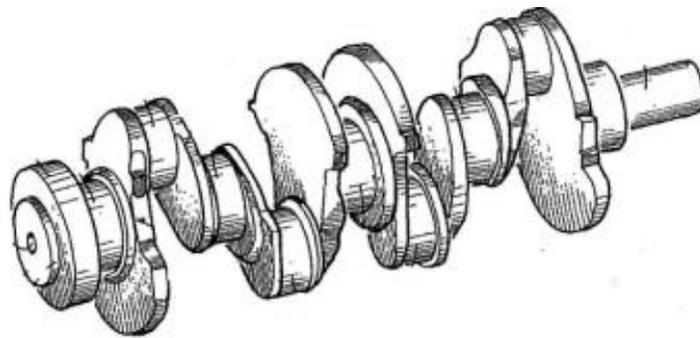
Fuente: <http://www.doco-international.com/es/products/ejes/45/eje-hueco.htm>.

Consulta: noviembre de 2011.

### 2.1.5. Eje acodado

Se emplean siempre que se quiera transformar en una máquina, el movimiento alternativo en movimiento giratorio y viceversa. Se pueden presentar momentos torsores importantes en algunos tramos. Se diferencia del resto de los árboles debido a su forma ya que no sigue una línea recta sino en forma de cigüeñal.

Figura 5. Eje acodado



Fuente: <http://patentados.com/invento/procedimiento-de-fabricacion-de-un-ciguenal.1.html>.

Consulta: noviembre de 2011.

## 2.2. Aplicaciones de los ejes

Los ejes se encuentran en máquinas de todo tipo y dispositivos mecánicos. Se les halla en diversas aplicaciones desde máquinas pesadas como: camiones, bombas, motores de combustión hasta dispositivos pequeños como bicicletas, podadoras, etc.

Las formas más comunes que tienen los árboles o ejes, de transmitir potencia, par, movimiento o soportar cargas, es a través de elementos de

máquinas tales como: engranajes, poleas y correas, piñones y cadenas, acoplamientos, etc.

La manera tecnológica de fijar los elementos a los árboles o ejes, supone mecanizar en los mismos chaveteros, ranuras para anillos elásticos, agujeros radiales para pasadores, continuos cambios de sección para bloquear axialmente los elementos que se fijan a los mismos, salidas de rosca, ranuras de engrase, etc.

### **2.3. Materiales empleados en la construcción de ejes**

Es de suma importancia conocer los materiales con los cuales se puede construir un eje, ya que la metodología se centra en aceros de medio carbono, se debe identificar el material que se tiene a disposición antes de efectuar el reacondicionamiento.

Con el fin de minimizar las deflexiones en los ejes (sin aumentar excesivamente su peso), se utilizan en su diseño y fabricación, materiales con elevado módulo de elasticidad. Sin duda, los materiales más utilizados son los aceros finos de construcción. Dentro de ésta serie, destacan especialmente:

- Aceros finos al carbono: se emplean en la construcción de ejes que no exijan elevadas características mecánicas. Una de sus principales características es la poca dificultad que existe para adquirirlos, en diferentes formas comerciales (redondos, cuadrados, pletinas, hexagonales). Los aceros de este grupo, admiten temple cuando su porcentaje en carbono supera el 0.3%.

La soldabilidad de estos aceros disminuye al aumentar su contenido en carbono. Los de  $\%C < 0.25$ , se sueldan con facilidad sin preparación previa. Por encima de este porcentaje, se recomienda precalentar y realizar un revenido posterior a la soldadura para eliminar tensiones internas.

- Aceros aleados de gran resistencia: se emplean en la construcción de ejes, que deban soportar elevadas cargas de fatiga, flexión o torsión. Los elementos de aleación (Cr, Ni, Mo), les confieren alta templabilidad sin excesivas deformaciones. La mayoría de ellos son comercialmente accesibles, aunque no tanto como los aceros al carbono.

Se pueden emplear en estado normalizado, aunque no tiene mucho sentido utilizar estos aceros, sin tratamiento térmico de temple y revenido. Sin embargo admiten soldadura, se recomienda precalentar y realizar un revenido posterior a la misma, para eliminar tensiones internas. No obstante se trata de evitar este tipo de unión.

- Aceros para cementación: se emplean en la construcción de ejes que deban poseer elevada tenacidad y alta dureza superficial. Algunos ejemplos de aplicación de estos aceros son la fabricación de árboles de levas, árboles en los que se tallen piñones, ejes sobre los que giren elementos mediante ajuste deslizante o mediante rodamientos sin pista interior (ejes de bicicletas), árboles que giren sobre cojinetes o sobre rodamientos sin pista interior.
- Aceros aleados resistentes a la corrosión (inoxidables): se emplean estos materiales en ambientes corrosivos, como maquinaria náutica, alimentación, industria petroquímica, lavadoras, etc., el uso de los aceros

inoxidables es limitado, debido a su precio, este varía según las condiciones de mercado y la calidad de los mismos, siendo fundamentalmente el cromo el componente que más influye en este aspecto.

Un acero inoxidable suele costar 3 a 5 veces más que un acero al carbono. El precio de su manufactura es elevado, debido a los altos contenidos en Cr y Ni, que hacen que su manufactura sea más costosa que la de los aceros al carbono giren elementos mediante ajuste deslizante o mediante rodamientos sin pista interior (ejes de bicicletas), árboles que giren sobre cojinetes o sobre rodamientos sin pista interior.

#### **2.4. Desgaste en ejes**

El desgaste es un fenómeno que ocurre naturalmente en todos los elementos construidos por el hombre, sin exceptuar los ejes. De allí, que dichos elementos estén sujetos a diversos factores que limitan su duración, por ello se hace importante el procedimiento de reacondicionamiento, para prolongar la vida útil del elemento. Para esta investigación, es importante conocer el tipo de desgaste que se presenta en el elemento a reconstruir, ya que esto determina el material de aporte y el procedimiento de soldadura a utilizar para realizar la operación correspondiente.

El proceso de desgaste, puede definirse como una pérdida de material en la interface de dos cuerpos, cuando se les ajusta a un movimiento relativo bajo la acción de una fuerza. En general, los sistemas de ingeniería implican el movimiento relativo entre componentes fabricados a partir de metales y no metales. El desgaste se clasifica de acuerdo con la naturaleza física del proceso subyacente, y como en el caso de los ejes este se presenta como

desgaste abrasivo, por adhesión, corrosivo y por fatiga. A continuación se definen cada uno de ellos:

### **2.4.1. Abrasión**

La abrasión es el mecanismo más común entre las distintas causas que producen desgaste en las piezas metálicas, aunque en la mayoría de los casos se presente una combinación de dos o más factores. El desgaste abrasivo se origina cuando dos superficies que actúan de forma recíproca se encuentran en contacto físico directo y una es significativamente más dura que la otra. Bajo una carga normal las asperezas de la superficie más dura penetran la superficie más suave, lo cual produce deformaciones plásticas e implica una deformación permanente.

Este tipo de desgaste se presenta de varias formas, y siendo este el más común, se describirá cada una de ellas para poder diferenciarlas al momento que se presenten.

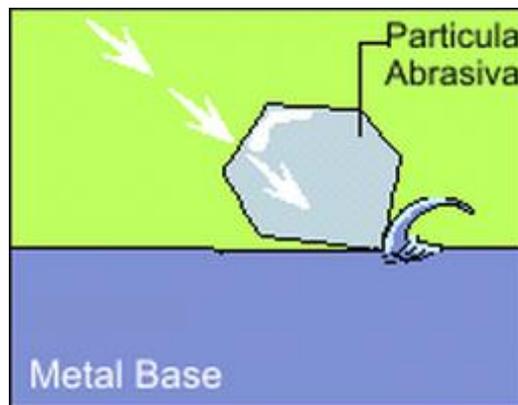
#### **2.4.1.1. Abrasión de bajo esfuerzo**

En general, es el tipo de abrasión menos severa. Las piezas se desgastan debido a la acción del desgarre repetido que producen las partículas duras y afiladas que se mueven por la superficie del metal a velocidades variables.

La velocidad, la dureza, el filo del reborde, el ángulo de ataque y el tamaño de las partículas abrasivas se combinan para influir sobre el efecto de la abrasión. Las aleaciones que contienen carburo de cromo se utilizan

exitosamente para resistir el desgaste por abrasión de bajo esfuerzo, por lo tanto, los electrodos que poseen este elemento son los más recomendados.

Figura 6. **Abrasión de bajo esfuerzo**



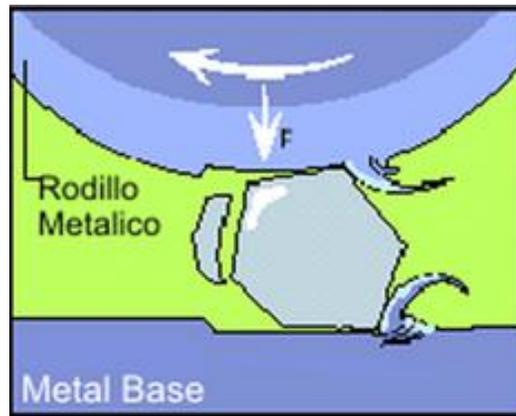
Fuente: <http://soldadura.org.ar>. Consulta: noviembre de 2011.

#### **2.4.1.2. Abrasión de alto esfuerzo**

Es más intensa que el simple desgarre y ocurre cuando pequeñas y duras partículas abrasivas son presionadas contra una superficie metálica con suficiente fuerza como para fracturar la partícula hasta triturarla. Generalmente, la fuerza de compresión la proporcionan dos componentes metálicos con el elemento abrasivo aprisionado entre ellos. La superficie se pone áspera producto del desgarre, lo que puede provocar grietas superficiales.

Los productos que mejor resisten este mecanismo de desgaste son los recargues austeníticos al manganeso, y las aleaciones que contienen carburos de tungsteno en una matriz tenaz.

Figura 7. **Abrasión de alto esfuerzo**



Fuente: <http://soldadura.org.ar>. Consulta: noviembre de 2011.

### **2.4.1.3. Abrasión por desgarramiento**

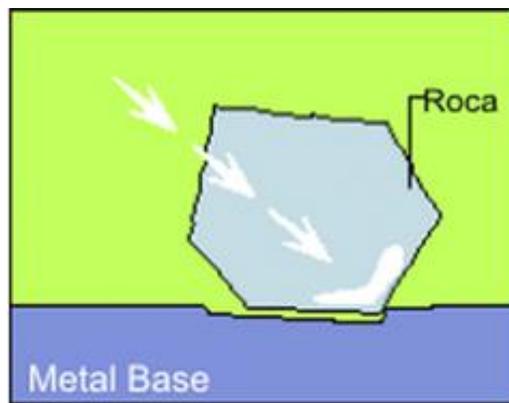
Cuando la abrasión de alto y bajo esfuerzo va acompañada de algún grado de impacto y carga, el resultado del desgaste puede ser extremo. En la superficie del metal se producen severas deformaciones y surcos cuando objetos macizos, a menudo rocas, son presionados fuertemente en su contra.

Cuando existe abrasión por desgarramiento, generalmente se utilizan aleaciones de carburo de cromo sobre una base de material tenaz, preferentemente de acero austenítico al manganeso.

En el caso muy frecuente del desgaste por abrasión, la naturaleza de la materia abrasiva (su dureza, su fragilidad, el grosor y la forma de sus granos) influye decisivamente en el comportamiento del depósito de recuperación y por consiguiente, en la elección de la categoría del electrodo.

Por lo tanto, salvo que se trate de un caso clásico en el que un producto ya ha demostrado su utilidad, el ensayo de la pieza en servicio, después de recargada, será únicamente lo que permita deducir si un electrodo conviene o no para una aplicación determinada.

Figura 8. **Abrasión por desgarramiento**



Fuente: <http://soldadura.org.ar>. Consulta: noviembre de 2011.

#### **2.4.2. Adhesión**

El desgaste adhesivo ocurre cuando dos superficies que se encuentran en deslizamiento, eje-cojinete, se adhieren fuertemente formando uniones entre ellas, un deslizamiento producirá un desprendimiento de materia de la superficie suave. Si el material es dúctil, la deformación que se produce antes de la partícula, es mucho mayor, la partícula que ha sido separada de la aspereza puede permanecer unida a la otra, como material transferido de una superficie a otra o puede ser liberada como partícula de desgaste. El aspecto de la superficie desgastada será de ralladuras irregulares y superficiales.

#### **2.4.2.1. Ludimiento**

Este desgaste se presenta por la acción combinada del desgaste adhesivo y corrosivo donde partículas de óxido que se desprenden del metal anódico, rayan las superficies en movimiento generando grietas y hendiduras en la superficie de ambos materiales.

#### **2.4.3. Corrosión**

Se denomina corrosión al deterioro o destrucción de un material causada por reacción con el medio ambiente. La combinación entre desgaste y corrosión pueden resultar en una pérdida total de material mucho más grande que si se presentaran por adición o individualmente. La deformación plástica por altos esfuerzos de contacto causa endurecimiento por deformación y susceptibilidad al ataque químico. De igual forma la deformación plástica ocurrida en el mecanismo de desgaste por fatiga pueden hacer que las superficies sean más susceptibles a la corrosión, el mecanismo de desgaste por corrosión se explica en dos etapas:

- Formación de una película de óxido en la superficie. Esta se puede originar por corrosión química, electroquímica, galvánica, microbiológica, etc.
- Al formarse la capa de óxido la superficie queda expuesta a los fenómenos de deslizamiento del sistema, siendo esta removida o rayada.

#### **2.4.4. Fatiga superficial**

El desgaste por el mecanismo de fatiga es el resultado de esfuerzos cíclicos entre las asperezas de dos superficies en contacto. El coeficiente de fricción es el factor determinante, ya que al estar las superficies lubricadas la adhesión y la abrasión es mínima, pero aun puede ocurrir el desgaste por fatiga. Este desgaste se obtiene en zonas de alta deformación muy cercanas a la superficie, creando grietas superficiales y sub-superficiales, las cuales cederán eventualmente.

Las cargas cíclicas en superficies no concordantes causan en el material sólido esfuerzos extremadamente elevados y después de varios millones de encuentros entre las asperezas de las superficies en contacto, estas se fatigan, y un pedazo de cualquiera de las superficies de los materiales expuestos se desprenderá.



### 3. SOLDADURA POR ARCO ELÉCTRICO

Según el Metals Handbook una de las formas actuales de reparación de elementos de máquinas es mediante soldadura. Se le llama soldadura a la unión de dos materiales que generalmente son metales o termoplásticos obtenido a través de un proceso de fusión en el cual las piezas son unidas derritiendo ambas y agregando metal o plástico derretido para conseguir una pileta o punto de soldadura que, al enfriarse, forma una unión fuerte.

La energía necesaria para formar la unión entre dos piezas de metal generalmente proviene de un arco eléctrico o también arco voltaico que es la descarga eléctrica que se forma entre dos electrodos sometidos a una diferencia de potencial y colocados en el seno de una atmósfera gaseosa enrarecida, normalmente a baja presión, o al aire libre. Aunque, cabe mencionar, que también se puede realizar la soldadura con gas, por fricción, por calor, presión, etc.

Es prioridad del soldador individual, dueño del taller de soldadura, usuario final, y otros afines que dependen de la industria de reparación por soldadura tener un profundo conocimiento de la historia de los componentes en términos de:

- Función del componente
- Composición del material
- Componentes de la superficie y de la dureza
- Componente originalmente soldado, fabricado o fundido

La reparación por soldadura puede caer en una de las tres categorías generales: la reparación de los defectos de soldadura, reparación de piezas defectuosas y la reparación de piezas desgastadas. En este trabajo se enfoca en piezas que han sido maltratadas por el desgaste.

Para poder seleccionar el método de soldadura a emplear, conociendo el material base del elemento a reparar, es necesario, determinar el tipo de desgaste que predomina en el elemento. En segundo lugar, es importante tener en cuenta el material de aporte que se va utilizar, principalmente materiales metálicos férricos, materiales metálicos no férricos y materiales no metálicos, como carburos o cerámicos. La selección del material vendrá condicionada por las características y propiedades finales deseadas en el elemento en cuestión, tales como: adherencia, dureza, permeabilidad, densidad, limitaciones de espesor, dificultades del mecanizado, etc. La adherencia en soldadura se conoce como grado de soldabilidad.

El material de aportación se funde mediante una fuente de energía, dando lugar a diferentes métodos de aportación:

- Arco eléctrico (SMAW, GMAW,..)
- Proyección con llama
- Proyección a plasma
- Detonación hipersónica

Como es habitual que los talleres de mantenimiento no posean todos los tipos de soldadura, y como se trata de un trabajo dirigido a estudiantes y laboratorios simples, el proyecto se basa en la utilización de los procesos SMAW, GTAW y GMAW, ya que estos son los más comunes y económicos de utilizar.

### 3.1. Soldadura por arco manual con electrodo revestido (SMAW)

La soldadura SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*), según el Metals Handbook, se caracteriza por la formación de un arco eléctrico entre una varilla metálica llamada electrodo, y la pieza a soldar. A través del mismo se hace circular corriente eléctrica, ya sea esta de tipo alterna o directa.

Se establece un corto circuito entre el electrodo y el material base que se desea soldar o unir, depositándose el núcleo del electrodo fundido al material que se está soldando, de paso se genera, mediante la combustión del recubrimiento, una atmosfera que permite la protección del proceso, esta protección se circunscribe a evitar la penetración de humedad y posibles elementos contaminantes. También se produce la escoria que recubre el cordón de soldadura generado.

Figura 9. Diagrama esquemático del proceso SMAW



Fuente: <http://itw-welding-spain-.com>. Consulta: noviembre de 2011.

De manera breve se definen los elementos fundamentales de la soldadura SMAW:

- Plasma: compuesto por electrones que transportan la corriente que van del polo negativo al positivo, y de iones metálicos que van del polo positivo al negativo. Donde los átomos gaseosos se van ionizando y estabilizándose conforme pierden o ganan electrones, los productos de la fusión y el revestimiento ayudan a la formación de la atmósfera protectora.
- Llama: es la zona que envuelve al plasma y presenta menor temperatura que éste, formada por átomos que se disocian y se recombinan desprendiendo calor por la combustión del revestimiento del electrodo, otorga al arco eléctrico su forma cónica.
- Baño de fusión: la acción calorífica del arco provoca la fusión del material, donde parte de éste se mezcla con el material de aportación del electrodo, provocando la soldadura de las piezas una vez solidificado.
- Deposito de soldadura: está constituido por el metal base y el material de aportación del electrodo y se pueden diferenciar dos partes: la escoria, compuesta por impurezas que son segregadas durante la solidificación y que posteriormente son eliminadas y el sobre espesor, formado por la parte útil del material de aportación y parte del metal base, que es lo que compone la soldadura en sí.
- Electrodo: son varillas metálicas preparadas para servir como polo del circuito; en su extremo se genera el arco eléctrico, en la mayoría de los casos, sirven también como material fundente. La varilla metálica a

menudo va recubierta por una combinación de materiales que varían de un electrodo a otro. El recubrimiento en los electrodos tiene diversa funciones, éstas pueden resumirse en las siguientes: formación del arco eléctrico, formación de escoria, y, aporte de elementos aleantes al cordón de soldadura.

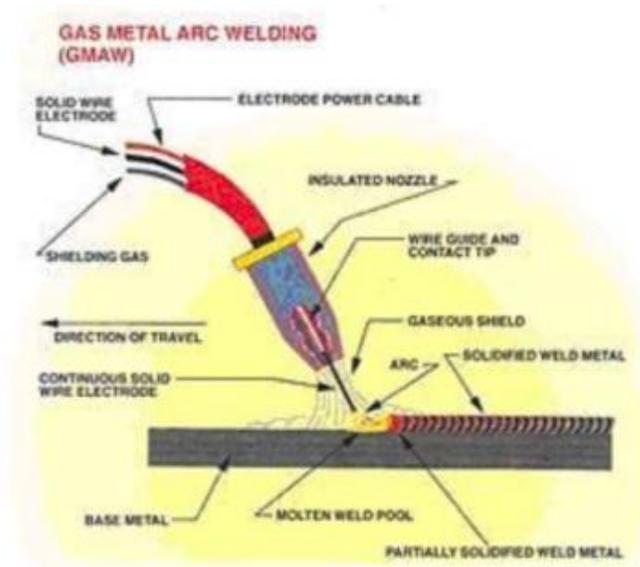
Este procedimiento por su gran versatilidad es ampliamente utilizado, se emplea para espesores superiores a 1.5 mm. La selección del electrodo adecuado para finalidades específicas, se realiza a partir de catálogos comerciales y del criterio teórico del diseñador del proceso.

### **3.2. Soldadura con arco manual con gas de protección (GMAW)**

El Metals Handbook define la soldadura GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) como el tipo de soldadura que utiliza un gas protector químicamente activo (dióxido de carbono, argón más dióxido de carbono o argón más oxígeno). El material de aporte tiene forma de varilla muy larga y es suministrado continuamente y de manera automática por el equipo de soldadura.

Este equipo opera bajo el mismo principio de la soldadura con electrodo, con una sola diferencia significativa, ya que el material de aporte viene en rollos y en forma de alambre continuo, permite una mayor movilidad en la ejecución, y con el beneficio, de que requiere un poco menos de destreza técnica por parte del operario, al mismo tiempo, el material de aporte no tiene revestimiento, porque el gas sirve como barrera protectora del cordón de soldadura.

Figura 10. Diagrama esquemático del proceso GMAW



Fuente: <http://infra.com.mx/temas07/01/edicion.html>. Consulta: noviembre de 2011.

De manera breve se presentan algunas de las características de la soldadura GMAW:

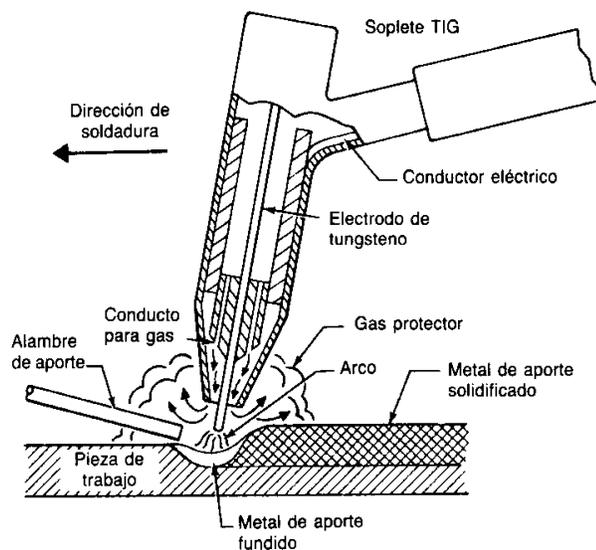
- Material base: comúnmente aceros al carbono, aceros inoxidables, metales no féreos, etc.
- Electrodo no consumible: la misión de este elemento es únicamente mantener el arco sin aportar material al baño. Se emplean tres tipos: tungsteno puro, tungsteno aleado con torio, tungsteno aleado con circonio.
- Material de aportación: aceros al Cr-Mo, aceros al Ni, aceros al Mn-Mo, aceros de baja aleación, aceros con cromo y níquel.

- Instalación: generador de c.c. y/o c.a., circuito de alta frecuencia, circuito de gas, porta electrodos, conjunto da válvulas y órganos de control.

### 3.3. Soldadura de arco de tungsteno con gas (GTAW)

El proceso GTAW (*Gas-Tungsten Arc Welding*), TIG (*Tungsten Inert Gas*) o Heliarco se define como un proceso de fusión, en el cual se genera calor al establecerse un arco eléctrico entre un electrodo de tungsteno no consumible y el metal de base o pieza a soldar. Como en este proceso el electrodo no aporta metal ni se consume, los aportes metálicos se hacen desde una varilla o alambre a la zona de soldadura utilizando la misma técnica que en la soldadura oxiacetilénica. La zona de soldadura estará protegida por un gas inerte, evitando la formación de escoria o el uso de fundentes o “flux” protectores.

Figura 11. Diagrama esquemático del proceso GTAW



Fuente: [elsaberdelsoldador.blogspot.com](http://elsaberdelsoldador.blogspot.com). Consulta: noviembre de 2011.

La temperatura de fusión necesaria para soldar materiales en el proceso GTAW se obtiene mediante la formación de un arco entre un electrodo de tungsteno y la pieza de aleación. Las temperaturas del pozo de soldadura pueden acercarse a 2500 °C (4530 °F). Un gas inerte sostiene el arco y protege el metal fundido de la contaminación atmosférica. El gas inerte es normalmente argón, helio, o una mezcla de helio y argón.

En la tabla siguiente se describen los gases apropiados para cada tipo de material a soldar.

Tabla I. **Gases inertes para GTAW**

Metal a soldar	Gas
Aluminio y sus aleaciones	Argón
Latón y sus aleaciones	Helio o Argón
Cobre y sus aleaciones (menor 3mm)	Argón
Cobre y sus aleaciones (mayor 3mm)	Helio
Acero al carbono	Argón
Acero inoxidable	Argón

Fuente: [www.metalactual.com](http://www.metalactual.com). Consulta: noviembre de 2011.

Este proceso produce soldaduras muy limpias y de alta calidad, lo que la hace una buena opción para aplicaciones en las cuales la estética es importante, o donde se requieren soldaduras casi perfectas. Ésta también funciona muy bien para materiales delgados, incluso aquellos con espesores en milímetros.

Por lo general, el proceso GTAW no produce chispas, salpicaduras ni humos, lo que la hace un proceso relativamente limpio, por esta razón, no

requiere demasiada limpieza después de soldar y muy pocas veces el operario tendrá que retirar escoria o pulir después del trabajo. La principal limitación del GTAW, es que es uno de los procesos de soldadura más lentos pues, al compararlo con los otros dos presentados (SMAW y GMAW) tiene una baja tasa de deposición; por lo que se emplea, sobre todo, para obtener soldaduras con una perfecta apariencia en espesores delgados.



#### **4. ACERO AISI 1045 Y SUS PROPIEDADES MECÁNICAS**

Es el acero al carbono templable más popular en la industria de fabricación de herramientas, se utiliza en todo tipo de aplicaciones donde se requiera soportar esfuerzos por encima de los 600 MPa (61 kgf/mm<sup>2</sup>), o en el caso de diámetros mayores, en donde se necesite una superficie con dureza media, 30 a 40 Rc, y un centro tenaz.

Según el Instituto Americano del Hierro y el Acero (AISI por sus siglas en inglés) el acero 1045 se define como un acero al carbono que posee entre 0.43% a 0.50% de carbono en composición, utilizado cuando la resistencia y dureza son necesarias en condición de suministro. Este acero de medio carbono puede ser forjado con martillo. Responde al tratamiento térmico y al endurecimiento por llama o inducción, pero no es recomendado para cementación o cianurado; cuando se hacen prácticas de soldadura adecuadas, presenta alta soldabilidad.

Por sus características de temple, se tiene una amplia gama de aplicaciones automotrices y de maquinaria en general, en la elaboración de piezas como ejes y semiejes, cigüeñales, etc., de resistencia media. En la siguiente tabla se observan algunas de sus propiedades:

Tabla II. **Propiedades del acero AISI 1045**

Tratamientos térmicos recomendados (valores en °C)

Forjado	Normalizado	Recocido		Templado	Revenido	Puntos críticos aprox.	
		Ablandamiento	Regeneración			Ac1	Ac3
1050-1200	870-890	650-700 enfriar al aire	800-850 enfriar al horno	820-850 agua 830-860 aceite	300-670	730	785

Nota: Temperaturas en grados centígrados

Propiedades mecánicas mínimas estimadas según SAE J1397

Tipo de proceso y acabado	Resistencia a la tracción			Límite de fluencia			Alargamiento en 2"%	Reducción de área %	Dureza Brinell
	Mpa	(kgf/m <sup>2</sup> )	Ksi	Mpa	(kgf/m <sup>2</sup> )	Ksi			
Caliente y maquinado	570	58	82	310	32	45	16	40	163
Estirado en frío	630	64	91	530	54	77	12	35	179

Fuente: <http://www.acerospalmexico.com.mx/1045.htm>. Consulta: noviembre de 2011.

#### 4.1. Composición química

La siguiente tabla resume la composición química del acero 1045:

Tabla III. **Composición química del acero AISI 1045**

%C	%Si	%Mn	P máx.	S máx.
0.43-0.50	0.15-0.35	0.60-0.90	0.04	0.05

Fuente: Metals Handbook vol.6, p. 1354.

## 4.2. Soldabilidad

Entre todas las propiedades que posee el acero, la soldabilidad es una de las más importantes para los fines de este trabajo. La soldabilidad se define como el grado de facilidad con que un metal permite que se obtengan soldaduras sanas y homogéneas, que respondan a las necesidades para las que fueron concebidas incluyendo códigos de fabricación.

La soldabilidad, desde el punto de vista metalúrgico, se define como: durante la soldadura en estado líquido en una región muy pequeña el material al ser soldado alcanza el estado líquido y luego solidifica. El aporte térmico suministrado se utiliza para fundir el metal de aporte (si existe), fundir parcialmente el metal base y el resto se transfiere a través del metal de soldadura modificando la microestructura (y propiedades mecánicas) inicialmente presentes.

En la soldadura se encuentran dos regiones de suma importancia las cuales son:

- Línea de fusión: es la interfaz entre la región fundida y la región en estado sólido, normalmente es la zona más propensa a la formación de fisuras, ya que existen áreas con fusión parcial.
- Zona afectada por calor (ZAC o HAZ por sus siglas en inglés *heat affected zone*): es la región del metal base que sufre ciclos de calentamiento y enfriamiento debido al aporte térmico de la soldadura. Se debe hacer énfasis en esta zona debido a que las propiedades metalúrgicas y mecánicas de la ZAC son directamente vinculadas con los parámetros de soldadura y los tratamientos térmicos post soldadura.

Para evitar cualquier problema durante la soldadura, es necesario conocer otro concepto que se conoce como carbono equivalente, el carbono equivalente de un acero, según el Metals Handbook, es la medida de su tendencia potencial a figurarse durante la soldadura. El valor del carbono equivalente se calcula aplicando la fórmula que ampara los elementos que componen químicamente el acero con sus ponderados coeficientes de influencia en el agrietamiento durante la soldadura en relación al C. Es una forma de estimar la soldabilidad de los aceros al carbono.

Hay muchas fórmulas, pero la más apropiada para nuestro trabajo es la expresada para aceros de baja aleación:

$$\%CE = \%C + \frac{(\%Mn + \%Si)}{6} + \frac{(\%Cr + \%Mo + \%V)}{5} + \frac{(\%Ni + \%Cu)}{15}$$

Otra herramienta importante para nuestro trabajo es el diagrama de B.A. Graville, este muestra la susceptibilidad de los aceros a la fisuración, relacionando el %CE/%C, que nos dará los parámetros para diseñar el procedimiento de soldadura, donde se debe incluir: tratamiento térmico pre, durante y post soldadura, de manera que se evite microestructuras susceptibles a la fisuración. La sensibilidad a la fisura en este diagrama se atribuye sólo a la composición química del acero y de algunos aceros a formar martensita.

Finalmente, el acero 1045, debido a su alto contenido de carbono, no es soldable por medios comunes sin comprometer su resistencia, el aumento de temperatura en la zona de la soldadura y su posterior enfriamiento temple el acero en las zonas próximas a la soldadura produciendo fragilidad y falla por el típico caso de rotura en la zona próxima a la soldadura. Existen aceros de medio carbono soldables, los cuales poseen aleantes que evitan la fragilización.

En secciones delgadas y flexibles, la soldadura eléctrica de gas puede usarse sin precalentamiento pero en materiales arriba de 3/16 hasta 5/8", 12.7 - 19.0 mm de espesor, el precalentamiento es necesario para mejorar la resistencia equivalente en la soldadura, se recomienda usar una baja aleación. Un relevado de esfuerzo o revenido después de la soldadura es recomendable; el grado de la soldadura a usar dependerá del espesor de la sección, diseño, requerimiento de servicio, etc.



## **5. PROCESO EXPERIMENTAL DE RECUPERACIÓN DE EJES AFECTADOS POR DESGASTE**

Habiendo efectuado la investigación bibliográfica pertinente aunado al conocimiento empírico, la metodología más efectiva para la recuperación de ejes afectados por desgaste se debe realizar de la siguiente manera:

### **5.1. Verificación de las medias iniciales**

Como parte inicial del proceso se debe verificar el desgaste que ha sufrido el eje a reacondicionar, ya que éste determina el punto de partida, tanto como, la selección del material de aporte como el procedimiento que se debe de realizar para el levantado de los cordones de soldadura. Es importante conocer los diferentes mecanismos de desgaste, los cuales fueron presentados en capítulos anteriores y así tener una idea clara del proceso a realizar.

#### **5.1.1. Método de ensayo visual**

Este es un procedimiento que se aplica a todos los elementos para encontrar fallas superficiales, se utiliza previo a la utilización de otros ensayos no destructivos (END). El principio básico del ensayo visual es iluminar bien la pieza, en la región a inspeccionar; esta será examinada entonces, directamente al ojo humano o por medio de un accesorio tal como un baroscopio o una lupa.

Dentro del equipo básico necesario para aplicar adecuadamente el ensayo visual está la lupa, el espejo de dentista, la regla metálica, el metro, el calibrador vernier, el micrómetro, una lámpara común o una de baterías.

En el presente trabajo sólo se utiliza el ensayo para detectar fallas, esto sirve para definir las acciones correspondientes, previo a la utilización de partículas magnéticas, líquidos penetrantes u otros END. Como se verá más adelante, se volverá a utilizar la inspección visual, pero esta vez para verificar la calidad del procedimiento de soldadura empleado.

## **5.2. Proceso de reacondicionamiento**

Como el mecanismo de desgaste por abrasión es el más común presentado en los ejes, el trabajo se enfoca en este, pero cabe resaltar que el desgaste, como mencionado previamente, pueden existir de varias formas y presentarse conjuntamente. A su vez, hay que tomar en cuenta la extensa reparación por soldadura, la cual puede introducir esfuerzos y deformaciones en el área trabajada, lo que puede dañar el componente.

Antes de intentar una reparación, hay que considerar tres factores fundamentales, uno de los cuales ya se hizo mención previa: la soldabilidad del material, la naturaleza de la falla que provocó la reparación, y las regulaciones de calidad de la soldadura.

### **5.2.1. Preparación de la superficie**

La preparación de la superficie a soldar debe realizarse de la siguiente manera:

#### **5.2.1.1. Remoción del defecto**

En caso de existir defectos adicionales al desgaste, el defecto puede ser removido por arco-aire de carbono, picadura, molido o mecanizado. El arco-aire

de carbono es el más práctico y más empleado, la implementación de oxicorte no es recomendable. Para utilizar el arco-aire de carbono en aceros de medio carbono, se debe precalentar el metal base, esta debe ser de por lo menos 100 ° F (38 °C).

Es imperativo que el defecto sea eliminado por completo, el metal base debe quedar limpio, libre de grietas, contracciones y porosidades. En áreas críticas, el uso de la inspección por partículas magnéticas o líquidos penetrantes de la cavidad de soldadura es muy recomendable.

Cabe señalar que la ranura debe estar preparada de tal manera que permita el acceso adecuado a la raíz del defecto. Esta preparación es a veces descrita como forma de canoa. (Para más información sobre el corte con arco-aire de carbono referirse al Metals Handbook vol. 6, pág. 2759).

Otra forma de preparar la pieza es por medio de arranque de viruta. Se utiliza el torno para desbastar la parte desgastada de la pieza, al igual que por arco-aire de carbono; se hace una limpieza total, liberando a la pieza de todos los residuos de escoria, porosidades y demás defectos inherentes al proceso, posteriormente, se utilizan pulidoras mecánicas para limpiar totalmente la superficie de asperezas o imperfecciones.

#### **5.2.1.2. Ensayo de partículas magnéticas**

Este ensayo no destructivo se utiliza para observar fisuras que se encuentren en la superficie después de haber mecanizado la misma. Las partículas aplicadas pueden ser secas o húmedas en suspensión en líquidos como agua o aceite; dichas partículas pueden ser de color rojo, anaranjado,

gris, negras o de otros colores, para facilitar su visualización en la pieza sujeta a ensayo.

Hay que tener ciertas consideraciones al momento de realizar el ensayo de partículas magnéticas. Soria propone lo siguiente:

- Películas de pintura u otras capas no magnéticas sobre la pieza pueden ocultar indicaciones, lo que hace que el resultado sea inexacto e inadecuado.
- La pieza a inspeccionar debe de ser ferromagnética.
- Para mejores resultados, el campo magnético debe tener una dirección que intercepte el plano principal de la discontinuidad; debido a esto, normalmente son requeridas dos o más secuencias de operaciones en una misma región de la pieza, en diferentes orientaciones del campo magnético.
- Es necesaria la desmagnetización de la pieza, después de haber concluido el ensayo.
- Para piezas de gran tamaño, son requeridas altas corrientes eléctricas.

En caso de encontrar alguna fisura en la pieza debe desbastarse localmente formando una hendidura en forma de canoa, luego se debe de rellenar la ranura con soldadura.

### 5.3. Proceso de soldadura

Los procesos de soldadura más usados son los presentados en secciones anteriores. La siguiente tabla proporciona las relaciones entre los parámetros a tomar en cuenta durante los procesos y los tipos de soldadura:

Tabla IV. **Clasificación de los procesos de soldadura en función de los parámetros de la soldadura y sus características**

Parámetros o características	Proceso		
	SMAW	GTAW	GMAW
Calidad de la soldadura	Bueno	Excelente	Excelente
Velocidad de depósito	Aceptable	Pobre	Bueno
Trabajo de campo	Excelente	Pobre	Aceptable
Mantenimiento de equipo	Bajo	Bajo	Medio
Emisión de gases	Alto	Bajo	Medio
Control del calor de entrada	Excelente	Pobre	Bueno
Visibilidad del arco y colocación del material de aporte	Bueno	Excelente	Satisfactorio
Variedad de metales a soldar	Excelente	Excelente	Bueno

Fuente: Metals Handbook vol.6, p. 2750.

### 5.4. Selección del material de aporte

Los aceros de medio carbono tienen la tendencia a la formación de fisuras o rajaduras en metal base, más cuando se trata de grandes espesores.

El precalentamiento de la pieza y el empleo de electrodos de bajo hidrógeno, especialmente fabricados reducen esta tendencia al mínimo. El alto contenido de carbono contribuye, a la vez, a la formación de poros y en algunos casos, de asperezas en la superficie trabajada.

Por todas las condiciones presentadas, se debe tener especial precaución cuando aparecen poros o fisuras, o cuando se manifiesta una tendencia a zonas duras o quebradizas en las zonas adyacentes a la soldadura. Al soldar estos aceros, se debe mantener la temperatura de precalentamiento durante todo el proceso de soldadura, y al terminar el trabajo, se debe enfriar la pieza en forma lenta y uniforme hasta la temperatura de un ambiente cerrado, es decir, sin corrientes de aire.

El material de aporte debe seleccionarse adecuadamente, este debe poseer las mismas características que el metal base, para este caso los electrodos del proceso SMAW de la especificación AWS A5.1 son los más convenientes, en esta ocasión, a manera de ejemplo, se utilizará el electrodo E 9018-B3. La composición química del electrodo E 9018-B3 se muestra en la siguiente tabla:

Tabla V. **Composición química del electrodo E 9018-B3**

%C	%Mn	%Si	%P	%S	%Cr	%Ni	%Mo
0.05	0.86	0.55	0.012	0.009	2.31	0.06	1.08

Fuente: /www.indura.cl/\_file/file\_2720\_9018-b3.pdf. Consulta: noviembre de 2011.

Al observar su composición, se hace compatible con el acero AISI 1045, cuya composición se refirió en la tabla III.

## **5.5. Parámetros de soldadura**

Los parámetros a considerar durante la realización de la soldadura son los siguientes:

### **5.5.1. Temperatura de precalentamiento**

Como se había mencionado en el párrafo anterior, el precalentamiento es esencial para evitar la templabilidad del metal y también rajaduras, fisuras u otros problemas que ocurren durante la soldadura. Para Quesada la temperatura de precalentamiento tiene como principal función disminuir la velocidad de enfriamiento del conjunto soldado.

Se aplica localmente por resistencia eléctrica o llama de gas y su medición se realiza, siempre que sea posible, en la cara opuesta a la que se está aplicando la fuente de calor, por medio de termocuplas o lápices termoindicadores; en la actualidad, se hace uso continuo de termómetros láser.

Existen numerosos métodos para determinar o estimar la temperatura de precalentamiento en el proceso de soldadura de aceros, estos métodos consideran algunos o todos de los factores que influyen en la fisuración en frío, los cuales son: composición química del acero, difusión de hidrógeno, calor aportado, espesor del metal base, tensiones residuales en la soldadura y restricción de la junta. Para este caso se hace referencia a la norma Británica BS 5135-74, ya que ésta es aplicable a los aceros al carbono y carbono-manganeso.

El efecto de la composición se evalúa a través de la ecuación de carbono equivalente para aceros al carbono presentada en el capítulo 5. Pero como la

transferencia de calor está en función del espesor del material, se establece ciertas ecuaciones donde se calcula el llamado Espesor Equivalente o Combinado, que es la suma de los espesores de los caminos de disipación térmica constituidos por los materiales que concurren a la junta. Para resumir el trabajo de cálculo, la tabla de precalentamientos (anexos), tomada de la norma AWS D1.1, resume las temperaturas a las cuales se debe precalentar la pieza en función del espesor de la misma.

### 5.5.2. Parámetros del electrodo

Para realizar correctamente el cordón de soldadura hay que conocer la corriente necesaria para la aplicación del mismo, la siguiente tabla resume los parámetros para este propósito.

Tabla VI. **Parámetros del electrodo E 9018-B3**

Diámetro (mm)	Longitud (mm)	Amperaje		electrodos x kg aprox.
		mín.	máx.	
2,4	300	65	95	65
3,2	350	90	140	32
4,0	350	130	180	24
4,8	350	170	240	12

Fuente: [www.indura.cl/\\_file/file\\_2720\\_9018-b3.pdf](http://www.indura.cl/_file/file_2720_9018-b3.pdf). Consulta: noviembre de 2011.

El cordón de soldadura se aplicará como fue propuesto por Aguilar Rivas y Soria en las fuentes citadas (2), (3), (4) y como se establece en el capítulo siguiente.

## 5.6. Composición química resultante

Cuando se aplica el material de aporte, por medio de fusión, este se mezcla con el material base, la composición química final será la mezcla entre estos dos. Para conocer la composición química del área soldada es importante conocer el coeficiente de dilución, que se define como: el porcentaje de metal base fundido con respecto al metal aportado en la soldadura.

Para conocer la composición química se utiliza la siguiente fórmula:

$$C_x = C_f + \frac{D(C_a - C_f)}{100}$$

Donde:

$C_x$  = % del elemento "x" en la soldadura

$C_f$  = % del elemento "x" en el metal de aporte "f"

$C_a$  = % del elemento "x" en el metal base "a"

D = % de dilución o Coeficiente de dilución total

El coeficiente de dilución total se resume en la siguiente tabla, extraída de la misma fuente:

Tabla VII. **Porcentaje de dilución de los procesos de soldadura**

Proceso	% Dilución
SMAW	20-30
SAW	25-50
GMAW cortocirc.	15-30
GMAW spray	25-30
GTAW c/aporte	20-40
GTAW s/aporte	100

Fuente: Metals Handbook vol.6, p. 854.

Entonces la composición química de la soldadura al finalizar el método propuesto con el electrodo seleccionado es la siguiente:

Tabla VIII. **Composición química resultante**

	%C	%Mn	%Si	%P	%S
Material base AISI 1045	0.45	0.75	0.25	0.04	0.05
Material de aporte E 9018-B3	0.05	0.86	0.55	0.012	0.009
Material Resultante (25% de dilución)	0.15	0.83	0.48	0.019	0.019

Fuente: elaboración propia.

### 5.7. Tratamiento térmico postsoldadura (TTPS)

Después de la soldadura el tratamiento térmico actúa como un proceso de revenido para la reducción de la dureza en la zona afectada por el calor y el

metal soldado, el revenido es un tratamiento térmico mediante el cual se calienta el material a una temperatura inferior a la temperatura crítica (aproximadamente 1340 ° F (727 °C) para aceros al carbono). El TTPS de los aceros al carbono se hace generalmente en el rango de 1100-1200°F (600-650°C), aunque algunos códigos sólo especifican la temperatura mínima de 1100°F (593 °C).

Un efecto secundario del revenido consiste en permitir una transformación adicional de la estructura de grano martensítico en ferrita, pero el principal objetivo es revenir la martensita, el resultado puede ser mayor ductilidad y tenacidad; además de reducir la dureza. Si la temperatura de revenido es demasiado alta o retenida prolongadamente, puede resultar en una reducción considerable en la dureza, por lo tanto, se recomienda que la temperatura de homogenización sea de ½ hora por cada ½ pulgada de espesor.

### **5.8. Acabado final**

Se finaliza el proceso de reconstrucción mecanizando la superficie trabajada, llevándola a sus dimensiones requeridas, posteriormente, se pule la pieza para darle un mejor acabado; luego de la reconstrucción se espera que la pieza luzca como nueva.

### **5.9. Inspección de la calidad de la soldadura**

Finalmente se inspecciona la calidad de la reparación por soldadura mediante END, las normas de la AWS nos dan las pautas para verificar la calidad del proceso. Se debe tomar en cuenta varios factores, como los procesos de soldadura SMAW, GMAW, GTAW, la temperatura de precalentamiento, el tratamiento térmico empleado después de la aplicación de

la soldadura; los cuales deberán ser tomados en cuenta al momento de calificar la reconstrucción.

El examen no destructivo se emplea en las soldaduras para verificar si ésta cumple con las especificaciones de calidad, y para verificar si dicha calidad se ha degradado durante el servicio.

Los métodos más comunes de END aplicables a la soldadura son:

- Inspección visual (VT)
- Líquidos penetrantes (PT)
- Partículas magnéticas (MT)
- Radiografía (RT)
- Corrientes Eddy (ET)
- Ultrasonido (UT)
- Emisión acústica (EAT)

Durante la inspección se examinan discontinuidades y defectos. La discontinuidad se refiere a una interrupción en la estructura típica de la soldadura. Puede consistir de una falta de homogeneidad en las características mecánicas, metalúrgicas o físicas del metal base o de la soldadura. Una discontinuidad no es necesariamente un defecto.

El término defecto, por otro lado, se utiliza para señalar una discontinuidad, la cual por naturaleza o efecto hace que una soldadura no llene los patrones de aceptación. El término designa una condición de rechazo. El pleno conocimiento de cada END es necesario para la selección apropiada del método para cada ocasión.

## **6. PROCESO EXPERIMENTAL DE LOS PROCEDIMIENTOS DE REACONDICIONAMIENTO**

Con base en el análisis teórico realizado previamente, en este capítulo se efectuaron pruebas para la obtención de la técnica más adecuada para la realización de los cordones de soldadura así como el tipo de electrodo (E 8018-B2, E9018-B3) más conveniente para el acero 1045. Se pusieron a prueba tanto los métodos convencionales como el procedimiento de traslape propuesto por Aguilar Rivas y Soria en las fuentes citadas (2), (3), (4).

Se tomó una muestra previa del material base para verificar microscópicamente la estructura inicial, para luego, compararlas con el material soldado. Se efectuó en las probetas soldadas, inspección visual y por END de partículas magnéticas, tintas penetrantes y radiografías para comparar los métodos de levantado de cordones.

Ya que el acero 1045, según tabla #2, posee una resistencia a la tracción entre 85 y 90ksi, y dado, que los electrodos citados están dentro de este mismo rango, estos darán la resistencia requerida para el recubrimiento. Pero como los electrodos poseen composiciones químicas muy semejantes, será el contenido de cromo quien determine cuál de ellos es el mejor y para comprobarlo se realizó inspección microscópica tratando de determinar la diferencias metalografías producidas por cada tipo de electrodo.

## **6.1. Métodos experimentales**

Todo el procedimiento empleado durante la fase experimental se explica en los párrafos siguientes, así como los resultados obtenidos:

### **6.1.1. Equipo**

- Equipo de soldadura SMAW con corriente DC+, 105 y 160amp a 220 V
- Pulidora 4" (disco de corte y pulido)
- Resistencia eléctrica (Precalentamiento de la pieza)
- 1 sonda termopar (control de temperatura)
- 5 Probetas de 2.54 cm de diámetro y 12 cm de largo
- Electrodo (E 8018-B2, E 9018-B3)
- Lijadora por vibración

### **6.1.2. Procedimiento para la realización de cordones**

En esta parte se separan los métodos empleados en dos partes empleando tanto el método tradicional o convencional y el método de traslape propuesto por Aguilar Rivas y Soria. Los ensayos se describen de la siguiente forma:

- Para esta prueba se llevo la probeta con un soldador industrial calificado y se le indicó que soldase o calzase la probeta con el método convencional. Los cordones se realizan de forma escalonada, es decir, uno a la par del otro, luego entre estos se realiza otro para llenar el espacio vacío. Se pule los defectos superficiales (Fig. 12). No se le proporcionó ninguno de los criterios antes descritos. Se trabajó a 220 voltios, corriente continúa a 160 amp. Como no se le proporcionaron los

parámetros de soldadura solo se realizó una prueba con electrodo E 8018-B2.

Figura 12. **Primer ensayo de levantado de cordones**



Fuente: resultados experimentales inspección visual, realizado en el Laboratorio de Metalurgia.

- Utilizando el método convencional, descrito en el punto anterior, se precalentó la probeta, con la resistencia eléctrica, a una temperatura de 120 °C manteniéndola durante todo el levantado de cordones. (Fig. 13), se trabajó a 220 voltios, corriente continua a 105 amp.

Figura 13. **Segundo ensayo de levantado de cordones**



Fuente: resultados experimentales inspección visual, realizado en el Laboratorio de Metalurgia.

- Con la temperatura indicada en el párrafo anterior, se procede a realizar el otro método de reacondicionamiento. Se realizan cordones de forma lineal sin oscilar. Cuando se realiza el primer cordón se debe pulir las dos orillas del mismo con el disco de corte, luego se realiza el otro cordón con traslape al 50% del anterior y de igual forma se pulen las orillas. Se realiza este procedimiento en todos los cordones hasta llenar toda la superficie de la probeta (Fig. 14). Se trabajó a 220 voltios, corriente continúa a 105 amp.

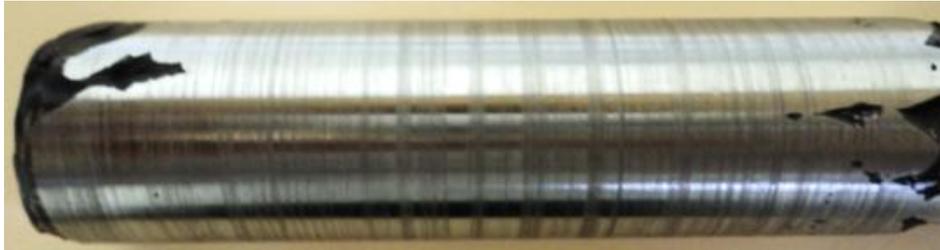
Figura 14. **Tercer ensayo de levantado de cordones**



Fuente: resultados experimentales inspección visual, realizado en el Laboratorio de Metalurgia.

Después de haber realizado los cordones las probetas se trabajaron en torno para limpiar la superficie, luego se volvió a aplicar otra capa de soldadura con su respectivo método, para después, volver a llevar al torno. Cabe resaltar que las probetas se enfriaron lentamente después del procedimiento de soldadura, el resultado final se observa en las siguientes imágenes:

Figura 15. **Probeta terminada primer ensayo con electrodo E 8018-B2**



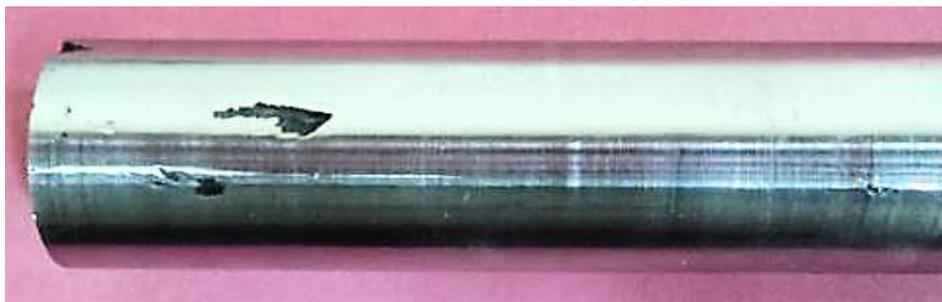
Fuente: resultados experimentales inspección visual, realizado en el Laboratorio de Metalurgia.

Figura 16. **Probeta terminada con electrodo E 9018-B3**



Fuente: resultados experimentales inspección visual, realizado en el Laboratorio de Metalurgia.

Figura 17. **Segundo ensayo terminado con electrodo E 9018-B3**



Fuente: resultados experimentales inspección visual, realizado en el Laboratorio de Metalurgia.

Figura 18. **Tercer ensayo terminado con electrodo E 9018-B3**



Fuente: resultados experimentales inspección visual, realizado en el Laboratorio de Metalurgia.

Figura 19. **Probeta terminada con electrodo E 8018-B2**



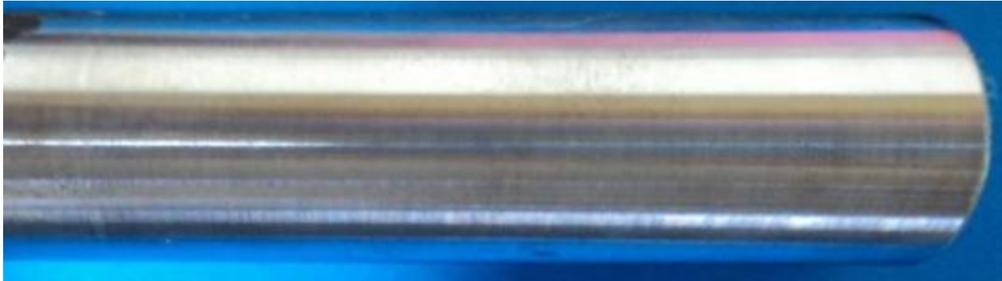
Fuente: resultados experimentales inspección visual, realizado en el Laboratorio de Metalurgia.

Figura 20. **Segundo ensayo terminado con electrodo E 8018-B2**



Fuente: resultados experimentales inspección visual, realizado en el Laboratorio de Metalurgia.

Figura 21. **Tercer ensayo terminado con electrodo E 8018-B2**



Fuente: resultados experimentales inspección visual, realizado en el Laboratorio de Metalurgia.

### **6.1.3. Ensayo microscópico**

La preparación de las muestras para el ensayo microscópico debe de realizarse de la siguiente forma:

Para lograr que las probetas sean observadas bajo el microscopio es necesario realizar un pulido tipo espejo sobre la superficie de las probetas. Para ello, se utilizó probetas de  $\frac{3}{4}$ " de largo por el diámetro de acabado (extraída de las probetas ya soldadas y del material base). Se comienza por pulir la superficie (utilizando la lijadora para obtener mejores resultados) con lija de agua #120 y así bajando la rugosidad de la lija hasta llegar a la #2500, finalizando con paño de lona y polvo de pulir, para la observación en el microscopio se ataca la superficie lijada con nital al 5% durante tiempos crecientes, el resultado se observa en la siguiente imagen:

Figura 22. **Probetas ensayo microscópico**



**a) Probeta atacada con nital 5%; b) Probeta pulida hasta lija #2500**

Fuente: resultados experimentales inspección visual, realizado en el Laboratorio de Metalurgia.

## **6.2. Análisis e interpretación de resultados**

Luego de realizar los ensayos correspondientes se obtienen los siguientes resultados:

- El espesor obtenido por el método convencional es de aproximadamente 2.2 / 2.5mm y para el método de traslape es de 3 / 3.5mm, para el mismo número de pasadas, los defectos de socavaduras del método convencional que se observan en las imágenes 15, 17 y 20 del presente capítulo, se debe a la falta de homogeneidad del proceso, es decir, en algunos puntos el cordón es más elevado que en otros, y por ello, se observan las imperfecciones. Se podría decir, que si el soldador continuase soldando sobre la superficie defectuosa, estas imperfecciones se mantendrían, con lo cual, todo el procedimiento de soldadura sería rechazado al momento de la evaluación por ensayo no destructivo. El

método de traslape, por otra lado, mostro un mejor maquinado y una superficie más uniforme (Figuras 18 y 21).

Los ensayos no destructivos superficiales mostraron los siguientes resultados: en el ensayo por partículas magnéticas (Figs. 23 y 24) no se encontraron defectos significativos, para ambos métodos. Por otra parte, en el examen de líquidos penetrantes se encontraron algunas porosidades (Figs. 25, 26 y 27), pero ninguna para rechazar la soldadura.

En la figura 28 se observa mayor cantidad de porosidades por parte del método convencional, primer ensayo, en donde no se tuvo control sobre las temperaturas de trabajo. Cuando se trabajó con temperaturas de precalentamiento, estos defectos disminuyeron considerablemente (Figs. 29 y 30). En el método de traslape no se encontraron porosidades.

- La radiografía, figura 31, muestra la inexistencia de imperfecciones a nivel sub superficial en los métodos de soldadura, esto muestra que, si se siguen los lineamientos de soldadura presentados en el capítulo 5 se reduce la cantidad de defectos de porosidades, por otro lado, todo el procedimiento de reacondicionamiento se optimiza al utilizar el método de traslape.

Con el fin de analizar la zona afectada por el calor y las características de la zona soldada se realizaron ensayos microscópicos que dieron los resultados de las figuras 32 a la 40. Para poder establecer diferencias microscópicas relevantes se realizaron ensayos por medio de recocido a 900°C y tiempos crecientes con enfriamiento en el horno, habiéndose determinado que no existen diferencias considerables entre probetas.

Como se observa, al comparar las figuras 32 y 33, el núcleo de la probeta no cambió de estructura durante el proceso de soldadura, esta mantuvo la misma proporción de ferrita y perlita en un aproximado de 50-50. En la zona afectada por el calor 33, 36, 37, 39 no se encontró ninguna microfisura, se observa una zona de grano refinado, rica en perlita y ferrita. Al realizar el procedimiento de recocido, tanto en la figura 36 como en la 38, no se hizo visible formación de martensita, atrapes de hidrogeno y fisuras, esto se debe a temperaturas específicas durante la soldadura.

La diferencia entre ambos electrodos está en la zona de soldadura, se observa mayor cantidad de carburos de cromo en la probeta soldada con electrodo E 9018-B3 (figura 37). El objetivo de este ensayo era verificar la existencia de zonas defectuosas, estas no se presentaron al observar una serie de probetas, se puede decir, que ambos electrodos son compatibles con el acero 1045 y que dependerá de la resistencia requerida para fines específicos.

Figura 23. **Probeta con electrodo E 9018-B3 evaluada con partículas magnéticas secas**



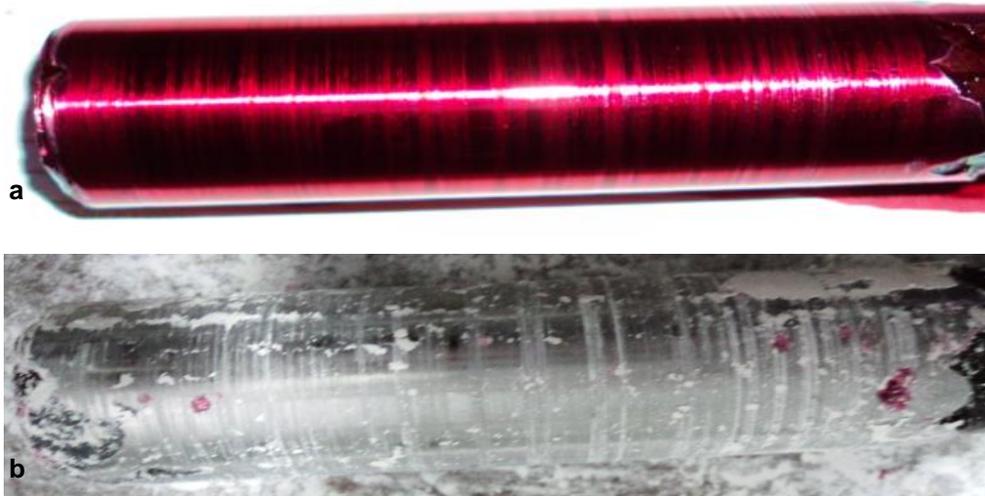
Fuente: ensayo no destructivo, realizado en el Laboratorio de Metalurgia.

Figura 24. **Probeta con electrodo E 8018-B2 evaluada con partículas magnéticas secas**



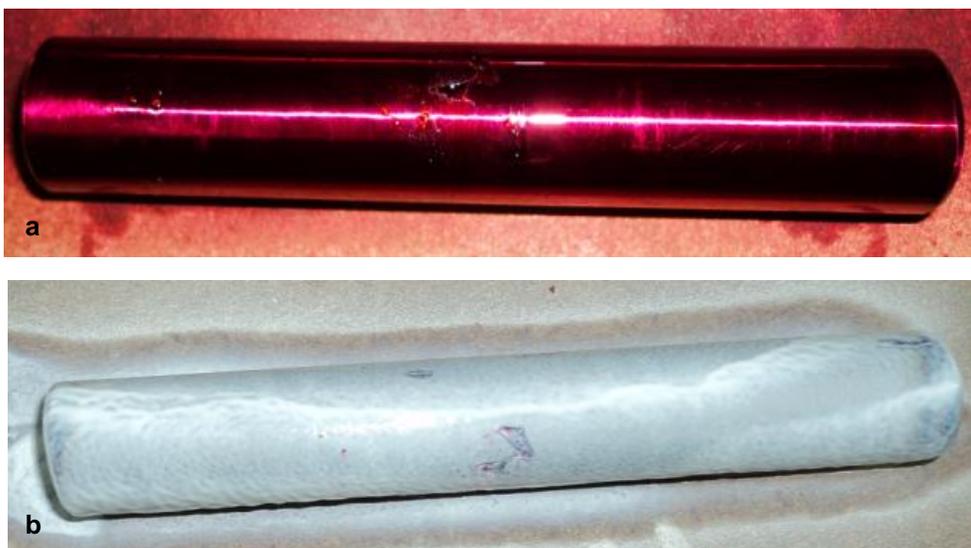
Fuente: ensayo no destructivo, realizado en el Laboratorio de Metalurgia.

Figura 25. **Probeta método primer ensayo evaluada con tintas penetrantes, a) líquido penetrante, y, b) revelador**



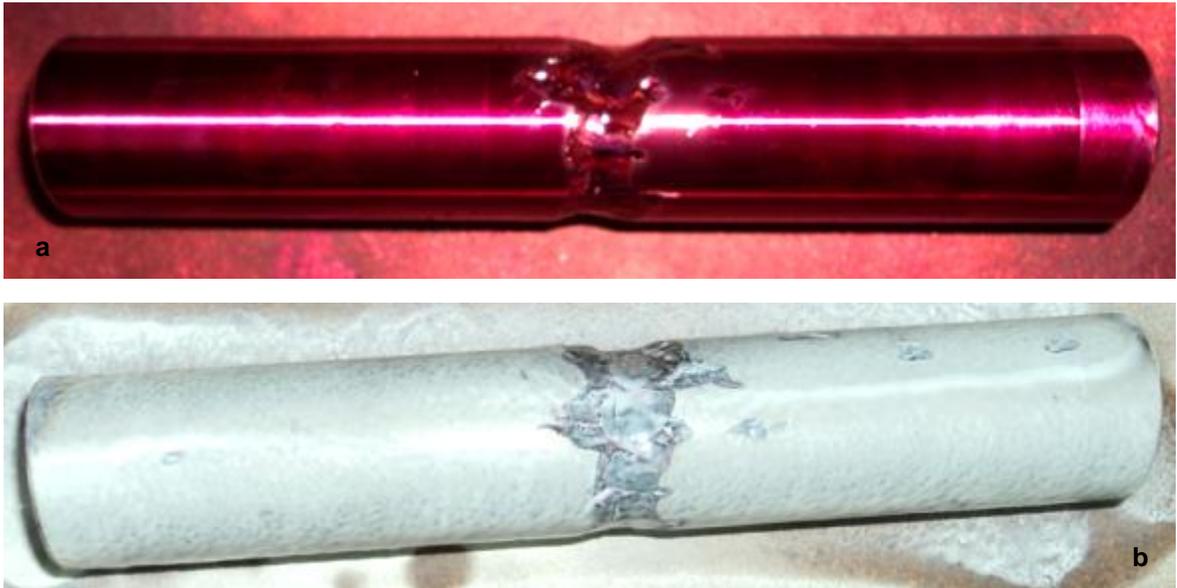
Fuente: ensayo no destructivo, realizado en el Laboratorio de Metalurgia.

Figura 26. **Probeta con electrodo E 9018-B3 evaluada con tintas penetrantes, a) líquido penetrante, y, b) revelador**



Fuente: ensayo no destructivo, realizado en el Laboratorio de Metalurgia.

Figura 27. **Probeta con electrodo E 8018-B2 evaluada con tintas penetrantes, a) líquido penetrante, y, b) revelador**



Fuente: ensayo no destructivo, realizado en el Laboratorio de Metalurgia.

Figura 28. **Probeta método primer ensayo con electrodo E 8018-B2 defectos encontrados con tintas penetrantes**



Fuente: ensayo no destructivo, realizado en el Laboratorio de Metalurgia.

Figura 29. **Probeta segundo ensayo con electrodo E 9018-B3 defectos encontrados con tintas penetrantes**



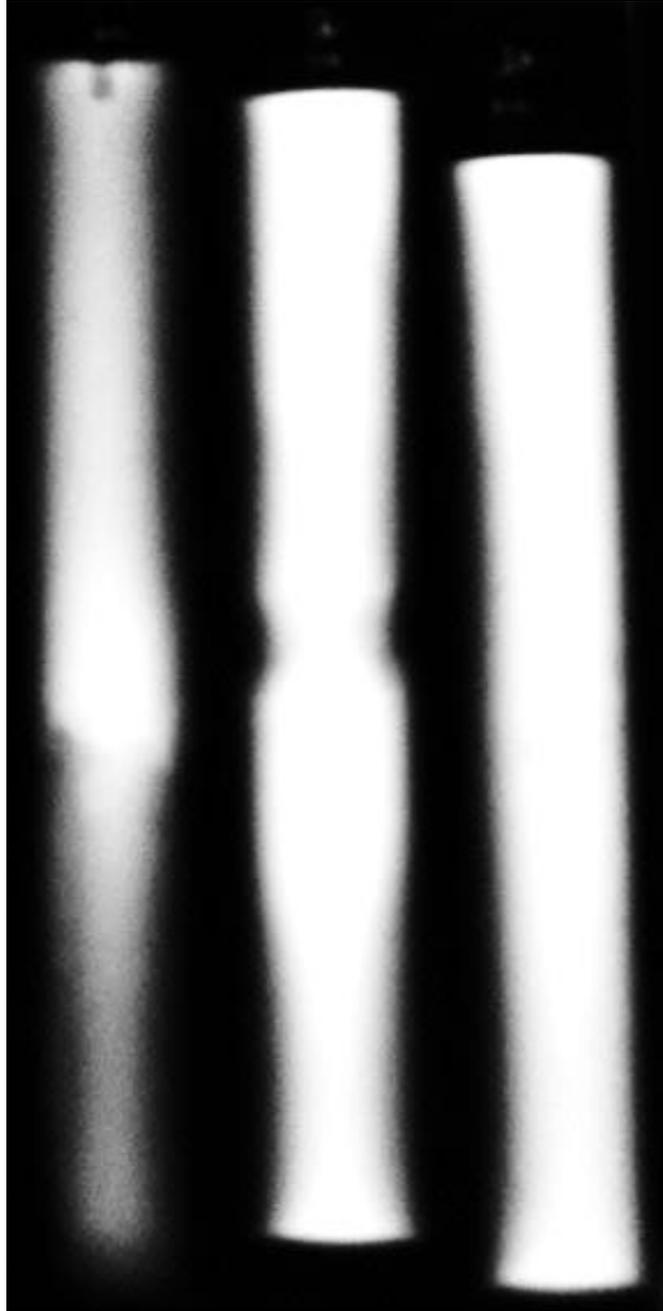
Fuente: ensayo no destructivo, realizado en el Laboratorio de Metalurgia.

Figura 30. **Probeta segundo ensayo con electrodo E 8018-B2 defectos encontrados con tintas penetrantes**



Fuente: ensayo no destructivo, realizado en el Laboratorio de Metalurgia.

Figura 31. Radiografía de las probetas soldadas



Fuente: ensayo no destructivo, realizado en SIE LTDA.

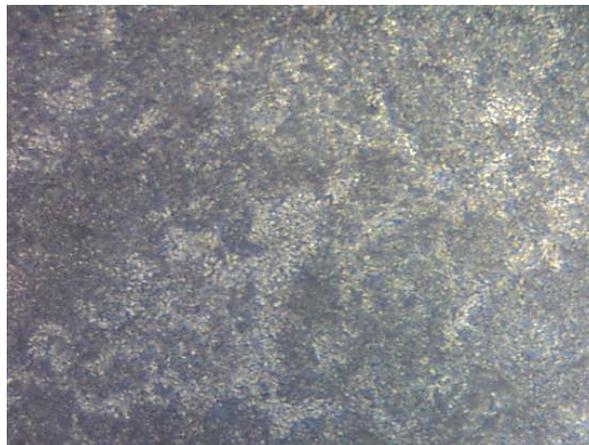
Figura 32. **Núcleo de probeta acero 1045**



Atacado con Nital 5%. Magnificación 1000x. Muestra una proporción de aproximadamente 50-50 de ferrita y perlita.

Fuente: ensayo microscópico, realizado en el Laboratorio de Metalografía.

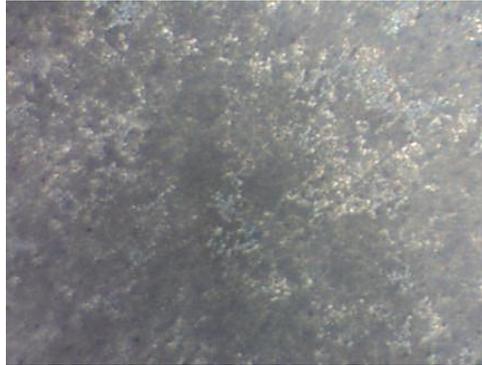
Figura 33. **Núcleo de probeta acero 1045 soldada con E 8018-B2**



Atacado con Nital 5%. Magnificación 500x. Con los mismos resultados que la figura 32.

Fuente: ensayo microscópico, realizado en el Laboratorio de Metalografía.

Figura 34. **Zona afectada por el calor, acero 1045 soldada con electrodo E 8018-B2**



Atacado con Nital 5%. Magnificación 1000x. Se observa una misma proporción de ferrita y perlita, pero esta es más fina. No se aprecian defectos.

Fuente: ensayo microscópico, realizado en el Laboratorio de Metalografía.

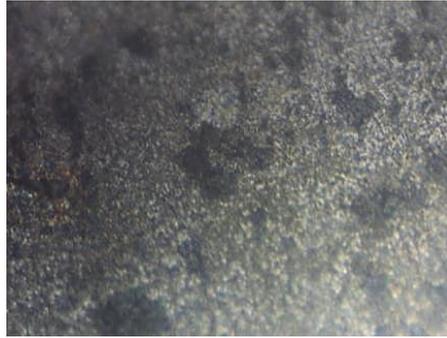
Figura 35. **Núcleo de probeta soldada, acero 1045 soldada con electrodo E 8018-B2**



Calentado por 45 minutos a 900°C y enfriado en el horno (recocido). Atacado con Nital 5%. Magnificación 500x. Se observa un crecimiento considerable de los constituyentes, ferrita y perlita.

Fuente: ensayo microscópico, realizado en el Laboratorio de Metalografía.

**Figura 36. Zona afectada por el calor, acero 1045 soldada con electrodo E 9018-B3**



Calentado por 45 minutos a 900°C y enfriado en el horno (recocido). Atacado con Nital 5%. Magnificación 500x. Se observa una menor cantidad de perlita, no se observan defectos.

Fuente: ensayo microscópico, realizado en el Laboratorio de Metalografía.

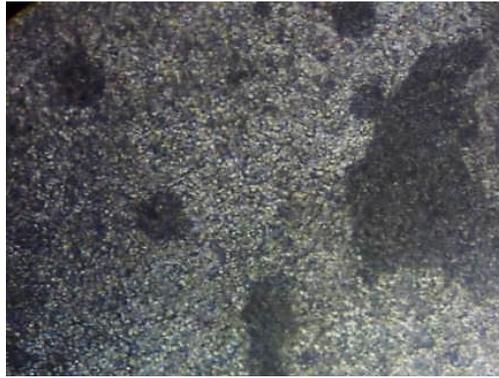
**Figura 37. Zona de transición entre ZAC parte de arriba y la zona de soldadura (línea de fusión), acero 1045 soldada con electrodo E 9018-B3**



Calentado por 45 minutos a 900°C y enfriado en el horno (recocido). Atacado con Nital 5%. Magnificación 500x. La cantidad de perlita disminuye en la zona de soldadura, según tabla VIII, el contenido de carbono es de 0.05%, se observan algunos carburos de cromo, aunque no se distinguen con facilidad.

Fuente: ensayo microscópico, realizado en el Laboratorio de Metalografía.

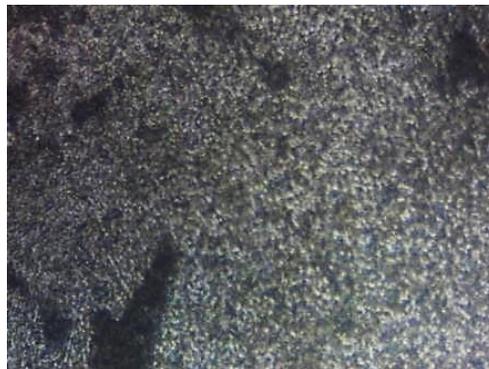
**Figura 38. Núcleo de probeta soldada, acero 1045 soldada con electrodo E 9018-B3**



Calentado por 2 horas y 45 minutos a 900°C y enfriado en el horno (recocido). Atacado con Nital 5%. Magnificación 500x. Las estructuras de ferrita y perlita crecieron considerablemente.

Fuente: ensayo microscópico, realizado en el Laboratorio de Metalografía.

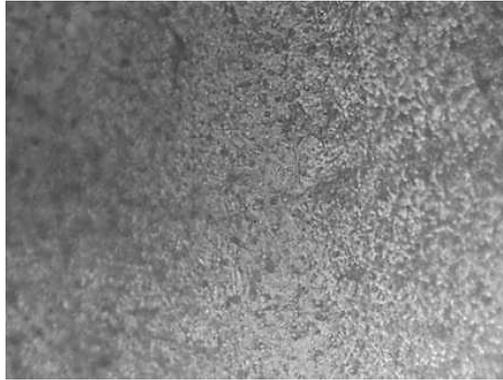
**Figura 39. Zona afectada por el calor, acero 1045 soldada con electrodo E 9018-B3**



Calentado por 2 horas y 45 minutos a 900°C y enfriado en el horno (recocido). Atacado con Nital 5%. Magnificación 500x. Muestra un crecimiento en la ferrita y la perlita. Con el crecimiento estructural no se logra observar ningún defecto.

Fuente: ensayo microscópico, realizado en el Laboratorio de Metalografía.

Figura 40. **Zona de soldadura, acero 1045 soldada con E 8018-B2**



Calentado por 2 horas y 45 minutos a 900°C y enfriado en el horno (recocido). Atacado con Nital 5%. Magnificación 500x. Se observa poco contenido en perlita y primordialmente carburos de cromo.

Fuente: ensayo microscópico, realizado en el Laboratorio de Metalografía.

## CONCLUSIONES

1. El presente trabajo, será una guía que servirá para el reacondicionamiento de ejes de acero AISI 1045 por medio de soldadura al arco.
2. La metodología para el reacondicionamiento de ejes debe hacerse de la siguiente manera: a) identificación del material base; b) inspección visual (identificación del defecto); c) ensayo no destructivo; d) remoción del defecto; e) selección del material de aporte; f) precalentamiento de la pieza; g) levantado de cordones y mantenimiento de la temperatura; h) tratamiento térmico (revenido); i) acabado final; j) inspección de la calidad de la soldadura.
3. La técnica más adecuada para el levantado de cordones es el procedimiento de traslape, éste, reduce la probabilidad de producir defectos de socavaduras, sobremontas excesivas, porosidades e inclusiones de escoria. Por otro lado, se observó mayor rendimiento del material de aporte, ya que con el mínimo número de pasadas se logró una capa de recubrimiento más grueso.
4. Todas las técnicas realizadas, temperatura de precalentamiento, material de aporte, técnica de levantado de cordones y control de temperatura durante y postsoldadura, se deben realizar en conjunto para la obtención de resultados óptimos.

5. Es posible la recuperación de ejes dañados por desgaste cuando se conocen las técnicas adecuadas a cada caso en particular, pudiéndose controlar los niveles de calidad necesarios.

## RECOMENDACIONES

1. A la Escuela de Ingeniería Mecánica: la implementación de técnicas de reacondicionamiento de piezas de acero, en el laboratorio de metalurgia; para ello se cuenta con un apoyo teórico, el cual puede ser usado, como manual guía del laboratorio antes mencionado.
2. A los interesados en general: cuando se realice el procedimiento de reacondicionamiento, se debe poner énfasis en las temperaturas de precalentamiento, trabajo y tratamiento final, estas determinan la calidad de la reconstrucción realizada.
3. La técnica de reacondicionamiento proporcionada funciona a la perfección siempre y cuando se mantenga una limpieza total del área de trabajo y se siga todo el procedimiento indicado.
4. Es importante, después de haber soldado, mantener un enfriamiento lento para evitar la formación de martensita, atrapés de hidrógeno y fisuras.



## BIBLIOGRAFÍA

1. AGUILAR RIVAS, R. A. *Introducción a la inspección de soldaduras*. Proyecto Regional de Ensayos No Destructivos para América Latina y el Caribe. NU, RLA-82-T01. Guatemala: Universitaria, 1989. 61 p.
2. \_\_\_\_\_. SORIA LEMUS, E. H. *Inspección y reparación de falla de un crisol para galvanizado de chapas de acero*. Presentado al Centro de Investigaciones de Ingeniería de la FIUSAC. Guatemala: Universitaria, 2009. 6 p.
3. \_\_\_\_\_. *Investigación y reparación de falla por fatiga en un balancín para la trituración de piedra en la fabricación de cemento*. Presentado al Centro de Investigaciones de Ingeniería de la FIUSAC. Guatemala: Universitaria, 2008. 5 p.
4. \_\_\_\_\_. *Inspección y reparación de fallas de un horno de clinker en la industria cementera*. Presentado al Centro de Investigaciones de Ingeniería de la FIUSAC. Guatemala: Universitaria, 2009. 6 p.
5. ASM International. *Heat treating*. Metals Handbook, vol. 4. Metals Park, Ohio: ASM International, 2005. 2173 p.
6. \_\_\_\_\_. *Welding, brazing and soldering*. Metals Handbook, vol. 6. Metals Park, Ohio: ASM International, 2005. 2873 p.

7. American Welding Society. *Welding Inspection Handbook*. 3ª ed. Miami: AWS, 2000. 243 p.
8. KOU, Sindo. *Welding metalurgy*. 2ª ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2003. 461 p.
9. MARÍN GARCÍA, Juan Manuel. *Apuntes de diseño de máquinas*. 2ª ed. Alicante, España: ECU, 2008. 234 p.
10. MOTT, Robert L. *Diseño de elementos de máquinas*. 4ª ed. México: Pearson Education, 2006. 474 p.
11. QUESADA, Héctor; ZALAZAR, Mónica. *Métodos para calcular el precalentamiento de uniones soldadas*. Argentina: Universidad Nacional del Comahue, 2011. 41 p.
12. SORIA LEMUS, E. H. *Laboratorio de Ensayos no destructivos de la carrera de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería*. Trabajo de graduación de Ing. Mecánica. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala: 2004. 68 p.
13. ROJAS GUTIÉRREZ, Ana Maria. *Problemas frecuentes en la soldadura GTAW-TIG*. [en línea] [ref. de octubre 2011]  
Disponible en Web: <http://www.metalactual.com>.
14. Universidad Nacional del Comahue. Argentina. 2009. *Protección contra el desgaste*. [en línea] [ref. de octubre 2011].  
Disponible en Web:

[http://soldadura.org.ar/index.php?option=com\\_content&view=article&id=21:protecciontra-el-desgaste-hardfacing&catid=20:investigaci-desarrollo&Itemid=70](http://soldadura.org.ar/index.php?option=com_content&view=article&id=21:protecciontra-el-desgaste-hardfacing&catid=20:investigaci-desarrollo&Itemid=70).

15. ZALAZAR, Mónica. *Soldabilidad de los aceros*. [en línea] Universidad Nacional del Comahue. Argentina. 2009. [ref. de octubre 2011]  
Disponible en Web:  
[http://soldadura.org.ar/index.php?option=com\\_content&view=article&id=187:soldabilidad-de-los-aceros&catid=20:investigaci-desarrollo&Itemid=70](http://soldadura.org.ar/index.php?option=com_content&view=article&id=187:soldabilidad-de-los-aceros&catid=20:investigaci-desarrollo&Itemid=70).



## APÉNDICE

### Composición química resultante

	%C	%Mn	%Si	%P	%S
Material base AISI 1045	0.45	0.75	0.25	0.04	0.05
Material de aporte E 8018-B2	0.08	0.65	0.35	0.012	0.009
Material Resultante (25% de dilución)	0.17	0.67	0.32	0.019	0.019

Fuente: elaboración propia.



## ANEXOS

### Composición química del electrodo E 8018-B2

%C	%Mn	%Si	%P	%S	%Cr	%Mo
0.08-0.11	0.65-0.80	0.35	≤0.02	≤0.01	1.05-1.30	0.40-0.60

Fuente: <http://www.lincolnelectric.com>. Consulta: noviembre de 2011.

### Parámetros del electrodo E 8018-B2

Diámetro (mm)	Longitud (mm)	Amperaje		electrodos x kg aprox.
		mín.	máx.	
2,4	300	60	110	65
3,2	350	85	160	32
4,0	350	110	210	24
4,8	350	170	240	12

Fuente: <http://www.lincolnelectric.com>. Consulta: noviembre de 2011.

### Temperatura de precalentamiento para aceros al carbono

SAE	Composición, en peso (%)		Espesor de la pieza a soldar (mm)					
	C	Mn	2,5	5	10	25	50	250
1030	0,28-0,34	0,60-0,90	**	**	70	180	220	250
1035	0,32-0,38	0,60-0,90	**	**	140	220	260	290
1040	0,37-0,44	0,60-0,90	**	130	240	290	320	330
1045	0,43-0,50	0,60-0,90	60	240	300	340	360	370
1050	0,48-0,55	0,60-0,90	170	290	330	360	380	390
1052	0,47-0,55	1,20-1,50	200	300	340	390	390	400
1055	0,50-0,60	0,60-0,90	240	320	350	380	400	410
1060	0,55-0,65	0,60-0,90	280	340	370	400	420	430
1065	0,60-0,70	0,60-0,90	320	370	400	430	440	450
1070	0,65-0,75	0,60-0,90	330	380	410	440	450	460
1080	0,75-0,88	0,60-0,90	380	420	450	470	480	490
1085	0,80-0,93	0,70-1,00	400	440	460	480	490	500
1090	0,85-0,98	0,60-0,90	410	450	470	490	500	510
1095	0,90-1,03	0,30-0,50	420	460	480	500	510	520

Nota: Debajo de la línea de espesores, la temperatura de precalentamiento se da en grados centígrados.

Fuente: Norma AWS D1.1, p. 54.