

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS METALGRÁFICO CON LA APLICACIÓN DE LA SOLDADURA  
SMAW, UTILIZANDO EL MICROSCOPIO PARA DETERMINAR LAS  
PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS DE LOS ACEROS AISI 1018 Y AISI  
1045**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR:

**GERSON FRANCISCO RIVERA MORALES**  
ASESORADO POR EL ING. HUGO LEONEL RAMÍREZ ORTIZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE  
**INGENIERO MECÁNICO**

GUATEMALA, JUNIO DE 2010



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soría
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Luis Pedro Ortiz de León
VOCAL V	Br. José Alfredo Ortiz Herincx
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR/A	Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez
EXAMINADOR/A	Ing. Carlos Humberto Figueroa Vásquez
EXAMINADOR/A	Ing. Carlos Enrique Sanabria Solchaga
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas



**HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

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

**ANÁLISIS METALOGRAFICO CON LA APLICACIÓN DE LA  
SOLDADURA SMAW, UTILIZANDO EL MICROSCOPIO PARA  
DETERMINAR LAS PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS DE  
LOS ACEROS AISI 1018 Y AISI 1045,**

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha de 7 de septiembre de 2009.

**Gerson Francisco Rivera Morales**

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA**



**FACULTAD DE INGENIERIA  
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA**

Guatemala, mayo de 2010

Ing. Julio César Campos Paíz  
Director de Escuela de Ingeniería Mecánica  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Ingeniero Campos:

Atentamente me dirijo a usted para presentarle el trabajo de graduación titulado: **“ANÁLISIS METALOGRAFICO CON LA APLICACIÓN DE LA SOLDADURA SMAW, UTILIZANDO EL MICROSCOPIO PARA DETERMINAR LAS PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS DE LOS ACEROS AISI 1018 Y AISI 1045”**, realizado por el estudiante de ingeniería mecánica Gerson Francisco Rivera Morales, el cual fue revisado por mí en su totalidad.

A mi juicio el presente trabajo cumple con los objetivos planteados, y creo necesario destacar la utilidad que el mismo puede tener como material de apoyo para el curso de Metalurgia y Metalografía que actualmente se imparte en esta facultad.

Sin otro en particular, me suscribo a usted como su seguro y atento servidor,

Ing. Hugo Leonel Ramírez Ortiz

Asesor de Trabajo de Graduación

Colegiado No. 5545

**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 del trabajo de graduación titulado ANÁLISIS METALOGRAFICO CON LA APLICACIÓN DE LA SOLDADURA SMAW, UTILIZANDO EL MICROSCOPIO PARA DETERMINAR LAS PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS DE LOS ACEROS AISI 1018 Y AISI 1045, del estudiante **Gerson Francisco Rivera Morales**, recomienda su aprobación.

**ID Y ENSEÑAD A TODOS**

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



Guatemala, mayo de 2010.

/behdei.

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 ANÁLISIS METALOGRAFICO CON LA APLICACIÓN DE LA SOLDADURA SMAW, UTILIZANDO EL MICROSCOPIO PARA DETERMINAR LAS PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS DE LOS ACEROS AISI 1018 Y AISI 1045, del estudiante Gerson Francisco Rivera Morales, procede a la autorización del mismo.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Julio Cesar Campos Paiz  
DIRECTOR



Guatemala, junio de 2010

JCCP.bedei

Universidad de San Carlos  
de Guatemala

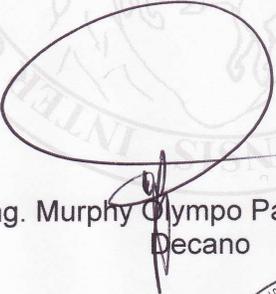


Facultad de Ingeniería  
Decanato

Ref. DTG.208-2010

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: **ANÁLISIS METALGRÁFICO CON LA APLICACIÓN DE LA SOLDADURA SMAW, UTILIZANDO EL MICROSCOPIO PARA DETERMINAR LAS PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS DE LOS ACEROS AISI 1018 Y AISI 1045**, presentado por el estudiante universitario **Gerson Francisco Rivera Morales**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

  
Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos  
Decano



Guatemala, junio de 2010

/cc  
cc. archivo



## **AGRADECIMIENTOS A:**

**DIOS:** Por ser el pilar principal de toda mi vida, por enseñarme los caminos que me hicieron y me formaron para ser un mejor ser humano. “En todo amar y servir AMGD”

**MIS PADRES:** José Francisco Rivera de la Rosa, Maria Luisa Morales de Rivera. Por que siempre me apoyaron incondicionalmente y por todas las enseñanzas recibidas; este triunfo es para ustedes. Que Dios les bendiga hoy y siempre.

**MIS ABUELOS:** Saturnino Morales Catalán (†), Margarita Reyes de Morales (†), Juan Francisco Rivera Alarcón (†), Vicenta de la Rosa de Rivera. Por haber sido y ser las personas más importante de mi vida, gracias por todas sus enseñanzas. Que Dios los guarde para siempre.

**MIS HERMANOS:** Wendy Xiomara Rivera Morales, Juan José Rivera Morales. Por todo su apoyo, que Dios se los multiplique.

**MI TÍA:** Marina Morales Reyes. Por su apoyo y ayuda en todo momento.

**MIS PRIMOS:** Velveth Lizeth Zepeda Morales, Erwin Dario Cisneros Rivera. Por su apoyo incondicional, que Dios les derrame muchas bendiciones.

**MIS PADRINOS:** Ing. Hugo Leonel Ramírez Ortiz, Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez. Por su amistad, apoyo y todas las enseñanzas recibidas.

**MI ASESOR:** Ing. Hugo Leonel Ramírez Ortiz, por su asesoría, paciencia y consejos oportunos. Que Dios lo bendiga hoy y siempre.

**MIS AMIGOS:** Carlos Cruz, Herbert Avendaño, Jorge López, Verónica Benito, Alejandro Guevara, Fam. Pinto Orellana, Karla Cruz, Alejandra Andrade, Víctor López, Luis Díaz, Padre Juan Carlos Núñez S.J., Crisol Vásquez, Edher Morales, Helmut Sowa, Narda González. Por su compañía y apoyo en todos los momentos.

**AGRADECIMIENTO ESPECIAL:** Sor Maritza Llamas, Lic. Eduardo Cáceres (†). Por todo su apoyo, enseñanzas y ayuda; pero sobre todas las cosas la amistad que me brindaron durante estos años. Gracias.

**LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS:** Por ser mi segunda casa y por todas las enseñanzas recibidas.

# ÍNDICE GENERAL

<b>ÍNDICE DE ILUSTRACIONES</b>	<b>VII</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b>	<b>XI</b>
<b>GLOSARIO</b>	<b>XV</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>XVII</b>
<b>OBJETIVOS</b>	<b>XXI</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>XXIII</b>
<b>1. CONCEPTOS BÁSICOS</b>	<b>1</b>
1.1 Fotomicrografía	1
1.2 Soldadura SMAW	1
1.3 Metalografía	2
1.4 Gases de protección	3
1.5 Examen micrográfico	3
1.6 Examen macrográfico	4
1.7 Electrodo revestido	4
1.8 Metalurgia	5
1.9 Microscopio metalográfico	5
1.10 Estructura cristalina	7

<b>2. SOLDADURA</b>	<b>9</b>
2.1 Soldadura de arco	9
2.2 Soldadura a gas	11
2.3 Soldadura por resistencia	13
2.4 Otros procesos de soldadura	15
2.4.1 Soldadura termita (TW)	15
2.4.2 Soldadura por haz de electrones (EBW)	15
2.4.3 Soldadura por rayo laser (LBW)	16
2.5 Símbolos de soldadura	17
2.5.1 Elementos de un símbolo de soldadura	18
2.6 Materiales de aporte	20
2.6.1 Electrodo de soldadura de arco	21
2.6.2 Clasificación AWS-ASTM de los electrodos de acero al carbono	22
2.6.3 Uso de los electrodos de acero al carbono para soldadura de arco	24
<b>3. MICROSCOPIO ÓPTICO</b>	<b>27</b>
3.1 Microscopio	27
3.2 Microscopio óptico	27
3.3 Microscopio óptico compuesto	28
3.3.1 Partes del microscopio óptico y sus funciones	28
3.3.2 Sistemas de iluminación	30
3.3.3 Sistema óptico	32
3.3.4 Sistema mecánico	32
3.3.5 Manejo del microscopio óptico	33
3.3.6 Mantenimiento y precauciones	35
3.3.7 Aplicaciones del microscopio óptico	36
3.3.8 Principales elementos de un microscopio básico	37

<b>4. FUNDAMENTOS DE LA METALURGIA DE LA SOLDADURA</b>	
4.1	Microestructura de los metales y las aleaciones 39
4.2	Aspectos metalúrgicos de la soldadura 42
4.3	Minimizado del agrietamiento de las soldaduras en los metales ferrosos 46
	4.3.1 Recuperación 49
	4.3.2 Relajamiento 49
	4.3.3 Revenido 50
	4.3.4 Recristalización 50
	4.3.4 Esferoidizado 51
4.4	Identificación de los metales 52
	4.4.1 Aceros al carbono 52
	4.4.1.1 Aceros con bajo carbono 53
	4.4.1.2 Aceros con contenido bajo-medio de carbono 54
	4.4.1.3 Aceros con contenido medio de carbono 54
	4.4.1.4 Aceros con alto carbono 55
<b>5. METALURGIA DE LA SOLDADURA</b>	<b>57</b>
5.1	Solidificación 57
	5.1.1 Solidificación no en equilibrio 57
5.2	Nucleación y crecimiento de grano 59
	5.2.1 Nucleación 59
	5.2.2 Crecimiento de cristales 60
5.3	Macrosegregación 62
5.4	Tratamiento térmico del acero 63
5.5	Materiales de una fase 65
5.6	Materiales de dos fases 67
5.7	Materiales disímiles 68

5.8	Dilución	69
5.9	Transformaciones en la fase solida durante el calentamiento	70
	5.9.1 Fenómeno de recristalización	71
	5.9.2 Crecimiento de grano	73
	5.9.3 Transformaciones alotrópicas	75
5.10	Transformaciones en la fase solida durante el enfriamiento	76
	5.10.1 Transformación perlítica	77
	5.10.2 Transformación martensítica	78
5.11	Continuidad de la soldadura con el metal base	79

## **6. ANÁLISIS METALOGRÁFICO DE LA SOLDADURA DE LOS ACEROS AISI 1018 Y AISI 1045**

6.1	Proceso de soldadura con material de aporte	81
	6.1.1 Elementos de trabajo	82
	6.1.2 Técnica operatoria	83
6.2	Torneado, cepillado y lijado de probetas	83
	6.2.1 Elementos de trabajo	84
	6.2.2 Técnica operatoria	85
6.3	Ataque químico	86
	6.3.1 Elementos de trabajo	86
	6.3.2 Técnica operatoria	87
6.4	Observación microscópica de estructuras	88
	6.4.1 Elementos de trabajo	88
	6.4.2 Técnica operatoria	89

<b>CONCLUSIONES</b>	<b>91</b>
<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>93</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>95</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>97</b>



# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1. Disposición de los elementos básicos para soldadura de arco	2
2. Ilustración del principio del microscopio metalúrgico compuesto	6
3. Red espacial que muestra los parámetros reticulares	7
4. Proceso de soldadura por arco	10
5. Equipo completo para soldadura oxiacetilénica	12
6. Proceso de fusión parcial en la soldadura	14
7. Soldadura por rayo láser (LBW)	17
8. Símbolo completo de soldadura y sus especificaciones	19
9. Localización y significado de la flecha en los símbolos de soldadura	20
10. Microscopio compuesto	28
11. Partes del microscopio	30
12. Diagrama de la solidificación de un metal	40
13. Diagrama de equilibrio hierro-carbono	41
14. Solidificación progresiva del metal fundido en un pocillo de soldadura	43
15. Sección transversal de dos cordones de soldadura	44
16. Diagrama de la zona afectada por el calor (HAZ)	46
17. Velocidades de enfriamiento usuales	58
18. La solidificación	61
19. La solidificación de metales casi puros	63
20. Diagrama de las durezas en los enfriamientos de los aceros	65

21. La fusión de un metal puro o de una aleación de solución sólida	66
22. Charco de soldadura en el punto de entrada máxima de calor	67
23. Acero al medio carbono en estado recocido	68
24. Dilución en A y B	70
25. Variación de la dureza en función de la temperatura	72
26. Disminución del tamaño de grano debido a la temperatura	73
27. Influencia de la temperatura en el crecimiento de grano	74
28. Estructuras generadas en el calentamiento del ciclo térmico	75
29. Fenómeno de epitaxia	79
30. La estructura de la soldadura tiene la misma orientación metal base	80
31. Soldadora Lincoln Electric (transformadora-rectificadora)	97
32. Electrodo revestidos E-6013 y E-7018	98
33. Careta para soldar	98
34. Probetas de acero AISI 1018 y AISI 1045	99
35. Probetas con material soldado sin maquinar acero AISI 1018 E-6013 y AISI 1018 E-7018	99
36. Probetas con material soldado sin maquinar acero AISI 1045 E-6013 y AISI 1045 E-7018	100
37. Torno	100
38. Probetas con material soldado ya maquinado acero AISI 1018 E-6013 y AISI 1018 E-7018	101
39. Probetas con material soldado ya maquinado acero AISI 1045 E-6013 y AISI 1045 E-7018	101
40. Plancha de vidrio y papeles abrasivos	102
41. Microscopio metalográfico	102
42. Probetas con material soldado ya pulido acero AISI 1018 E-6013 y AISI 1018 E-7018	103
43. Probetas con material soldado ya pulido acero AISI 1045 E-6013 y AISI 1045 E-7018	103

44. Probeta atacada químicamente (Nital)	104
45. Diagrama hierro-carbono definiendo los aceros elegidos	104
46. Fotomicrografía de acero AISI 1018 con magnificación en el microscopio: 10x	105
47. Fotomicrografía de acero AISI 1018 con magnificación en el microscopio: 20x	105
48. Fotomicrografía de acero AISI 1045 con magnificación en el microscopio: 10x	106
49. Fotomicrografía de acero AISI 1018, E-6013 con magnificación en el microscopio: 50x	106
50. Fotomicrografía de acero AISI 1018, E-6013 con magnificación en el microscopio: 100x	107
51. Fotomicrografía de acero AISI 1018, E-7018 con magnificación en el microscopio: 50x	107
52. Fotomicrografía de acero AISI 1018, E-7018 con magnificación en el microscopio: 100x	108
53. Fotomicrografía de acero AISI 1045, E-6013 con magnificación en el microscopio: 50x	108
54. Fotomicrografía de acero AISI 1045, E-6013 con magnificación en el microscopio: 100x	109
55. Fotomicrografía de acero AISI 1045, E-7018 con magnificación en el microscopio: 50x	109
56. Fotomicrografía de acero AISI 1045, E-7018 con magnificación en el microscopio: 100x	110

## TABLAS

I.	Interpretación del último dígito en la clasificación de electrodos	23
II.	Sistema AWS de dosificación de electrodos	23

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
ca	Corriente alterna
cd	Corriente directa
He	Helio
Ne	Neón
Xe	Xenón
Kr	Kriptón
Ar	Argón
Al	Aluminio
Mg	Magnesio
Be	Berilio
Ti	Titanio
Na	Sodio
K	Potasio
mm	Milímetros

min	Minutos
°F	Temperatura en grados Fahrenheit
I	Corriente
R	Resistencia
t	duración de la aplicación en segundos
J	Calor generado
V	Voltaje
°C	Temperatura en grados Celsius
cm	Centímetros
Cu	Cobre
m	Metros
E	Aplicación en soldadura eléctrica
AN o $A_N$	Apertura numérica
$\lambda$	Longitud de onda
$\delta$	Difracción
HAZ	Zona afectada por el calor
%	Porcentaje
lb	Libra
pulg	Pulgada
nm	Nanómetro

$T_m$	Grado de sub-enfriamiento
C	Carbono
$V_m$	Velocidad de enfriamiento
$\dot{\epsilon}_m$	Máxima temperatura alcanzada
$\dot{\epsilon}_{Ra}$	Temperatura de recristalización de la ferrita
ZAC	Zona afectada por el calor
$\dot{\epsilon}_s$	Temperatura de sobrecalentamiento
seg	Segundos
Fe	Hierro
TEC	Transformación en enfriamiento continuo
CE	Carbono equivalente



## **GLOSARIO**

<b>ABRASIVO:</b>	Es una sustancia que tiene como finalidad actuar sobre otros materiales con diferentes clases de esfuerzo mecánico “triturado, molienda, corte, pulido”. Es de elevada dureza y se emplea en todo tipo de procesos industriales y artesanos.
<b>SOLIDIFICACIÓN:</b>	Es un proceso físico que consiste en el cambio de estado de la materia de líquido a sólido producido por una disminución en la temperatura.
<b>DENDRITAS:</b>	Son prolongaciones protoplásmicas ramificadas, bastante cortas.
<b>EMISIVIDAD:</b>	Es la proporción de radiación térmica emitida por una superficie u objeto debida a una diferencia de temperatura determinada.
<b>CHISPORROTEO:</b>	Acción y efecto de chisporrotear; dicho del fuego de un cuerpo encendido, despedir chispas reiteradamente.
<b>HAZ:</b>	Conjunto de partículas o rayos luminosos de un mismo origen, que se propagan sin dispersión.

- NUCLEACIÓN:** Es el comienzo de un cambio de estado en una pequeña región pero estable. El cambio de estado puede ser la formación de gas o cristal a partir de un líquido.
- EPITAXIA:** Es la deposición de una capa cristalina única en una única capa de substrato cristalino; de tal manera que, la estructura cristalina del substrato sea continuada dentro de la capa.
- MACROSCOPIA:** Es la técnica de producir imágenes visibles de estructuras o detalles demasiado pequeños para ser percibidos a simple vista.
- SOLUBILIDAD:** Es una medida de la capacidad de una determinada sustancia para disolverse en otra.
- AUSTEMPLADO:** Es una transformación isotérmica que convierte la austenita en una estructura dura llamada bainita.
- ABERRACIÓN CROMÁTICA:** Es el efecto que se produce en los bordes coloreados alrededor de un objeto visto a través de una lente, causado porque la lente no desvía todos los colores al mismo foco.
- ABERRACION ESFÉRICA:** Es un defecto de los espejos y las lentes en el que los rayos de luz que inciden paralelamente al eje óptico, aunque a cierta distancia de este, son llevados a un foco diferente que los rayos próximos al mismo.

## **RESUMEN**

Este trabajo de graduación consiste en analizar los diferentes aspectos de la soldadura de aceros; para los cuales se tomaron como base los aceros AISI 1018 y AISI 1045, así como de referencia los electros E-7018 y E-6013.

Los aceros seleccionados se utilizaron para verificar sus propiedades y características en el momento de ser soldados, en la cual se verificó su estructura metalográfica; mediante el microscopio metalográfico con el cual se pudo observar que el acero AISI 1018 posee una estructura ferrita+perlita y así mismo observamos que para estos aceros la estructura que prevalece es la ferrítica por poseer 0.18% de carbono en su propiedad química, así también para el acero AISI 1045 posee una estructura ferrita+perlita y se observó que en su estructura prevalece la perlítica por poseer 0.45% de carbono en su propiedad química; así como también los cambios que sufrieron cada uno de los aceros mediante la temperatura de soldadura a la cual fueron sometidos durante el tiempo de soldado.

Durante este análisis se pudo establecer la importancia de tratamientos térmicos como lo son el precalentamiento de las piezas a soldar y el postcalentamiento. Los aceros soldables se especifican generalmente con orientación hacia las propiedades mecánicas (normas ASTM) con una considerable amplitud en la composición química, en cambio los aceros de construcción se especifican con límites estrictos de composición química (especificaciones SAE) dejando las propiedades mecánicas libradas a los

diferentes tratamientos térmicos que el fabricante de la pieza estipule durante el proceso de fabricación. La mayoría de los aceros modernos obtienen sus propiedades mecánicas por intermedio de procesos termo-mecánicos como forja, laminación, extrusión, fundición o tratamiento térmico, los que realizados correctamente proporcionan una microestructura óptima para soportar las solicitaciones mecánicas. Cuando a esta estructura se le aplica el ciclo térmico de la Soldadura se forman dos zonas perfectamente diferenciadas.

- Metal fundido con o sin presencia de metal de aporte.
- Zona afectada por el calor (ZAC). Esta zona esta afectada estructuralmente sin haber llegado a la fusión.

Estas dos zonas ya no tienen la estructura óptima original del material base y por lo tanto puede considerarse a este cambio estructural un efecto indeseable del ciclo térmico de soldadura.

Esto puede controlarse parcialmente por dos medios:

- Actuando sobre las variables del proceso de soldadura. El calor aportado.
- Por medio del precalentamiento del material base.

Realizando un ciclo térmico luego de la Soldadura con Temperaturas y velocidades de calentamiento; enfriamiento controlado. A este ciclo se le llama TRATAMIENTO TÉRMICO POSTSOLDADURA. Y conjuntamente con el precalentamiento es la forma idónea para evitar o corregir los efectos indeseables de la soldadura.

Entre los diversos métodos que se emplean para minimizar el agrietamiento de las soldaduras en los metales ferrosos pueden mencionarse: 1) el uso del

metal de aporte correcto, 2) el precalentamiento) y 3) el postcalentamiento. El precalentamiento se utiliza principalmente con las aleaciones ferrosas que contienen mas de 0.25% de carbono antes de soldarse y su propósito es producir un enfriamiento más lento y por tanto más uniforme.

Finalmente este análisis sobre la soldadura de aceros nos llevó a comprender ciertos aspectos de la metalurgia en la soldadura como lo son: la solidificación, el tamaño del grano, las zonas afectadas por el calor (ZAC), las velocidades de enfriamiento, como se comportan lo granos durante el proceso de enfriamiento, y así mismo la importancia que posee la metalurgia en los procesos industriales.



## **OBJETIVOS**

### **GENERAL:**

Análisis metalográfico con la aplicación de la soldadura SMAW, utilizando el microscopio para determinar las propiedades y características de los aceros AISI 1018 y AISI 1045.

### **ESPECÍFICOS:**

1. Analizar el comportamiento del metal base y aporte, después de la soldadura.
2. Analizar los cambios comparativos de los aceros seleccionados.
3. Brindar a los alumnos los fundamentos teóricos y prácticos adecuados aplicables al laboratorio de metalografía. Para mejorar su proceso de aprendizaje.



## INTRODUCCIÓN

Mediante la metalografía se ha desarrollado precisamente la habilidad para identificar las fases presentes en los metales y en sus aleaciones, y para explicar el mecanismo de su formación. Para lo cual se muestran procesos de soldadura de aceros mediante soldadura de arco eléctrico en los cuales se determinan las propiedades y características de los aceros en un proceso de soldadura.

Se muestran algunos tipos de soldaduras así como la clasificación de los aceros con respecto a su contenido de carbono y la utilización de algunos materiales de aporte.

Los microscopios son parte importante en un proceso de verificación de estructuras en metales o aleaciones para lo cual se mencionara el proceso de utilización y precauciones que se deben de tener al utilizar un aparato de observación; otros factores importantes de los que dependen las propiedades son las características de la metalurgia de la soldadura la cual depende de la microestructura de los metales o aleaciones, en este caso serán analizados los aceros AISI 1018 y AISI 1045, se manejaran mediante fundamentos de la soldadura, solidificación, agrietamiento, tratamientos térmicos, nucleación, crecimientos de cristales, segregación y demás aspectos de materiales de una fase o de dos fases.

En un proceso de soldadura, se producen transformaciones en estado sólido mediante transformaciones en la fase sólida durante el enfriamiento en las cuales podemos mencionar:

1. Transformación perlítica
2. Transformación martensítica

Nos podemos topar también con un fenómeno llamado epitaxia, en el cual la fase líquida solidifica y su estructura cristalina coincide con la del metal base.

# **1. CONCEPTOS BÁSICOS**

## **1.1 Fotomicrografía**

Fotografía con microscopio. Casi todas las cámaras SLR tienen adaptadores para acoplar el cuerpo al tubo del microscopio y su sistema de enfoque y lectura a través del objetivo las hace particularmente cómodas para esta especialidad.

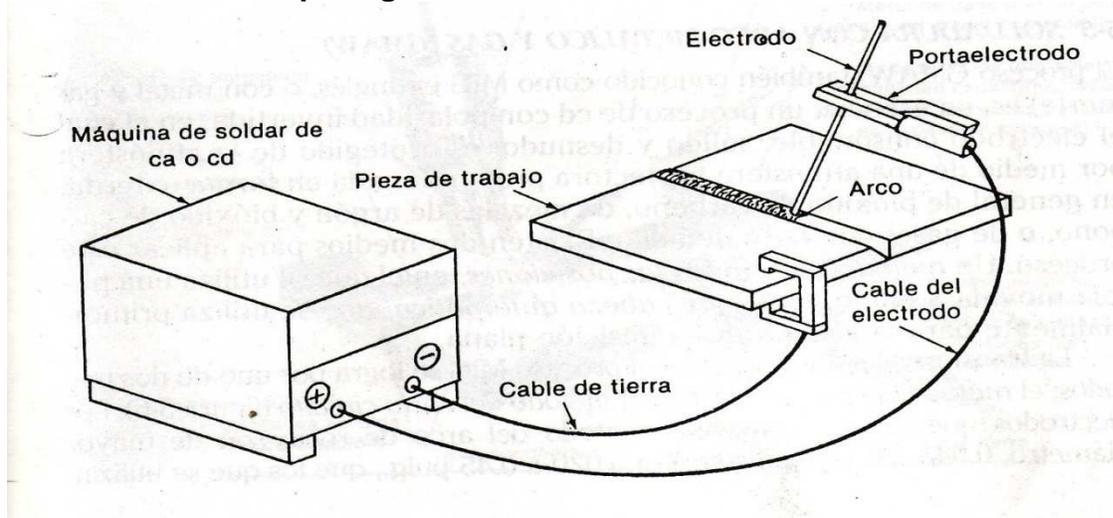
El microscopio óptico alcanza hasta unos 2000 aumentos, y el eléctrico, que emplea un haz de electrones en lugar de luz, llega hasta 1000000 o más. Estos microscopios incorporan casi siempre una cámara especial.

Una fotografía tomada a través de un microscopio se llama fotomicrografía, términos que no deben confundirse con microfotografía, que se refiere a la reproducción de documentos en película de pequeño formato.

## **1.2 Soldadura SMAW**

Es el proceso principal de soldadura mediante electrodos revestidos de fundente. Se utiliza el calor del arco para llevar la pieza de trabajo y un electrodo consumible al estado de fusión. El circuito se establece ordinariamente como se ilustra en la figura 1.

**Figura 1. Disposición de los elementos básicos para soldadura de arco metálico protegido.**



Fuente: Horwitz Henry. **Soldadura: aplicaciones y práctica.** Pág. 107.

### 1.3 Metalografía

Es la ciencia que estudia la constitución y estructura de metales y aleaciones reveladas ya sea a simple vista o por tales herramientas, como amplificación de baja resolución, microscopio óptico, microscopio de electrones, y técnicas de difracción o rayos X.

Entre las características estructurales están el tamaño de grano, el tamaño, forma y distribución de las fases que comprenden la aleación y de las inclusiones no metálicas así como la presencia de segregaciones y otras irregularidades que profundamente pueden modificar las propiedades mecánicas y el comportamiento general de un metal.

## **1.4 Gases de protección**

Los gases de protección son materiales consumibles que se utilizan en los procesos de soldadura con arco de tungsteno y de soldadura con arco metálico.

Aunque en teoría puede usarse cualquiera de los gases inertes, helio (He), argón (Ar), neón (Ne), xenón (Xe) o kriptón (Kr), los únicos de los que puede disponerse en volumen suficiente para los usos prácticos en la soldadura son el helio (He) y el argón (Ar). Estos gases dan resultados satisfactorios de protección para los metales más reactivos, tales como el aluminio (Al), el magnesio (Mg), el berilio (Be) y el titanio (Ti).

Aunque los gases inertes puros protegen al metal a cualquier temperatura, contra su reacción con los elementos de la atmósfera (el aire), no son adecuados para todas las aplicaciones de soldadura.

## **1.5 Examen micrográfico**

Es una técnica más avanzada que el macrográfico y necesita de una preparación más especial y cuidadosa de la muestra. Se basa en la amplificación de la superficie mediante instrumentos ópticos (microscopio) para observar características estructurales microscópicas (microestructura). Este tipo de examen permite realizar el estudio o controlar el proceso térmico al que ha sido sometido el metal, debido a que los mismos nos ponen en evidencia la estructura o los cambios estructurales que sufren en dicho proceso como consecuencia de ello también es posible deducir las variaciones que

experimentan sus propiedades mecánicas (dependiendo de los constituyentes metalográficos presentes en la estructura).

### **1.6 Examen macrográfico**

Es la forma más sencilla de realizar un estudio, este consta en examinar la superficie metálica a simple vista, pudiendo determinar de esta forma las características macroscópicas. Del cual se puede obtener datos sobre los tratamientos mecánicos sufridos por el material (es decir se puede determinar si el material fue trefilado, laminado, forjado, etc.) o determinar la distribución de defectos (como grietas superficiales, rechupes, partes soldadas, etcétera.)

### **1.7 Electrodo revestido**

Es un metal que se funde para hacerse parte del cordón de soldadura. El recubrimiento cumple varias funciones: su combustión y descomposición con el calor del arco crea una atmósfera protectora; la fusión del recubrimiento proporciona una cubierta de escoria fundida sobre la soldadura; el contenido de sodio (Na) o potasio (K) del recubrimiento se ioniza fácilmente para estabilizar el arco. También se pueden introducir elementos aleantes desde el recubrimiento. La elección del electrodo (que también determina la polaridad) es crítica para el éxito. Durante la soldadura, el electrodo se funde a una rapidez de aproximadamente  $250 \frac{mm}{min}$ , mientras que el recubrimiento se funde para formar escoria que se debe eliminar si se requiere más de una pasada para acumular el espesor completo de la soldadura.

Como el recubrimiento es frágil, se usan varillas rectas típicamente de 450 mm de longitud, haciendo a este proceso adecuado sólo para la operación manual, con una rapidez relativamente lenta, pero aún a bajo costo. El proceso es versátil y adecuado para la aplicación en campo, aunque precisa de una habilidad considerable. Es posible el soldado en todas las posiciones, incluyendo el realizado por arriba de la cabeza si el metal y la escoria solidifican suficientemente rápido.

## **1.8 Metalurgia**

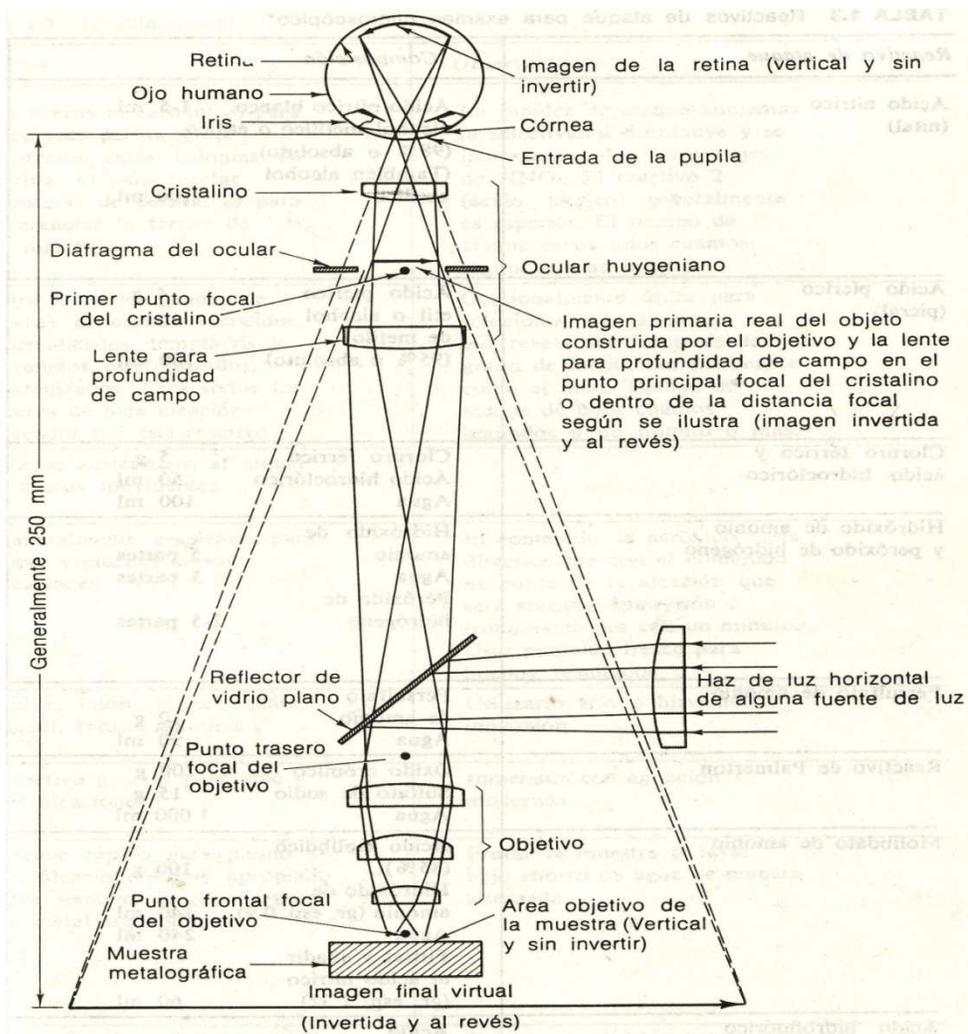
Ciencia aplicada cuyo objeto es el estudio de las operaciones industriales tendientes a la preparación, tratamiento (físico y/o químico) y producción de metales y sus aleaciones. En términos generales, la técnica metalúrgica comprende las siguientes fases: Obtención del metal a partir de uno de sus minerales (mena). Afino o purificación del metal. Preparación de aleaciones. Tratamientos mecánicos, térmicos o termoquímicos para su mejor utilización.

## **1.9 Microscopio metalográfico**

El microscopio metalográfico difiere en la manera en que la muestra es iluminada. Como una muestra metalográfica es opaca a la luz, la misma debe ser iluminada por luz reflejada. Como se ve en la figura 2, un haz de luz horizontal de alguna fuente de luz es reflejado, por medio de un reflector de vidrio plano, hacia abajo a través del objetivo del microscopio sobre la superficie de la muestra se amplificara al pasar a través del sistema inferior de lentes, el

objetivo, y continuará hacia arriba a través del reflector de vidrio plano; luego, una vez más lo amplificará el sistema superior de lentes, el ocular. El poder de amplificación inicial del objetivo y del ocular está generalmente grabado en la base de la lente. Cuando se utiliza una combinación particular de objetivo y ocular y la longitud adecuada de tubo, la amplificación total es igual al producto de las amplificaciones del objetivo y del ocular.

**Figura 2. Ilustración del principio del microscopio metalúrgico compuesto.**

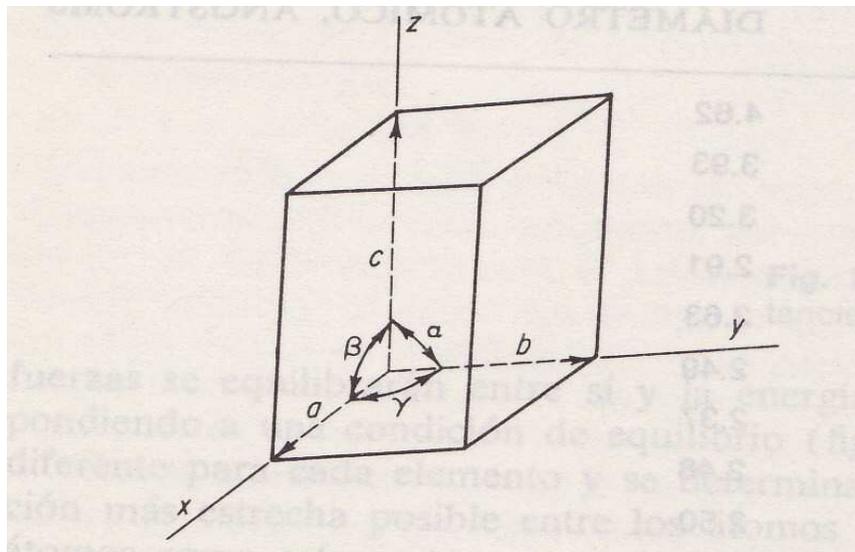


Fuente: Sydney H. Avner. **Introducción a la Metalurgia Física**. Pág. 33.

## 1.10 Estructura cristalina

Como los átomos tienden a adoptar posiciones relativamente fijas, esto da lugar a la formación de cristales en estado sólido. Los átomos oscilan alrededor de puntos fijos y están en equilibrio dinámico más que fijos estáticamente. La red tridimensional de líneas imaginarias que conecta los átomos se llama red espacial, en tanto que la unidad más pequeña que tiene la simetría total del cristal se llama celda unitaria. La celda unitaria específica para cada metal está definida por sus parámetros mostrados en la figura 3, que son las orillas o bordes de la celda unitaria  $a$ ,  $b$ ,  $c$  y los ángulos  $\alpha$  (entre  $b$  y  $c$ ),  $\beta$  (entre  $a$  y  $c$ ), y  $\gamma$  (entre  $a$  y  $b$ ).

**Figura 3. Red espacial que muestra los parámetros reticulares.**



Fuente: Sydney H. Avner. **Introducción a la Metalurgia Física.** Pág. 92



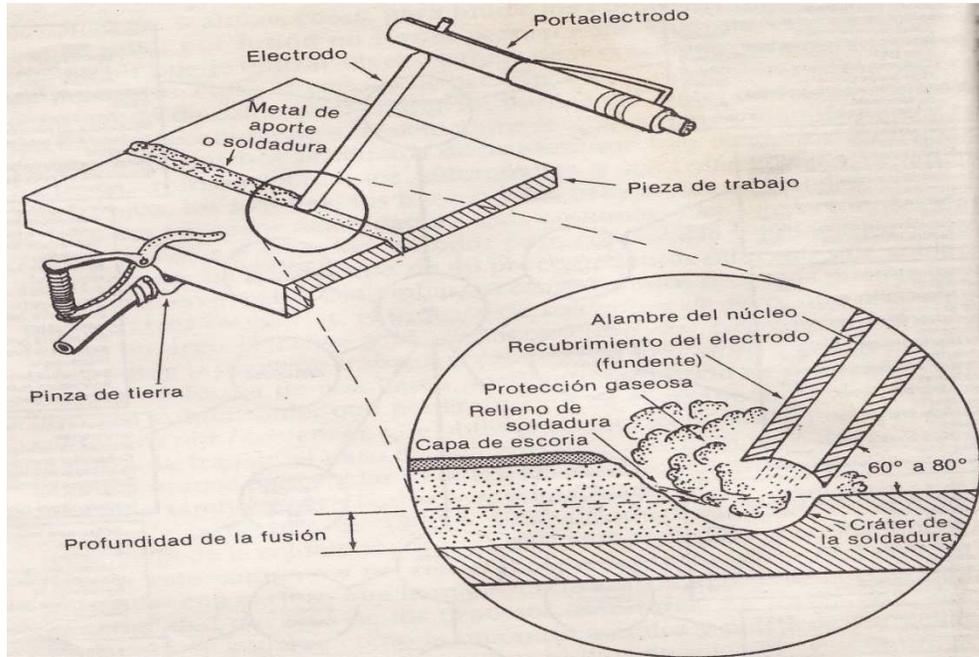
## **2. SOLDADURA**

### **2.1 Soldadura de arco**

La soldadura de arco o soldadura eléctrica es el proceso de más amplia aceptación como el mejor, el más económico, el más natural y el más práctico para unir metales. En el proceso de soldadura manual por arco que es de uso más común, el soldador obtiene un electrodo adecuado, sujeta el cable de tierra a la pieza de trabajo, y ajusta la corriente eléctrica para “hacer saltar el arco”, es decir, para crear una corriente intensa que salte entre el electrodo y el metal.

En seguida mueve el electrodo a lo largo de las líneas de unión del metal que ha de soldar, dando suficiente tiempo para que el calor del arco funda el metal. El metal fundido, procedente del electrodo, o metal de aporte, se deposita en la junta, y, junto con el metal fundido de los bordes, se solidifica para formar una junta sólida. El soldador selecciona el electrodo (metal de aporte) que ha de usar para producir el arco de acuerdo con las especificaciones del trabajo mostrado en la figura 4.

**Figura 4. Proceso de soldadura por arco.**



Fuente: Horwitz Henry. **Soldadura: aplicaciones y práctica.** Pág. 7.

Existen varios procedimientos de soldadura de arco. La soldadura por arco de carbón es la primera técnica moderna de soldadura. En este proceso se establece un arco entre un electrodo de carbón puro y la pieza de trabajo conectada a tierra, o entre dos electrodos de carbón que casi se unen cerca de la superficie por soldar. Los electrodos de carbón no se consumen en el proceso. Si se necesita metal de aporte para realizar la soldadura, deben usarse electrodos metálicos para soldar. En la actualidad, empero, el proceso del arco de carbón se aplica primordialmente para cortar o ranurar metales.

Al proceso del arco de carbón le siguió rápidamente el desarrollo de la soldadura por arco metálico, en la cual se utiliza una varilla de metal consumible como electrodo. Al principio los electrodos eran varillas metálicas desnudas, esto causaba problemas significativos para la estabilización del arco y un cordón de soldadura muy contaminado. El desarrollo de los recubrimientos en

los electrodos, conocidos comúnmente como fundente, resolvió en gran parte los problemas de estabilización del arco, y condujo a lo que se conoce como soldadura de arco metálico protegido, que es el proceso eléctrico de utilización más amplia. Al calentarse, el fundente se evapora, formando una barrera protectora en torno al arco y a la soldadura. El gas protector impide que el oxígeno y el nitrógeno del aire formen con el metal soldado óxidos y nitruros debilitadores.

## **2.2 Soldadura a gas**

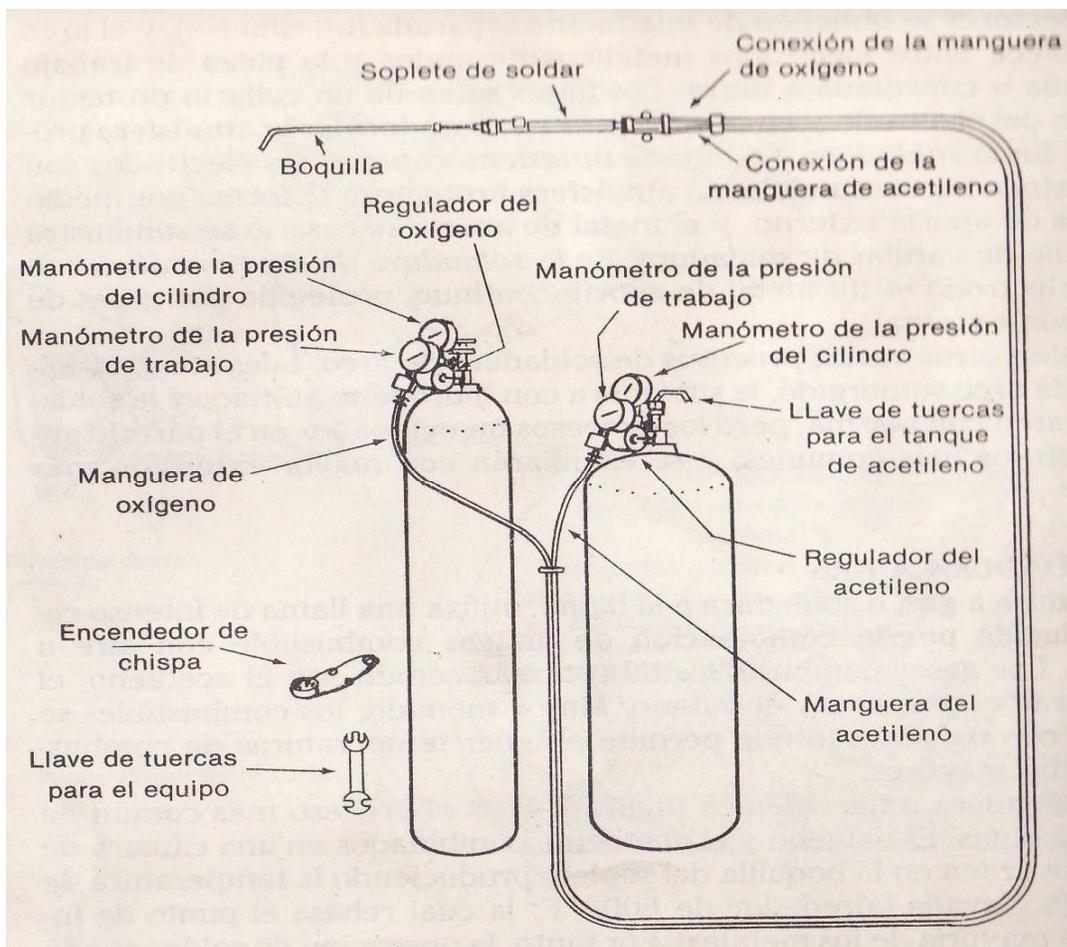
La soldadura a gas, o soldadura a la llama, utiliza una llama de intenso calor producida por la combinación de un gas combustible con aire u oxígeno. Los gases combustibles de uso más común son el acetileno, el gas natural, el propano y el butano. Muy a menudo, los combustibles se queman con oxígeno, lo que permite obtener temperaturas de combustión mucho mayores.

La soldadura oxiacetilénica mostrada en la figura 5, es el proceso más común de soldadura a gas. El oxígeno y el acetileno, combinados en una cámara de mezclado, arden en la boquilla del soplete produciendo la temperatura de llama más elevada (alrededor de 3316 °C (6000°F), la cual rebasa el punto de fusión de la mayoría de los metales). Por tanto, la operación de soldar puede realizarse con o sin metal de aporte. Las partes pueden fundirse y ponerse en contacto a medida que se va realizando la operación de fusión con el soplete; al retirar el soplete, las partes metálicas quedan unidas al enfriarse.

Las desventajas de la soldadura con gas combustible giran en torno al hecho de que ciertos metales reaccionan desfavorablemente, y hasta violentamente,

en presencia del carbono, el hidrógeno o el oxígeno, todos ellos presentes en el proceso de soldadura con gas combustible. La soldadura a gas es también más fría, más lenta y más deformante que la soldadura con arco. Sin embargo, para aplicar soldadura en lugares difíciles de alcanzar, o con metales que tienen puntos de fusión más bajos, tales como el plomo o metales en lámina delgada, la soldadura a gas es con frecuencia más eficaz que los demás procesos.

**Figura 5. Equipo completo para soldadura oxiacetilénica.**



Fuente: Horwitz Henry. **Soldadura: aplicaciones y práctica.** Pág. 8.

## 2.3 Soldadura por resistencia

La soldadura por resistencia es un proceso que se efectúa a máquina, y que se utiliza primordialmente en la producción masiva de partes que requieren operaciones de soldadura relativamente sencillas. La soldadura se logra por el calor generado por la resistencia ofrecida por las piezas de trabajo al paso de la electricidad por el lugar indicado, y la fusión producida por la presión de los electrodos de contacto. El operador de la máquina para soldadura por resistencia hace los ajustes necesarios a la máquina para regular la corriente y la presión, para luego alimentar y alinear la pieza de trabajo. Algunos tipos de soldadura por resistencia son la soldadura por puntos, la de resalto o salientes, la de relámpago y la soldadura recalada.

La soldadura por resistencia representa, de alguna forma, una transición de la soldadura en estado sólido a soldadura por fusión. La energía se convierte en calor. La corriente se deja activa hasta que ocurre la fusión en la interfase entre las dos piezas, y la presión se mantiene hasta que la soldadura solidifica. De acuerdo con la ley de *Joule*, el calor generado (en joules) es

$$J = I^2 R t$$

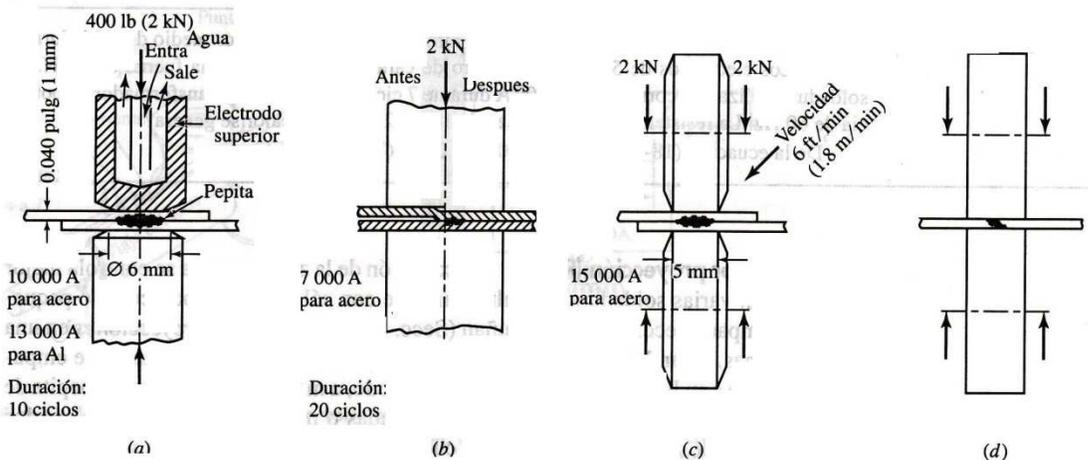
donde la  $I$  es la corriente (A),  $R$  la resistencia ( $\Omega$ ) y  $t$  la duración de la aplicación de la corriente en segundos. El voltaje puede ser bajo, típicamente de 0.5 a 10 V, pero las corrientes pueden ser muy altas como se muestra en la figura 6.

Como el calor se debe concentrar en la zona de soldadura, la resistencia fuera de ella debe ser baja, especialmente en los puntos donde la corriente es suministrada a las piezas de trabajo por medio de electrodos. Los materiales de alta conductividad térmica y alto calor específico (como el aluminio o el cobre) exigen corrientes muy elevadas para evitar la disipación del calor.

La limpieza de la superficie es importante, pero no tan vital como en las uniones de estado sólido, pues los contaminantes son expulsados de la fusión. No obstante, las escamas, las películas gruesas de aceite y la pintura deben ser eliminados, aunque una preparación de la superficie relativamente sencilla es adecuada y también es factible soldar el acero recubierto de zinc. El control de la calidad es sumamente importante.

Las soldaduras se prueban destructivamente para establecer los parámetros óptimos del proceso; después, la inspección incluye técnicas de medición de la temperatura de la superficie (a partir de la cual se extrapolan las temperaturas de la zona de soldadura), ultrasónicas y de emisión acústica. Son posibles el control de circuito cerrado y el adaptivo.

**Figura 6. Proceso de fusión parcial en la soldadura (a) de puntos por resistencia, (b) por proyección, (c) de costura por resistencia y (d) de costura con presión.**



Fuente: Schey John A. **Procesos de manufactura.** Pág. 795.

## **2.4 Otros procesos de soldadura**

### **2.4.1 Soldadura termita (TW)**

Cuando un óxido metálico de baja energía libre de formación está en contacto íntimo con un metal de mayor energía libre de formación de óxido, el óxido metálico se reduce en una reacción exotérmica, genéricamente llamada termita. El polvo *Thermit* (una marca registrada de *Th. Goldschmidt AG, Essen, Alemania*) es una mezcla de un metal y un óxido, por ejemplo, aluminio y óxido de hierro. Se agregan bolitas de aleación de hierro para reducir la temperatura de reacción hasta alrededor de 2500°C.

El proceso se aplica para unir secciones pesadas (área mínima de 60  $cm^2$ ), como rieles o varillas de refuerzo en el campo. Se construye un molde de arena o semipermanente completo, con bebedero, compuerta y mazarota alrededor del área de la unión, el polvo de termita se enciende en un crisol colocado arriba del molde, y el hierro resultante se sangra a través de un agujero en el fondo del crisol, directamente hacia el molde. Después de la solidificación, el molde es destruido y el acero en exceso aún caliente es cortado con cincel. Las barras colectoras eléctricas grandes se sueldan de manera similar, con aluminio y  $Cu_2O$ .

### **2.4.2 Soldadura por haz de electrones (EBW)**

El cañón de electrones ahora funde el metal base; el metal fundido delante de agujero de vapor fluye alrededor para llenar la separación, de esta manera

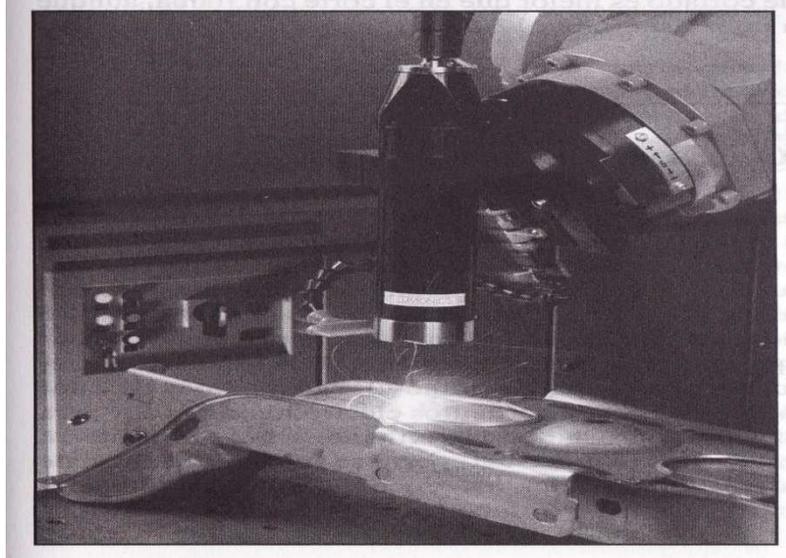
se pueden soldar separaciones angostas sin un metal de aporte (aunque se pueden usar varillas de metal de aporte). La zona afectada por el calor es muy estrecha. La mayoría de la soldadura se realiza al alto vacío (EBW-HV) o medio vacío (EBW-MV), pero la operación sin vacío (EBW-NV) también produce soldaduras de alta calidad en muchos materiales. Los procesos son extremadamente adaptables y sobresalen para soldar tanto calibres delgados como secciones gruesas, piezas con espesor disímil, materiales endurecidos o de alta temperatura y materiales distintos. La EBW es propicia para el control automático.

### **2.4.3 Soldadura por rayo láser (LBW)**

La energía de un láser como se muestra en la figura 7 se puede emplear para calentar la superficie del material (modo de conducción limitada) o para penetrar la profundidad completa de la unión (modo de penetración profunda o soldadura en forma de agujero de cerradura). Como el calentamiento es una función de la emisividad de la superficie, los láser *Nd:YAG* de onda más corta son más adecuados para materiales altamente reflectantes, aunque no se pueden utilizar en vidrio o en polímeros. El láser tiene la ventaja de no precisar vacío. Normalmente, la pieza de trabajo necesita la protección de un gas, excepto para la soldadura de puntos, en la que el tiempo de exposición es muy corto.

El láser tiene una aplicación creciente, particularmente para metales de calibre delgado. Se logran velocidades de soldado de cerca de  $7 \frac{m}{min}$  en lámina metálica de 1.5 mm de espesor. El proceso es adecuado para la automatización, y ya sea la pieza de trabajo, el láser o el haz, se pueden mover a lo largo de trayectorias prescritas.

**Figura 7. Soldadura por rayo láser (LBW).**



Fuente: Schey John A. **Procesos de manufactura**. Pág. 809.

## **2.5 Símbolos de soldadura**

Para que la soldadura haya podido alcanzar la posición que ocupa en la construcción y la manufactura, ha tenido que probar que es adecuada para las necesidades del diseño. Una vez que se demostró que los procesos eran adecuados para los fines del diseño.

Para combatir problemas de aplicación, se desarrollo un lenguaje para soldadura, es decir, un conjunto de símbolos que indican en forma abreviada al soldador o al supervisor toda la información necesaria para hacer una soldadura correcta.

En el sistema AWS, la junta es la base de referencia. Toda junta cuya soldadura se indique por medio de un símbolo tendrá siempre un lado de la flecha y un “otro lado”. De acuerdo con lo anterior, se emplean las expresiones

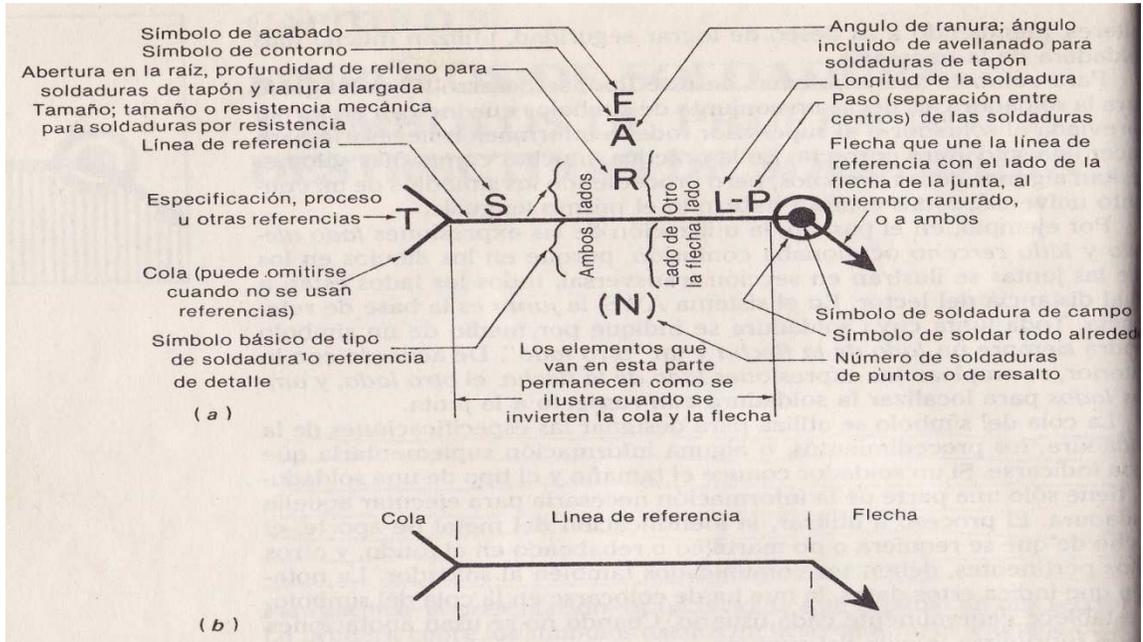
lado de la flecha, el otro lado y ambos lados par localizar la soldadura con respecto a la junta.

La cola del símbolo se utiliza para designar las especificaciones de la soldadura, los procedimientos, o laguna información suplementaria que deba indicarse. Si un soldador conoce el tamaño y el tipo de una soldadura, tiene sólo una parte de la información necesaria para efectuar aquella soldadura. El proceso a utilizar, la identificación del metal de aporte, el hecho de que se requiera o no martilleo en el fondo, y otros datos pertinentes, deben ser comunicados también al soldador.

### **2.5.1 Elementos de un símbolo de soldadura**

La AWS establece una distinción entre las expresiones símbolo del tipo de soldadura (*Weld symbol*) y el símbolo de soldadura (*Welding Symbol*). El primero es el símbolo que se usa para indicar el tipo deseado de soldadura. El símbolo de soldadura completo está formado por los siguientes elementos, o por el número de éstos que resulte necesario: línea de referencia con flecha, símbolos básicos de soldadura (*Weld Symbols*), las dimensiones y otros datos; símbolos suplementarios; símbolos de acabado; y la cola, la cual contiene especificaciones, el proceso y otras referencias. La información que se transmite por medio del símbolo de soldadura se muestra en la figura 8; se lee así con facilidad y precisión, con lo cual resultan innecesarias las notas descriptivas largas.

**Figura 8. Símbolo completo de soldadura y sus especificaciones.**

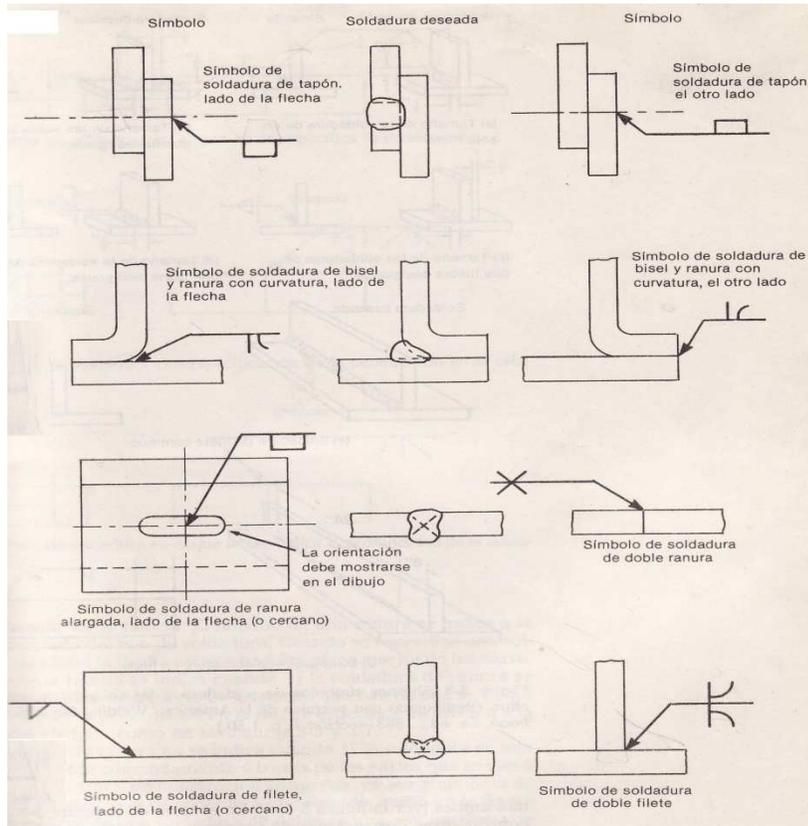


Fuente: Horwitz Henry. **Soldadura: aplicaciones y práctica.** Pág. 28.

La línea de referencia de un símbolo de soldadura es la línea representada en un plano horizontal y unida a una cola y una flecha. La línea de referencia es la base de cada símbolo simplificado, y proporciona la orientación y la localización estándar de los elementos de un símbolo de soldadura. Las posiciones de la cola y la flecha pueden intercambiarse, pero los elementos del símbolo están siempre en la misma posición en la línea de referencia.

Para indicar la localización de una soldadura, se traza una flecha con la cabeza apuntando directamente a la junta en la que ha de hacerse la soldadura. La colocación del símbolo del tipo de soldadura como se muestra en la figura 9; puede usarse para indicar el lado de la flecha, el otro lado o ambos lados de la junta.

**Figura 9. Localización y significado de la flecha en los símbolos de soldadura.**



Fuente: Horwitz Henry. **Soldadura: aplicaciones y práctica.** Pág. 29.

## 2.6 Materiales de aporte

Todos los metales de aporte se clasifican de acuerdo con una de las especificaciones que han desarrollado conjuntamente las sociedades AWS-ASTM (*American Welding Society – American Society for Testing and Materials*), subcomité sobre metales de aporte. Los metales de aporte y sus especificaciones correspondientes AWS-ASTM son:

### **2.6.1 Electroodos para soldadura de arco**

El desarrollo de electrodos recubiertos con fundente, capaces de producir soldaduras con propiedades físicas que iguallen o sobrepasen las del metal de base, ha convertido a la soldadura de arco en el proceso de soldadura más generalizado.

Antes del desarrollo del electrodo recubierto, los gases atmosféricos que rodeaban la zona de soldadura de alta temperatura, formaban óxidos y nitruros con el metal de la soldadura. En general, los óxidos tienen baja resistencia a la tensión y baja ductilidad, por lo cual tienden a reducir las propiedades normales de los metales de base. Los materiales de recubrimiento de los electrodos permiten lograr en forma automática una acción de limpieza y desoxidante en el cráter fundido. Al arder el recubrimiento en el arco, libera una atmósfera gaseosa, inerte, que protege el extremo fundido del electrodo, a la vez que protege la fosa de soldadura fundida. Esta atmósfera impide que el oxígeno y el nitrógeno perjudiciales se pongan en contacto con el área fundida de soldadura, en tanto que el residuo de recubrimiento quemado forma una escoria para cubrir el metal de soldadura depositado. Esta escoria también aislada a la soldadura del oxígeno y el nitrógeno, ya que se ha enfriado hasta una temperatura en la que ya no se forman óxidos y nitruros. Adicionalmente, la escoria hace que sea más lento el enfriamiento, con lo que se obtiene una soldadura más dúctil.

Además de estos beneficios, se logran otras ventajas con los electrodos recubiertos. El recubrimiento mejora el aspecto de la soldadura, hace más fácil el salto del arco, ayuda a mantener éste, regula la profundidad de penetración, reduce el chisporroteo, mejora la calidad de la soldadura, o restaura elementos perdidos. La escoria que deja el recubrimiento no sólo protege el cordón de

soldadura, sino que también ayuda a darle forma. Además, se ha agregado hierro pulverizado al recubrimiento de muchos de los tipos básicos de electrodos. Bajo el intenso calor del arco, el polvo de hierro se convierte en acero, y aporta metal al depósito de soldadura. El recubrimiento del electrodo sirve también de aislante al alambre que constituye el núcleo del electrodo. Afecta a la longitud del arco y al voltaje de trabajo, y controla la posición de aplicación de la soldadura en la que puede usarse el electrodo.

En la mayoría de los casos, las diferencias en las características operacionales de un electrodo pueden atribuirse al recubrimiento. El alambre del núcleo proviene generalmente de la misma existencia de alambre. Para los electrodos comunes de la serie E-60XX, el alambre del núcleo es de acero al carbono SAE 1010, con un intervalo de contenido de carbono de 0.05 a 0.15%.

### **2.6.2 Clasificación AWS-ASTM de los electrodos de acero al carbono**

Esta clasificación está formada por una serie de cuatro o cinco dígitos como se muestra en las tablas I y II; que lleva como prefijo la letra E. La E indica que se emplea en soldadura eléctrica. Los números que van a la izquierda de los dos últimos dígitos, multiplicados por 1000, dan la resistencia mínima a la tensión del metal depositado (alivio de esfuerzos); el dígito situado junto al último número indica el suministro de energía, el tipo de escoria, el tipo de arco, la penetración y la presencia de polvo de hierro.

**Tabla I. Interpretación del último dígito en la clasificación de electrodos AWS.**

	ULTIMO DIGITO								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Tipo de energía	<sup>a</sup>	CA o CD polaridad invertida	CA o CD	CA o CD	CA o CD	CD polari- dad inv.	CA o CD polaridad invertida	CA o CD	CA o CD polaridad invertida
Tipo de escoria	<sup>b</sup>	Orgánica	Rutilo	Rutilo	Rutilo	Bajo hidrógeno	Bajo hidrógeno	Mineral	Bajo hidrógeno
Tipo de arco		Excavadora	Regular	Blando	Blando	Regular	Regular	Blando	Regular
Penetración	<sup>c</sup>	Profunda	Regular	Ligera	Ligera	Regular	Regular	Regular	Regular
Polvo de hierro en el recubri- miento		0-10%	Nada	0-10%	0-10%	30-50%	Nada	Nada	50%
									30-50%

Fuente: Horwitz Henry. **Soldadura: aplicaciones y práctica.** Pág. 52.

**Tabla II. Sistema AWS de dosificación de electrodos.**

DIGITO	SIGNIFICADO	EJEMPLO
Primeros dos o primeros tres	Resistencia mínima a la tensión (alivio de esfuerzos)	E-60XX = 60,000 lb/pulg. <sup>2</sup> (mín.) E-110XX = 110,000 lb/pulg. <sup>2</sup> (mín.)
Anterior al último	Posición de aplicación	E-XX1X = todas las posiciones E-XX2X = horizontal y E-XX3X = plana
Ultimo	Tipo de energía, tipo de escoria, tipo de arco, magnitud de la penetración, pre- sencia de polvo de hierro en el recubri- miento	

Fuente: Horwitz Henry. **Soldadura: aplicaciones y práctica.** Pág. 52.

Algunos de estos electrodos son para corriente directa (cd) y otros, para corriente alterna (ca). Algunos electrodos de cd son para polaridad directa (el portaelectrodo conectado al polo negativo) y otros son para polaridad invertida (el portaelectrodo conectado al polo positivo).

### **2.6.3 Uso de los electrodos de acero al carbono para soldadura de arco**

Los electrodos para soldadura de arco para soldar aceros con contenido bajo y medio de carbono llevan los números de clasificación AWS E-4510 y E-6010, E-6011, E-6012, E-6013, E-7014, E-7015, E-7016, E-7018, E-6020, E-6024, E-6027, E-7028. El electrodo E-4510 es un electrodo desnudo; los demás, todos ellos de la serie E-6000, son electrodos recubiertos.

Los electrodos AWS E-6010 están recubiertos con sodio con alto contenido de celulosa. Pueden usarse para soldar en todas las posiciones con corriente directa de polaridad invertida. Son adecuados en forma óptima para la soldadura vertical y la soldadura hacia arriba, así como para algunas aplicaciones con lámina metálica.

El electrodo E-6010 es excelente para el punteado profesional por su ductilidad y su cualidad de penetración profunda. Sus propiedades físicas son excelentes, y, cuando se le aplica correctamente, sus depósitos satisfacen las normas más exigentes de inspección.

Los electrodos AWS E-6011 están recubiertos con potasio de alto contenido de celulosa. A veces se les describe como la contraparte del tipo E-6010. Las características de trabajo de los dos electrodos son bastantes semejantes; empero, los electrodos E-6011 pueden usarse con resultados igualmente buenos con corriente alterna o con corriente directa. Estos electrodos producen un potente arco excavador, que da como resultado una penetración profunda.

Los electrodos AWS E-6012 están recubiertos con sodio de alto contenido de titanio. Están diseñados para soldadura de uso general en todas las posiciones, ya sea con corriente directa o con corriente alterna. Un electrodo E-6012 tiene un arco relativamente silencioso, con penetración media y sin

chisporroteo. El buen engruesamiento que produce y el no llevar a un exceso de penetración, hacen a este electrodo excelente bajo condiciones pobres de ajuste.

Los electrodos AWS E-6013 están recubiertos con potasio de alto contenido de titanio y pueden usarse en todas las posiciones, con ca o cd. Estos electrodos son similares a los E-6012, pero producen menos chisporroteo y tienden a socavar menos. El desprendimiento de la escoria se facilita más con los electrodos E-6013 y el arco es muy estable. Esto facilita el establecimiento y la conservación del arco, aun con los electrodos de diámetro muy pequeño ( $\frac{1}{16}$  y  $\frac{5}{64}$  de pulgada) y hace que los electrodos E-6013 sean ideales para soldar metales delgados. El arco es blando y la penetración muy ligera.

Los electrodos AWS E-7014 tienen un recubrimiento similar al de los tipos E-6012 y E-6013. Sin embargo, el recubrimiento de este tipo de electrodo es considerablemente más grueso, ya que contiene una cantidad substancial de polvo de hierro (30% del peso del recubrimiento). La presencia del polvo de hierro permite usar corrientes de trabajo más altas, lo cual se traduce en mejores regímenes de depósito y mejores velocidades de aplicación.

Los electrodos AWS E-7015 están recubiertos con sodio de bajo contenido de hidrogeno. Fueron los primero electrodos para corriente directa de polaridad inversa para todas las posiciones, que se diseñaron para soldar aceros de alto contenido de azufre y alto contenido de carbono, los que tienden a desarrollar porosidad en la soldadura y grietas bajo el cordón.

Los electrodos AWS E-7016 tienen un recubrimiento al que se agrega silicato de potasio, y otras sales del mismo elemento, para hacer que el electrodo sea adecuado para su uso con corriente alterna y también con corriente directa en polaridad invertida.

Los electrodos AWS E-7018 son de diseño de bajo hidrógeno y tienen un recubrimiento con 30% de hierro pulverizado. Tienen todas las características deseables de los electrodos de bajo hidrógeno, los que producen soldaduras sólidas y confiables en aceros difíciles, tales como los de alto contenido de azufre, alto contenido de carbono y bajo contenido de elementos de aleación.

## 3. MICROSCOPIO ÓPTICO

### 3.1 Microscopio

De micro (pequeño) y scopio (observar), es un instrumento que permite observar objetos que son demasiado pequeños para ser vistos a simple vista. El tipo más común y el primero que se inventó es el microscopio óptico. Se trata de un instrumento óptico que contiene una o varias lentes que permiten obtener una imagen aumentada del objeto y que funciona por refracción.

En general, cualquier microscopio requiere los siguientes elementos: una fuente (como una haz de fotones o de electrones), una muestra sobre la que actúa dicha fuente, un receptor de la información proporcionada por la interacción de la fuente con la muestra, y un procesador de esta información (en general, un ordenador).

### 3.2 Microscopio óptico

Un microscopio óptico es un microscopio basado en lentes ópticas. El desarrollo de este aparato suele asociarse con los trabajos de *Anton Van Leeuwenhoek*. Los microscopios de *Leeuwenhoek* constaban de una única lente pequeña y convexa, montada sobre una plancha, con un mecanismo para sujetar el material que se iba a examinar (la muestra o espécimen). Este uso de

una única lente convexa se conoce como Microscopio simple, en el que se incluye la lupa, entre otros aparatos ópticos.

### 3.3 Microscopio óptico compuesto

Figura 10. Microscopio compuesto



Fuente:

[www.uam.es/personal\\_pdi/ciencias/bolarios/BiologiaCCAA/Guiones/Practica3\\_archivos](http://www.uam.es/personal_pdi/ciencias/bolarios/BiologiaCCAA/Guiones/Practica3_archivos)

#### 3.3.1 Partes del microscopio óptico y sus funciones

**Ocular:** Lente situada cerca del ojo del observador. Amplia la imagen del objetivo.

**Objetivo:** Lente situada cerca de la preparación. Amplía la imagen de ésta.

**Condensador:** Lente que concentra los rayos luminosos sobre la preparación.

**Diafragma:** Regula la cantidad de luz que entra en el condensador.

**Foco:** Dirige los rayos luminosos hacia el condensador.

**Lente ocular:** Capta y amplía la imagen formada en los objetivos.

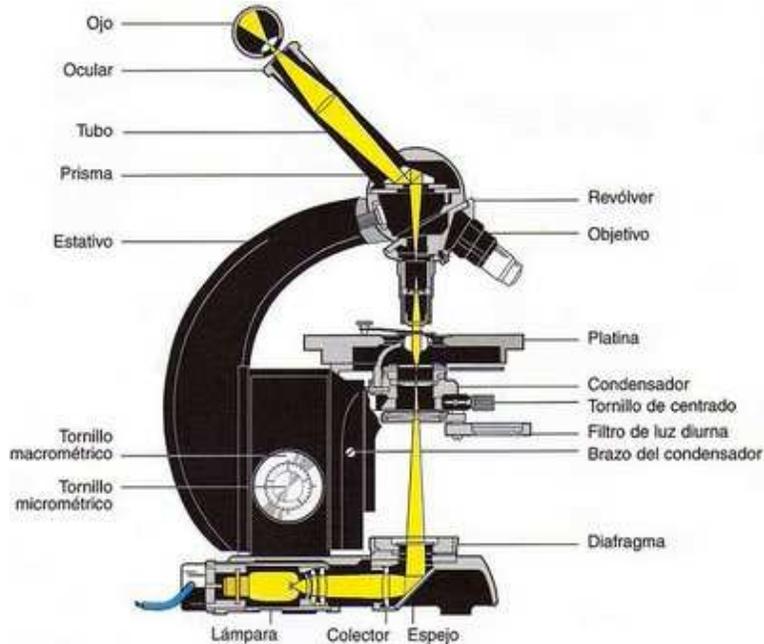
**Tubo:** Es una cámara oscura unida al brazo mediante una cremallera.

**Revolver:** Es un sistema que coge los objetivos, y que rota para utilizar un objetivo u otro.

**Tornillos macro y micrométrico:** Son tornillos de enfoque, mueven la platina hacia arriba y hacia abajo. El micrométrico lo hace de forma rápida y el macro de forma lenta. Llevan incorporado un mando de bloqueo que fija la platina a una determinada altura.

**Platina:** Es una plataforma horizontal con un orificio central, sobre el que se coloca la preparación, que permite el paso de los rayos procedentes de la fuente de iluminación situada por debajo. Dos pinzas sirven para retener el portaobjetos sobre la platina y un sistema de cremallera guiado por dos tornillos de desplazamiento que permite mover la preparación de delante hacia atrás o de izquierda a derecha y viceversa. En la parte posterior de uno de los laterales se encuentra un nonius que permite fijar las coordenadas de cualquier campo óptico; de esta forma se puede acudir a él cuando interesa.

**Figura 11. Partes del microscopio**



Fuente:

[http://4.bp.blogspot.com/\\_whBA\\_UV\\_fsc/Sg2uIVHDeQI/AAAAAAAAAANo/95k2C\\_j7H-I/s400](http://4.bp.blogspot.com/_whBA_UV_fsc/Sg2uIVHDeQI/AAAAAAAAAANo/95k2C_j7H-I/s400)

### 3.3.2 Sistemas de iluminación

Este sistema tiene como finalidad dirigir la luz natural o artificial de tal manera que ilumine la preparación u objeto que se va a observar en el microscopio de la manera adecuada. Comprende los siguientes elementos:

- **Fuente de iluminación.** Se trata generalmente de una lámpara incandescente de tungsteno sobre voltada. Por delante de ella se sitúa un condensador (una lente convergente) e, idealmente, un diafragma de campo, que permite controlar el diámetro de la parte de la preparación que queda iluminada, para evitar que exceda el campo de observación produciendo luces parásitas.

- **El espejo.** Necesario si la fuente de iluminación no está construida dentro del microscopio y ya alineada con el sistema óptico, como suele ocurrir en los microscopios modernos. Suelen tener dos caras: una cóncava y otra plana. Goza de movimientos en todas las direcciones. La cara cóncava se emplea de preferencia con iluminación artificial, y la plana, para iluminación natural (luz solar).
- **Condensador.** El condensador está formado por un sistema de lentes, cuya finalidad es concentrar los rayos luminosos sobre el plano de la preparación, formando un cono de luz con el mismo ángulo que el del campo del objetivo. El condensador se sitúa debajo de la platina y su lente superior es generalmente planoconvexa, quedando la cara superior plana en contacto con la preparación cuando se usan objetivos de gran apertura (los de mayor ampliación); existen condensadores de inmersión, que piden que se llene con aceite el espacio entre esa lente superior y la preparación. La apertura numérica máxima del condensador debe ser al menos igual que la del objetivo empleado, o no se logrará aprovechar todo su poder separador. El condensador puede deslizarse verticalmente sobre un sistema de cremallera mediante un tornillo, bajándose para su uso con objetivos de poca potencia.
- **Diafragma.** El condensador está provisto de un diafragma-iris, que regula su apertura para ajustarla a la del objetivo. Puede emplearse, de manera irregular, para aumentar el contraste, lo que se hace cerrándolo más de lo que conviene si se quiere aprovechar la resolución del sistema óptico.

### 3.3.3 Sistema óptico

**Ocular:** Lente situada cerca del ojo del observador. Amplía la imagen del objetivo.

**Objetivo:** Lente situada cerca de la preparación. Amplía la imagen de ésta.

**Condensador:** Lente que concentra los rayos luminosos sobre la preparación.

**Diafragma:** Regula la cantidad de luz que entra en el condensador.

**Foco:** Dirige los rayos luminosos hacia el condensador.

### 3.3.4 Sistema mecánico

**Soporte:** Mantiene la parte óptica. Tiene dos partes: el pie o base y el brazo.

**Platina:** Lugar donde se deposita la preparación.

**Cabezal:** Contiene los sistemas de lentes oculares.

**Revólver:** Contiene los sistemas de lentes objetivos. Permite, al girar, cambiar los objetivos.

**Tornillos de enfoque:** Macrométrico que aproxima el enfoque y micrométrico que consigue el enfoque correcto.

### 3.3.5 Manejo del microscopio óptico

1. Colocar el objetivo de menor aumento en posición de empleo y bajar la platina completamente. Si el microscopio se recogió correctamente en el uso anterior, ya debería estar en esas condiciones.
2. Colocar la preparación sobre la platina sujetándola con las pinzas metálicas.
3. Comenzar la observación con el objetivo de 4x (ya está en posición) o colocar el de 10 aumentos (10x) si la preparación es de bacterias.
4. Para realizar el enfoque:
  - a) Acercar al máximo la lente del objetivo a la preparación, empleando el tornillo macrométrico. Esto debe hacerse mirando directamente y no a través del ocular, ya que se corre el riesgo de incrustar el objetivo en la preparación pudiéndose dañar alguno de ellos o ambos.
  - b) Mirando, ahora sí, a través de los oculares, ir separando lentamente el objetivo de la preparación con el macrométrico y, cuando se observe algo nítida la muestra, gira el micrométrico hasta obtener un enfoque fino.
5. Pasar al siguiente objetivo. La imagen debería estar ya casi enfocada y suele ser suficiente con mover un poco el micrométrico para lograr el enfoque fino. Si al cambiar de objetivo se perdió por completo la imagen, es preferible volver a enfocar con el objetivo anterior y repetir la operación desde el inciso 3. El objetivo de 40x enfocar a muy poca distancia de la preparación y por ello es fácil que ocurran dos tipos de

percances: incrustarlo en la preparación si se descuidan las precauciones anteriores y mancharlo con aceite de inmersión si se observa una preparación que ya se enfocó con el objetivo de inmersión.

6. Empleo del objetivo de inmersión:

- a) Bajar totalmente la platina.
- b) Subir totalmente el condensador para ver claramente el círculo de luz que nos indica la zona que se va a visualizar y donde habrá que suministrar el aceite.
- c) Girar el revólver hacia el objetivo de inmersión dejándolo a medio camino entre éste y el de 40x.
- d) Colocar una gota mínima de aceite de inmersión sobre el círculo de luz.
- e) Terminar de girar suavemente el revólver hasta la posición del objetivo de inmersión.
- f) Mirando directamente el objetivo, subir la platina lentamente hasta la lente toca la gota de aceite. En ese momento se nota como si la gota ascendiera y se adosara a la lente.
- g) Enfocar cuidadosamente con el micrométrico. La distancia de trabajo entre el objetivo de inmersión y la preparación es mínima, aun menor que con el de 40x por lo que el riesgo de accidente es muy grande.
- h) Una vez se haya puesto aceite de inmersión sobre la preparación, ya no se puede volver a usar el objetivo 40x sobre esa zona, pues se mancharía de aceite. Por tanto, si desea enfocar otro campo, hay que bajar la platina y repetir la operación desde el paso 3.

- i) Una vez finalizada la observación de la preparación se baja la platina y se coloca el objetivo de menor aumento girando el revólver. En este momento ya se puede retirar la preparación de la platina. Nunca se debe retirar con el objetivo de inmersión en posición de observación.
- j) Limpiar el objetivo de inmersión con cuidado empleando un papel especial para óptica. Comprobar también que el objetivo 40x está perfectamente limpio.

### **3.3.6 Mantenimiento y precauciones**

1. Al finalizar el trabajo, hay que dejar puesto el objetivo de menor aumento en posición de observación, asegurarse de que la parte mecánica de la platina no sobresale del borde de la misma y dejarlo cubierto con su funda.
2. Cuando no se está utilizando el microscopio, hay que mantenerlo cubierto con su funda para evitar que se ensucien y dañen las lentes. Si no se va a usar de forma prolongada, se debe guardar en su caja dentro de un armario para protegerlo del polvo.
3. Nunca hay que tocar las lentes con las manos. Si se ensucian, limpiarlas muy suavemente con un papel de filtro o, mejor, con un papel de óptica.
4. No dejar el porta objetos puesto sobre la platina si no se está utilizando el microscopio.
5. Después de utilizar el objetivo de inmersión, hay que limpiar el aceite que queda en el objeto con pañuelos especiales para óptica o con papel

de filtro (menos recomendable). En cualquier caso se pasará el papel por la lente en un solo sentido y con suavidad. Si el aceite ha llegado a secarse y pegarse en el objetivo, hay que limpiarlo con una mezcla de alcohol-acetona (7:3) o xilol. No hay que abusar de este tipo de limpieza, porque si se aplican estos disolventes en exceso se pueden dañar las lentes y su sujeción.

6. No forzar nunca los tornillos giratorios del microscopio (macrométrico, micrométrico, platina, revólver y condensador).
7. El cambio de objetivo se hace girando el revólver y dirigiendo siempre la mirada a la preparación para prevenir el roce de la lente con la muestra. No cambiar nunca de objetivo agarrándolo por el tubo del mismo ni hacerlo mientras se está observando a través del ocular.
8. Mantener seca y limpia la platina del microscopio. Si se derrama sobre ella algún líquido, secarlo con un paño. Si se mancha de aceite, limpiarla con un paño humedecido en xilol.
9. Es conveniente limpiar y revisar siempre los microscopios al finalizar la sesión práctica y, al acabar el curso, encargar a un técnico un ajuste y revisión general de los mismos.

### **3.3.7 Aplicaciones del microscopio óptico**

Este instrumento ha sido de gran utilidad, sobre todo en los campos de la ciencia en donde la estructura y la organización microscópica es importante, incorporándose con éxito a investigaciones dentro del área de la química en el estudio de cristales, la física en la investigación de las propiedades físicas de los

materiales, la geología en el análisis de la composición mineralógica de algunas rocas y por supuesto en el campo de la biología, en el estudio de estructuras microscópicas de la materia viva, por citar algunas disciplinas de la ciencia. Hasta ahora se da uso en laboratorio de histología y anatomía patológica, la microscopía permite determinadas aplicaciones diagnósticas. Numerosas estructuras cristalinas, pigmentos, lípidos, proteínas, depósitos óseos, depósitos de amiloide etc.

### **3.3.8 Principales elementos de un microscopio básico**

Los microscopios de este tipo suelen ser más complejos, con varias lentes en el objetivo como en el ocular. El objetivo de éstas lentes es reducir la aberración cromática y la aberración esférica. En los microscopios modernos el espejo es sustituye por una lámpara que ofrece una iluminación estable y controlable.

Los microscopios compuestos se utilizan para estudiar especímenes delgados, puesto que su profundidad de campo es muy limitada. Por lo general, se utilizan para examinar cultivos, preparaciones trituradas o una lámina muy fina del material que sea. Normalmente depende de la luz que atraviese la muestra desde abajo y usualmente son necesarias técnicas especiales para aumentar el contraste de la imagen.

La resolución de los microscopios ópticos está restringida por un fenómeno llamado difracción que, dependiendo de la apertura numérica ( $AN$  o  $A_N$ ) del sistema óptico y la longitud de onda de la luz utilizada ( $\lambda$ ), establece un límite definido ( $d$ ) a la resolución óptica. Suponiendo que las aberraciones ópticas fueran despreciables, la resolución sería:

$$\delta = \frac{\lambda}{2 \times A_N}$$

Normalmente, se supone una  $\lambda$  de 550 nm, correspondiente a la luz verde. Si el medio es el aire, la  $A_N$  práctica máxima es de 0.95, y en el caso de aceite de hasta 1.5. Ello implica que incluso el mejor microscopio óptico está limitado a una resolución de unos 0.2 micrómetros.

## **4. FUNDAMENTOS DE METALURGIA DE LA SOLDADURA**

### **4.1 Microestructura de los metales y las aleaciones**

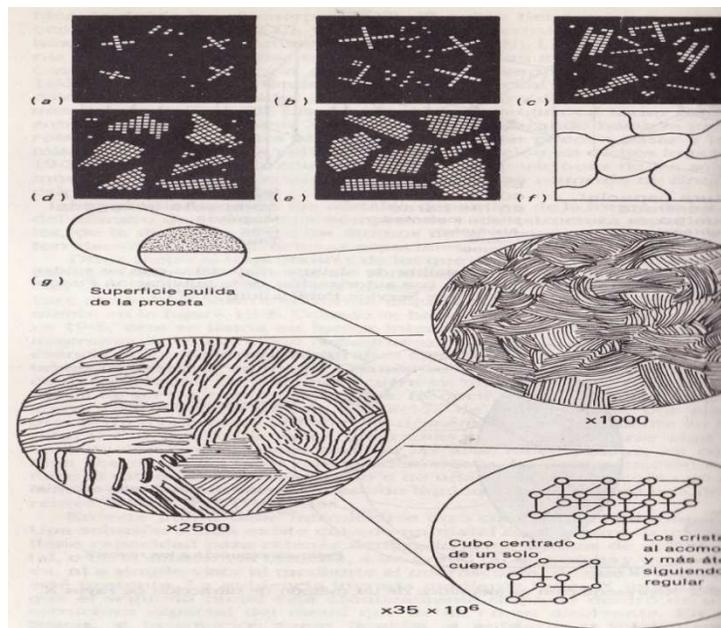
Las propiedades de los metales dependen de la forma de los cristales, del número de átomos que comprende cada estructura espacial de cristales, de la distancia entre los átomos de la estructura espacial, y de la interrelación de las estructuras espaciales.

Otros factores importantes de los que dependen las propiedades son las características del proceso de solidificación, o los fenómenos asociados con la transformación de los metales del estado líquido al estado sólido. Este proceso se ilustra en forma esquemática en la figura 12, y gráficamente en la figura 13. Un diagrama de fase es en esencia una representación gráfica de la temperatura sobre la cual son estables las fases de un metal. Cuando se usa la palabra equilibrio, se implica que cualquier cambio que ocurra en un metal puro o en una aleación habrá de ser un cambio reversible. Es decir, cualquier cambio que resulte como consecuencia de una elevación de temperatura, por ejemplo, se producirá a la inversa al haber un descenso correspondiente en la temperatura. Por medio de estos diagramas puede predecirse algo sobre la constitución o microestructura de las aleaciones sólidas, así como también acerca de las fases que pueden existir. La denominación fase se refiere al estado de un metal puro o de una aleación, tal como un metal en estado

gaseoso, un metal en estado líquido, o un metal en una de sus diferentes estructuras cristalinas.

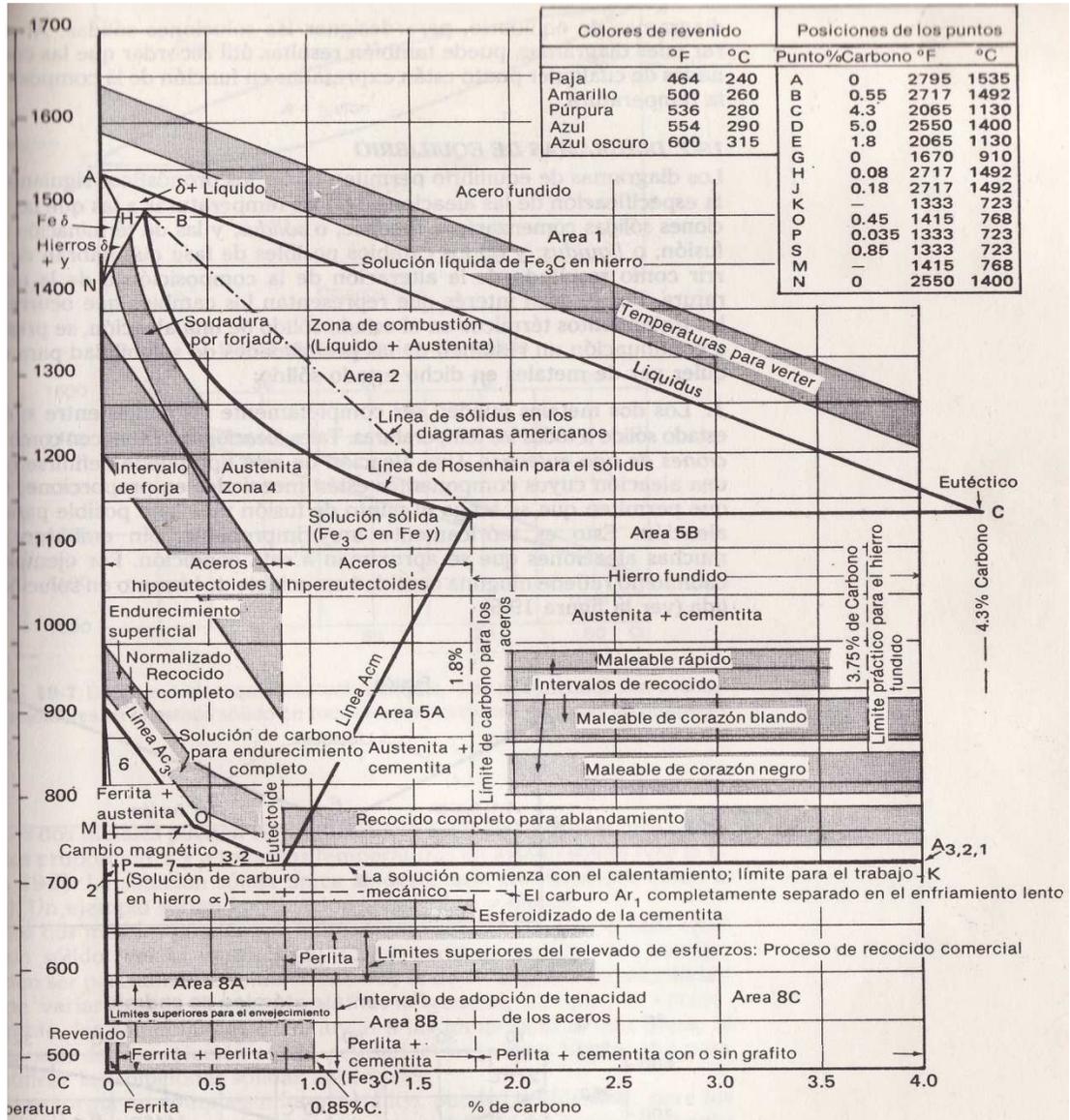
Una solución sólida existe cuando un metal madre puro, o un disolvente tiene capacidad para retener dentro de sí los átomos de un segundo metal, o de la sustancia disuelta, a un grado tal que no hay evidencia positiva, ni a simple vista ni mediante el microscopio, de que el segundo metal esté presente. La evidencia lograda mediante rayos X indicaría también que el segundo metal está atómicamente disperso dentro de o sobre la estructura espacial del metal que actúa como disolvente. En otras palabras, si la solución fuera líquida, al enfriarse y solidificarse no se separaría en los diferentes tipos de metal sólido, sino que se mantendría como una fase (cristalina).

**Figura 12. Diagrama de la solidificación de un metal: a) grupos de cristales; b), c), d) y e) crecimiento de los grupos de cristales; f) deformación de los cristales por obstrucción; g) amplificación de la superficie del metal.**



Fuente: Horwitz Henry. **Soldadura: aplicaciones y práctica.** Pág. 508.

Figura 13. Diagrama de equilibrio hierro-carbono



Fuente: Horwitz Henry. Soldadura: aplicaciones y práctica. Pág. 509.

## 4.2 Aspectos metalúrgicos de la soldadura

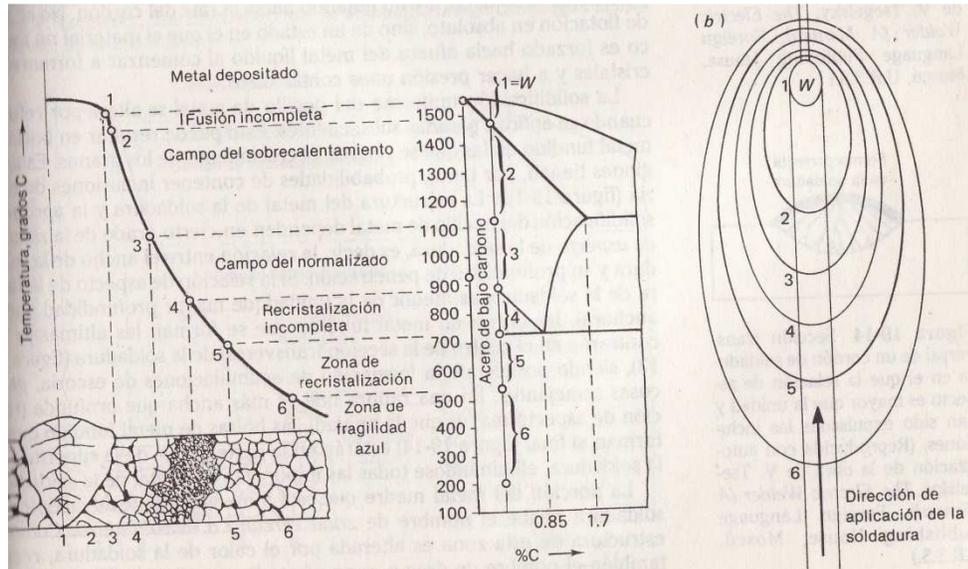
Los aspectos metalúrgicos de lo que tiene lugar en la zona de la soldadura durante el enfriamiento difieren algo de los que se observan durante el enfriamiento de una pieza fundida.

En la soldadura, el metal fundido se solidifica en cuestión de segundos. La cantidad de metal rara vez excede de una pulgada cúbica. La fuente de calor y el metal fundido tienen una temperatura considerablemente más elevada que en los hornos de fusión. Como resultado del enfriamiento rápido del cordón de soldadura, las reacciones químicas que se inician en el metal fundido y en la escoria no tienen tiempo para completarse.

La solidificación del metal fundido en el pocillo de soldadura se ilustra en forma de diagrama en la figura 14. Al avanzar la formación del cordón, la temperatura del cordón de soldadura desciende, debido a la abstracción del calor hacia el metal de base y a la radiación hacia la atmósfera del ambiente, y el metal se solidifica.

Los granos aparecen primero en la línea de fusión, en donde la temperatura es relativamente baja, y crecen con rapidez diferente, porque al aumentar de tamaño y al hacer presión los cristales unos contra otros, cada uno actúa de acuerdo con el estado de su crecimiento. Sin embargo, los granos en crecimiento pueden empujar hacia afuera las inclusiones no metálicas, hasta la superficie de la soldadura. Esta es la razón por la que en la soldadura que se aplica hacia arriba, la escoria aparece sobre la superficie de la soldadura y no flotando hacia la raíz del cordón. No se trata de flotación en absoluto, sino de un estado en el que el material no metálico es forzado hacia afuera del metal líquido al comenzar a formarse los cristales y a hacer presión unos contra otros.

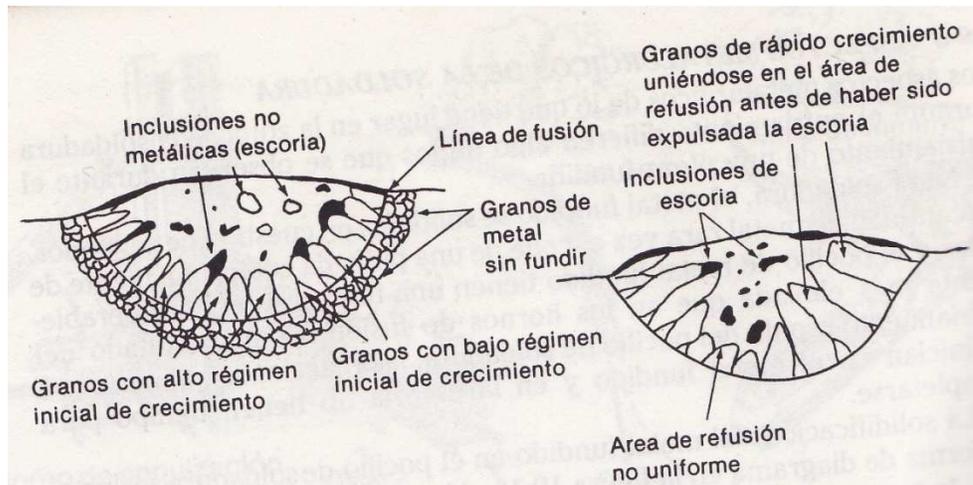
**Figura 14. Solidificación progresiva del metal fundido en un pocillo de soldadura.**



Fuente: Horwitz Henry. **Soldadura: aplicaciones y práctica.** Pág. 515.

La solidificación uniforme del pocillo de metal se altera por refusión cuando se aplican pasadas subsecuentes. Esto puede resultar en bolsas de metal fundido en las que se retarda el crecimiento de los granos. Estas regiones tienen, por tanto, probabilidades de contener inclusiones de escoria (figura 15). La estructura del metal de la soldadura y la apropiada solidificación del pocillo de metal dependen en cierto grado de la relación de aspecto de la soldadura, es decir, la relación entre el ancho de la soldadura y su profundidad de penetración. Si la relación de aspecto de la ranura de la soldadura es menor de la unidad (de mayor profundidad que su anchura), las bolsas de metal fundido que se forman las últimas se encontrarán en el centro de la sección transversal de la soldadura siendo posible allí la formación de acumulaciones de escoria, gas y cosas semejantes.

**Figura 15. Sección transversal de dos cordones de soldadura en los que se aprecian inclusiones de escoria.**



Fuente: Horwitz Henry. **Soldadura: aplicaciones y práctica.** Pág. 516.

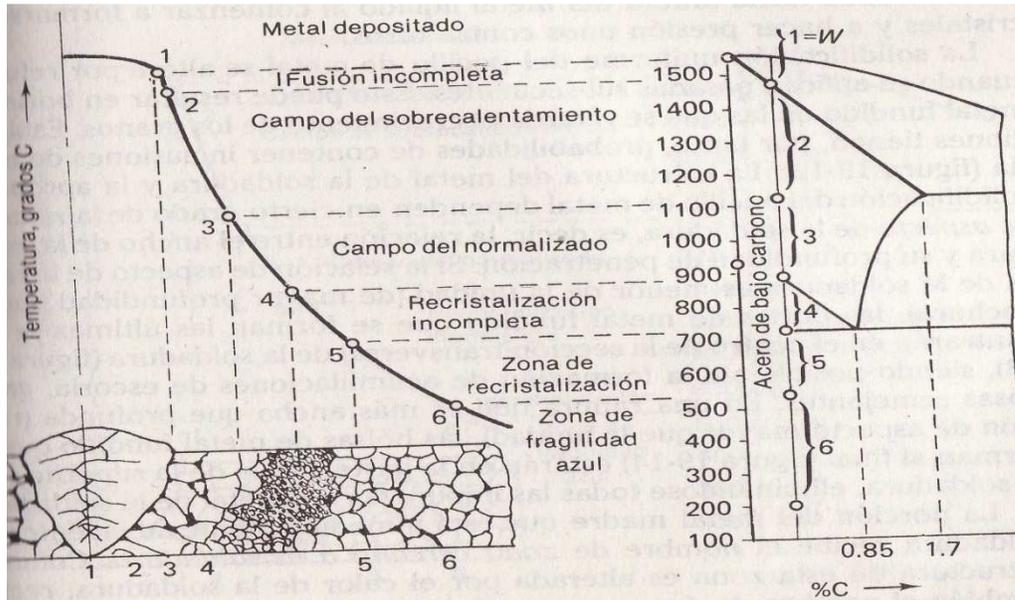
La porción del metal madre que está inmediatamente adyacente a la soldadura recibe el nombre de zona cercana a la soldadura. Como la estructura de esta zona es alterada por el calor de la soldadura, recibe también el nombre de área o zona afectada por el calor (HAZ).

La figura 16 muestra algunas alteraciones que ocurren en la estructura de la zona afectada por el calor en un acero con bajo contenido de carbono. Adyacente a la soldadura se encuentra una zona de fusión incompleta (1) en la que el metal se calienta hasta una temperatura elevada y se forman granos gruesos. Al alejarse de la soldadura (2), disminuyen la temperatura y la magnitud del sobrecalentamiento, y por tanto también el tamaño del grano. En el campo de normalización (3) el grano es fino, ya que el tiempo de calentamiento no es lo suficientemente largo para que se produzca entrecrecimiento entre los granos austeníticos, y el enfriamiento subsecuente expulsa los granos finos de perlita y ferrita. El campo de normalización va seguido por una zona de recristalización incompleta (4), en la que los granos de

perlita se descomponen en granos aún más finos. La zona de recristalización (5) se caracteriza por la recuperación de los granos deformados por rodado. Las alteraciones estructurales que ocurren en el área afectada por el calor varían generalmente con el contenido de carbono y de elementos de aleación en un acero.

Como la temperatura de la zona cercana a la soldadura varía de un lugar a otro, el metal de la zona afectada por el calor también varía en cuanto a su estructura y propiedades mecánicas. En el área de normalización, el metal de la soldadura puede ser superior al metal madre o de base. En el área sobrecalentada en la que el grano es grueso, el metal pierde algo de su ductilidad, y especialmente su resistencia al impacto. La zona afectada por el calor muestra también cambios de dureza, especialmente en el caso de los aceros sensibles al tratamiento térmico. Un incremento en la dureza va acompañado generalmente por un aumento de la fragilidad y una reducción en la ductilidad.

**Figura 16. Diagrama de la zona afectada por el calor (HAZ) del acero con bajo contenido de carbono.**



Fuente: Horwitz Henry. **Soldadura: aplicaciones y práctica.** Pág. 517.

Debe señalarse que al soldar aceros simples con bajo contenido de carbono, los cambios estructurales que ocurren en la zona cercana a la soldadura no afectan apreciablemente la resistencia de las piezas soldadas.

### 4.3 Minimizado del agrietamiento de las soldaduras en los metales ferrosos

Entre los diversos métodos que se emplean para minimizar el agrietamiento de las soldaduras en los metales ferrosos pueden mencionarse 1) el uso del metal de aporte correcto, 2) el precalentamiento y 3) el postcalentamiento. Los tipos de metales de aporte para los diversos métodos y los efectos de cada uno se estudiaron con anterioridad. Lo importante es que el metal de aporte

seleccionado sea el adecuado tanto para el proceso de soldadura como para el metal de base.

El precalentamiento es en esencia una elevación de la temperatura de toda la parte o de la zona de la soldadura, hasta un nivel superior al de los entornos. El precalentamiento se utiliza principalmente con las aleaciones ferrosas que contienen más de 0.25% de carbono antes de soldarse, y su propósito es producir un enfriamiento más lento y por tanto más uniforme.

A veces se coloca una parte entera en un horno permanente o en un horno temporal de ladrillo construido en torno a la parte. Cuando se hace necesario el precalentamiento local, como, por ejemplo, cuando la parte no puede moverse o cuando es demasiado grande para moverse, puede usarse un soplete oxiacetilénico o algún otro tipo de soplete para el precalentamiento; o bien puede usarse un precalentador eléctrico por inducción.

La temperatura de precalentamiento varía con el análisis, el tamaño y la forma de la pieza de trabajo. Cuando se usan electrodos de acero común, la temperatura de precalentamiento varía generalmente entre 177 y 371°C (350 y 700°F). Si se usan electrodos del tipo de bajo hidrogeno, generalmente es suficiente aplicar 149°C (300°F), o sea, un precalentamiento menor que el que se recomienda para electrodos de acero común.

El tratamiento de postcalentamiento de una junta o una parte soldada puede consistir en un tratamiento de relevado de esfuerzos, un tratamiento térmico de recocido, de normalizado, de templado, de revenido, de templado transversal y/o de temple martensítico.

Cuando se requiera relevado de esfuerzos, esté deberá hacerse calentando uniformemente hasta por lo menos 593°C (1100°F), y hasta a 649°C (1200°F), o a temperaturas mayores, si puede hacerse tal calentamiento sin que haya deformación. Cuando lo requieran las características del material pueden

usarse diferentes temperaturas para obtener un relevado de esfuerzos apropiado. La estructura o las partes de la misma deberán elevarse lentamente hasta la temperatura especificada, y mantenerse a dicha temperatura durante un periodo proporcionado sobre la base de por lo menos una hora por pulgada de espesor, y se dejará enfriar lentamente en una atmósfera tranquila a una temperatura que no exceda de 316°C (600°F).

Los efectos generales de un tratamiento térmico de relevado de esfuerzos son los siguientes:

- Recuperación
- Relajamiento
- Revenido
- Recristalización
- Esferoidizado

Además de tener esfuerzos de contracción, una parte soldada puede haber experimentado un poco de deformación permanente, no sólo a temperaturas elevadas, sino también a temperaturas bajas. La deformación permanente por debajo de 454 a 538°C (850 a 1000°F) va acompañado por líneas de deslizamiento de la microestructura. Los planos de deslizamiento representan planos que se han formado en los granos del acero y que pueden ocasionar el movimiento de unos granos respecto a los otros.

La estructura soldada que va a someterse a relevado de esfuerzos contiene así esfuerzos de contracción de tensión y compresión de todas las magnitudes hasta la resistencia a la fluencia, y tiene también algunos cristales trabajados en frío con líneas de deslizamiento.

### **4.3.1 Recuperación**

Es el primer efecto que se presenta al elevar la temperatura para un tratamiento de relevado de esfuerzos, la temperatura se eleva uniformemente para mantener todas las partes de la estructura tan cerca de una misma temperatura como sea posible en todo momento, previniendo así la ocurrencia de esfuerzos térmicos. Al elevar la temperatura durante los primeros 204°C (400°F) o algo así, no hay cambio apreciable en la estructura de los granos, pero, sin embargo, los esfuerzos de contracción disminuyen un poco. Es una regla general que los esfuerzos internos de un material disminuyan al elevar su temperatura.

### **4.3.2 Relajamiento**

Al elevar la temperatura a 538°C (1000°F), ó valores mayores, se observa que ocurre el relajamiento y que se alivian los esfuerzos de contracción, rápida y completamente, si se estira una barra de acero hasta el esfuerzo de fluencia a la tensión a la temperatura ambiente después de ser soldada formando un marco. Los átomos se estiran apartándose paralelamente a la carga y se mueven acercándose en dirección perpendicular a la del esfuerzo, lo cuál es por cierto el significado básico del esfuerzo, un movimiento de los átomos hasta posiciones capaces de soportar la carga. Como la temperatura hace que la resistencia a la fluencia caiga por debajo del esfuerzo impuesto, el metal fluye plásticamente hasta que se reduce el esfuerzo (sea de compresión o de tensión) a la resistencia a la fluencia del metal a 538°C (1000°F).

### **4.3.3 Revenido**

La operación de elevar la temperatura del acero templado por enfriamiento a cualquier punto inferior al punto más bajo de transformación se llama revenido o regulación del temple por recalentamiento. La zona, afectada por el calor, que está próxima a las soldaduras hechas sin precalentamiento o con precalentamiento insuficiente en el caso del acero de contenido medio de carbono y en muchos otros aceros de alta resistencia a la tensión, se enfría rápidamente y por tanto es muy dura. La dureza de cualquier acero es función de la velocidad y del método de enfriamiento. Si la zona de la soldadura estuvo arriba de su intervalo crítico durante la soldadura, estaba formada por austenidad con diez veces la cantidad de carbono en solución sólida que la cantidad soluble a la temperatura ambiente. Durante el enfriamiento rápido (en este caso, enfriamiento en el aire), la austenita cambia en gran parte a martensita, la forma cristalina tetragonal del acero, intermedia entre la centrada en las caras y la centrada en el cuerpo. El carbono que hay en la martensita se cree que existe en forma de átomos de carbono o en cristales pequeñísimos de carburo de hierro.

### **4.3.4 Recristalización**

La recristalización transforma los fragmentos deformados, que son fuente de esfuerzos internos, en nuevos cristales no deformados y libres de esfuerzos internos. La recuperación elimina parcialmente los esfuerzos de contracción; la recristalización completa dicha eliminación. La temperatura a la que tiene lugar la recristalización en un metal dado desciende al incrementar el grado de

trabajo previo en frío. No existe una sola temperatura de recristalización para un metal dado. Para el hierro y el acero, la temperatura más baja a la que se ha observado la recristalización es la de 449°C (840°F).

Sin embargo, no ocurre recristalización alguna cuando la dislocación, o trabajado en frío, es de carácter menor. Por ejemplo, el trabajo en frío ocasionado por la contracción de las partes durante el enfriamiento póstumo a la soldadura es generalmente demasiado ligero para lograr que haya recristalización durante el tratamiento térmico de relevado de esfuerzos. El relevado de esfuerzos ocurre, por tanto, primordialmente por la recuperación y el relajamiento, más que por la recristalización.

#### **4.3.5 Esferoidizado**

El proceso de crear partículas de carburo de forma esférica en el acero se llama esferoidizado. Si se comienza con perlita, se hace el esferoidizado convirtiendo las placas de carburos en esferas. Si se comienza con martensita o bainita, en cambio, en las cuales las pequeñas partículas de carburos son aproximadamente esféricas inicialmente, el esferoidizado consiste simplemente en lograr la coalescencia de las partículas y volverlas visibles al microscopio. Las agujas de martensita no se esferoidizan.

El carburo de la zona afectada por el calor del acero soldado con contenido medio de carbono está dividido en partículas extremadamente pequeñas. Las partículas que hay dentro de las agujas de martensita son pequeños esferoides de carburo. Al elevarse la temperatura durante el tratamiento térmico de relevado de esfuerzos, los carburos siguen la ley general de las partículas

pequeñas contenidas en un metal. El carbono procedente de las partículas más pequeñas entra en solución para precipitarse nuevamente sobre las partículas más grandes.

El esferoidizado del carburo cerca de una junta soldada es un proceso que comienza al estarse aplicando la soldadura. La perlita presente en la zona que se calienta a valores cercanos a los intervalos críticos se esferoidiza en mayor o menor grado, dependiendo del tiempo que haya permanecido a temperatura cercana a la más baja del intervalo crítico.

#### **4.4 Identificación de los metales**

##### **4.4.1 Aceros al carbono**

Los aceros al carbono (los que también se conocen como aceros al carbono simple, aceros ordinarios y aceros con contenido de carbono exclusivamente) están formados por una amplia gama de aceros que contienen hasta:

- Carbono        1.70% máx.
- Manganeso    1.65% máx.
- Silicio         0.60% máx.

El carbono es el elemento endurecedor más potente. Al aumentar el contenido de carbono, el acero se vuelve más y más templable. Si el contenido de carbono es lo suficientemente alto (mayor de 2.5%), el enfriamiento súbito por debajo de la temperatura de soldadura puede conducir a una zona dura y a veces frágil adyacente a la soldadura, y si el metal de la soldadura capta una cantidad considerable de carbono por mezcla, el depósito mismo de soldadura

puede ser duro y frágil, con tendencia a agrietarse. Los aceros al carbono con contenido de carbono mayor de 0.10% y hasta de 1.2% tienen mayor resistencia a la tensión que los aceros cuyo contenido de carbono es menor de 0.10%. Sin embargo, estos aceros no son tan soldables como los de menor contenido de carbono.

Con base en el contenido de carbono, la AWS divide a los aceros al carbono en cuatro grupos:

- |  |                         |
|--|-------------------------|
| ➤ Aceros con bajo carbono                    | Hasta 0.15% de carbono  |
| ➤ Aceros con contenido bajo-medio de carbono | 0.15 a 0.29% de carbono |
| ➤ Aceros con contenido medio de carbono      | 0.29 a 0.40% de carbono |
| ➤ Aceros con alto carbono                    | 0.45 a 1.70% de carbono |

#### **4.4.1.1 Aceros con bajo carbono**

Los aceros con bajo carbono se producen primordialmente en láminas, en hojas, o en rollos, y laminados tanto en frío como en caliente. Tienen baja resistencia a la fluencia, y se emplean en la mayoría de las aplicaciones que requieren considerable conformación en frío, tales como piezas estampadas, formas fabricadas en rodillos, o dobladas en tamaños de barras para surtir y formas estructurales. En raras ocasiones, los aceros que tienen un contenido de carbono menor de 0.10% muestran tendencia a producir soldaduras porosas. Aunque la porosidad (excepto que la soldadura sea muy porosa) no ofrece un serio problema desde el punto de vista de la resistencia. Las picaduras superficiales en la soldadura son indeseables desde el punto de vista de la apariencia.

#### **4.4.1.2 Aceros con contenido bajo-medio de carbono**

Estos aceros, al ser laminados, tienen una resistencia a la fluencia comprendida en el intervalo de 36,000 a 65,000  $\frac{lb}{pulg^2}$  y se definen en las correspondientes especificaciones de la ASTM. Los aceros con este intervalo de carbono se venden laminados en frío, laminados en caliente, y tratados térmicamente, con resistencia a la fluencia hasta de 100,000  $\frac{lb}{pulg^2}$ . Un gran porcentaje de los tanques de agua, las formas estructurales soldadas, las bases de máquinas, y las partes de maquinaria se fabrican utilizando estos aceros.

#### **4.4.1.3 Aceros con contenido medio de carbono**

Estos aceros se templen fácilmente, y su dureza puede variar desde totalmente blandos en la situación recocida, hasta una lectura *Rockwell C* de 25. Se hacen con estos aceros las partes de máquinas forjadas en frío y en caliente, tales como pernos pasantes, birlos, barras de conexión y ejes frontales.

La soldadura de estos aceros puede requerir procedimientos especiales, los que pueden incluir el precalentamiento, el poscalentamiento y el relevado de esfuerzos. Sin experiencia previa en la soldadura de estos aceros, es aconsejable verificar el acero en cuanto a su tendencia al agrietamiento, haciendo una soldadura de filete, de un largo de 12 a 14 pulgadas, en la placa en cuestión (a la temperatura ambiente y sin precalentamiento), rompiendo después la soldadura para examinarla visualmente en busca de grietas. En las soldaduras de filete en fractura abierta, las grietas aparecen ordinariamente

como zonas de color púrpura, debido a la oxidación de la superficie de las mismas.

#### **4.4.1.4 Aceros con alto carbono**

Los aceros con alto contenido de carbono incluyen muchos aceros que generalmente se emplean templados, con dureza que varía desde *Rockwell C* 40 y 63 hasta el temple completo. Las partes que se fabrican con los aceros de este grupo incluyen las herramientas para torno, las brocas y puntas de broca, los cuchillos, las hojas de rasqueta y de escrepas, las rejas de arado, las ruedas para carros de ferrocarril los rodillos de laminación, y otros artículos que no requieren soldadura para su manufactura. Sin embargo, estas piezas se reparan con frecuencia con soldadura. El éxito en la soldadura de estos aceros requiere el desarrollo de procedimientos específicos de soldadura para cada aplicación.

Los problemas que pueden surgir durante la soldadura de los aceros al alto carbono son:

- Agrietamiento del metal de la soldadura. Las grietas pueden ser transversales al cordón o pueden correr por el centro del mismo. A veces no aparecen en la superficie del cordón, aunque el interior del mismo sí esté agrietado.
- Porosidad en el metal de la soldadura.
- Endurecimiento excesivo del metal de base.

- Agrietamiento del metal base: Este comprende tanto la formación de grietas bajo el cordón; grietas precisamente debajo de la zona de fusión; como grietas radiales en la zona de fusión, las que se extienden hasta el metal de base.
- Ablandamiento excesivo del metal de base.

Las posibles soluciones durante la soldadura de aceros de alto carbono son:

- Realizar antes de la soldadura un tratamiento de deshidrogenado que tiene como objetivo remover del material a ser soldado el hidrogeno que pudiese haber quedado al efecto contaminante, en servicio, de sustancias que generan hidrógeno atómico.
- Realizar un precalentamiento de la pieza a soldar para reducir la porosidad debida a la presencia de humedad así como también disminuye la velocidad de enfriamiento del metal de soldadura y de la ZAC.
- Realizar un postcalentamiento de la pieza soldada para disminuir la dureza de la ZAC y con esto se logra aumentar la resistencia a la corrosión.

## **5. METALURGIA DE LA SOLDADURA**

### **5.1 Solidificación**

Los metales sólidos son materiales cristalinos caracterizados por el enlace metálico, una resistencia y una ductilidad razonables, y por una buena conductividad eléctrica. Si sus átomos, junto con sus electrones, se visualizan como esferas diminutas (de diámetro alrededor de 0.2 nm), se tiene que estas esferas ocupan posiciones estrictamente prescritas en el espacio. El arreglo de puntos que representa el centro de los átomos se llama red cristalina.

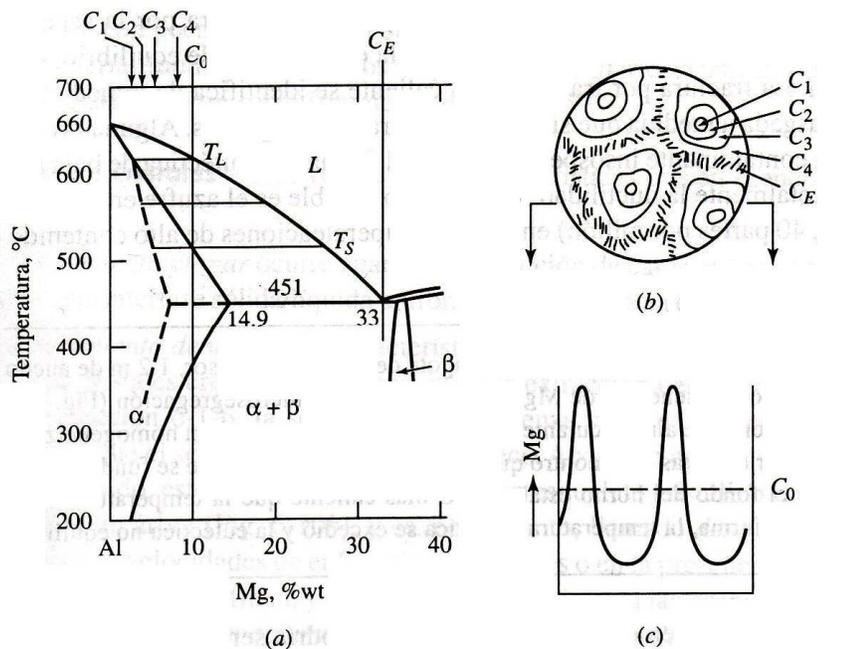
#### **5.1.1 Solidificación no en equilibrio**

Se supone que las condiciones de enfriamiento durante la solidificación permiten un equilibrio completo. Esto rara vez es el caso porque las velocidades de enfriamiento en la mayor parte de los procesos de solidificación son relativamente rápidas (del orden de una fracción de grado a algunos grados por segundo en la fundición, y mucho más rápidas en el procesamiento de partículas y en la soldadura por fusión), y los procesos de difusión son, en general, demasiado lentos. Por lo tanto, las estructuras solidificadas muestran por lo general características microestructurales no de equilibrio, en especial cuando el intervalo de congelamiento es amplio.

El solidus no de equilibrio que se muestra como una línea discontinua en la figura 17 representa la composición promedio del sólido. Como los centros (núcleos) de los cristales que crecieron durante la solidificación no de equilibrio tienen una composición diferente como se muestra en la figura 17b, es común referirse a este fenómeno como microsegregación o segregación intragranular. Esto tiene consecuencias prácticas para una pieza terminada.

La microsegregación puede ser indeseable por una variedad de razones y, si no se puede evitar, se puede eliminar parcial o totalmente por medio de un subsiguiente tratamiento térmico de homogeneización.

**Figura 17. A velocidades de enfriamiento usuales, una solución sólida de composición  $C_0$ (a) presentará segregación intragranular (b) con una concentración mayor del elemento de aleación en las fronteras de los granos (c) como en el sistema Al-Mg.**



Fuente: Schey John A. **Procesos de manufactura**. Pág. 157.

## 5.2 Nucleación y crecimiento de granos

El informe de la solidificación que se dio arriba está muy simplificado. En realidad, los procesos pasan a través de una secuencia de Nucleación y crecimiento.

### 5.2.1 Nucleación

Existen dos formas en las cuales se pueden formar los núcleos:

1. **La nucleación homogénea:** sólo ocurre en fusiones muy limpias. El núcleo se forma por el ordenamiento de los átomos en posiciones correspondientes a la red cristalina. Tal orden también existe en la fusión, pero sólo en distancias cortas. Debajo del punto de fusión, el ordenamiento de largo alcance es posible, pero en su mayoría es sólo temporal. Los átomos están en una condición altamente agitada a esta temperatura, y se forman y desaparecen de manera continua núcleos embrionarios. Sólo los núcleos que han alcanzado un tamaño crítico son estables y capaces de crecer lo cual hacen sólo a temperaturas considerablemente por debajo de la  $T_m$  (el grado de tal sub-enfriamiento se puede expresar como una fracción del punto de fusión y se encuentra alrededor de  $0.2T_m$  en los metales puros); como se forman pocos núcleos, el tamaño de los granos es grueso.
2. **La nucleación heterogénea:** es típica en la mayor parte de los metales prácticos. El número de núcleos se incrementa mucho, se reduce el tamaño de los granos y la necesidad de sub-enfriamiento disminuye o se

elimina a través de la nucleación sobre la superficie sólida de los agentes de nucleación. Estos pueden ser impurezas residuales o sustancias finamente divididas (a menudo, compuestos intermetálicos), agregados de modo intencional a la fusión, un poco antes del vaciado. Si tienen una estructura cristalina compatible con poca diferencia en el espaciamiento de la red y si están humedecidos por el material fundido, los átomos se pueden depositar con facilidad sobre ellos para formar cristales en un sub-enfriamiento menos de 5 °C

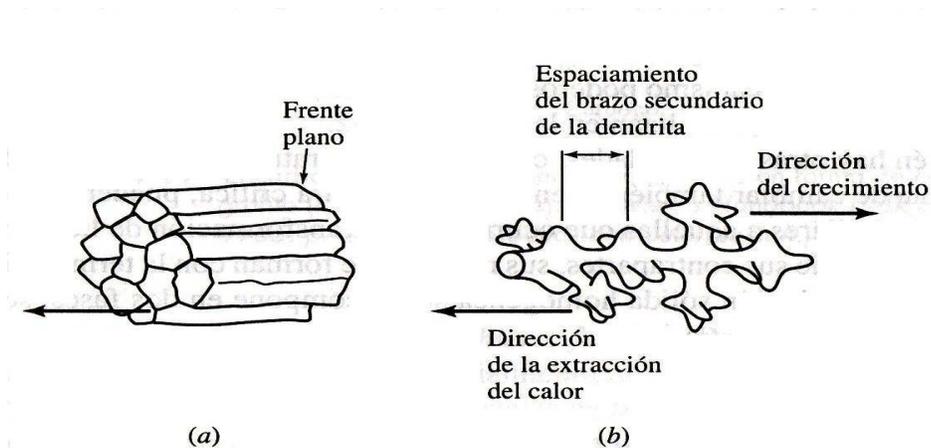
### **5.2.2 Crecimiento de cristales**

1. El crecimiento planar ocurre cuando la extracción de calor se hace a través de la fase sólida y una interfase sólida/líquida uniforme se mueve hacia el líquido (figura 18a)
2. El crecimiento dendrítico es característico en las aleaciones de solución sólida. De nuevo, los cristales crecen en la dirección de la extracción del calor pero la solidificación comienza con una solución sólida más pobre, mientras que el sólido remanente se enriquece. Acoplado con un sub-enfriamiento local en el líquido, esto lleva a la formación de un esqueleto cristalino ramificado, el cual recuerda un árbol (figura 18b), y es, por lo tanto, llamado dendrita (del griego dendron, árbol). A velocidades de enfriamiento mayores o en la presencia de agentes de nucleación, los granos se refinan, y con mayor relevancia para las propiedades mecánicas, también se reduce el espaciamiento del brazo secundario de la dendrita.

La nucleación y el crecimiento de granos ocurren simultáneamente, pero a velocidades diferentes. La velocidad de nucleación es máxima en un sub-enfriamiento sustancial, mientras que la velocidad de crecimiento tiene un pico cerca de la temperatura de solidificación. Por lo tanto, el tamaño del grano depende del tiempo de residencia en una temperatura dada, lo cual a su vez está en razón de la velocidad de enfriamiento. A velocidades de enfriamiento bajas, hay tiempo para que crezcan los nuevos núcleos formados, y la estructura será de grano grueso. A velocidades de enfriamiento elevadas, una velocidad de alta nucleación proporciona muchos sitios en los cuales puede ocurrir el crecimiento y el tamaño de los granos será pequeño.

A velocidades de enfriamiento extremadamente elevadas la cristalización puede suprimirse y se obtiene un cuerpo no cristalino (amorfo).

**Figura 18. La solidificación se lleva a cabo con (a) un frente plano en los metales puros, pero (b) con el crecimiento de dendritas en las soluciones sólidas.**



Fuente: Schey John A. **Procesos de manufactura**. Pág. 159.

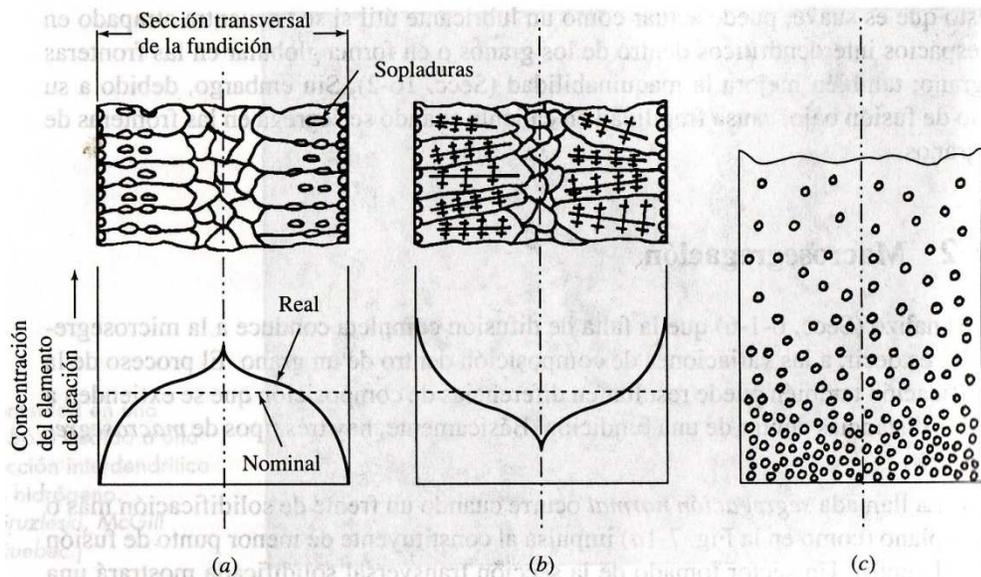
### 5.3 Macrosegregación

Ya se analizó que la falta de difusión completa conduce a la microsegregación, es decir, a las variaciones de composición dentro de un grano. El proceso de la solidificación también puede resultar en diferencias de composición que se extienden a grandes distancias dentro de una fundición, hay tres tipos de macrosegregación:

1. **Segregación normal:** ocurre cuando un frente de solidificación más o menos plano impulsa al constituyente de menor punto de fusión hacia el centro. Un sector tomado de la sección transversal solidificada mostrará una concentración menor del elemento de aleación en la superficie que en el centro (figura 19a). Si se liberan gases durante la solidificación, éstos sacan al fluido más rico de la zona y contribuyen a la segregación de los elementos de aleación hacia el centro.
2. **Segregación inversa:** es común en las aleaciones de solución sólida con un patrón de solidificación dendrítico. Como los brazos de las dendritas se forman primero y tienen una concentración menor de los elementos de aleación, los espacios interdendríticos originados por la contracción por solidificación deben ser rellenados con un líquido de concentración mayor de soluto. Este líquido fluye en dirección opuesta a la del crecimiento de las dendritas; de ahí que la superficie tenga una concentración del elemento de aleación más elevada que el promedio (figura 19b).
3. **Segregación por gravedad:** ocurre cuando los compuestos insolubles, las inclusiones o los metales inmiscibles en el líquido tienen una densidad muy diferente a la de la fusión; por lo tanto, se elevan o se hunden (figura 19c).

Uno de los atractivos de la manufactura en el espacio es que, en la ausencia de gravedad, las aleaciones inusuales que consisten de metales con densidades muy distintas se puede solidificar sin segregación.

**Figura 19. La solidificación de metales casi puros conduce a (a) macrosegregación “normal” especialmente en la presencia de separación del gas. (b) La solidificación dendrítica lleva a la segregación “inversa” (c) Constituyentes de densidad elevada que no se disuelven en la fusión separados por la segregación por gravedad.**



Fuente: Schey John A. **Procesos de manufactura**. Pág. 194.

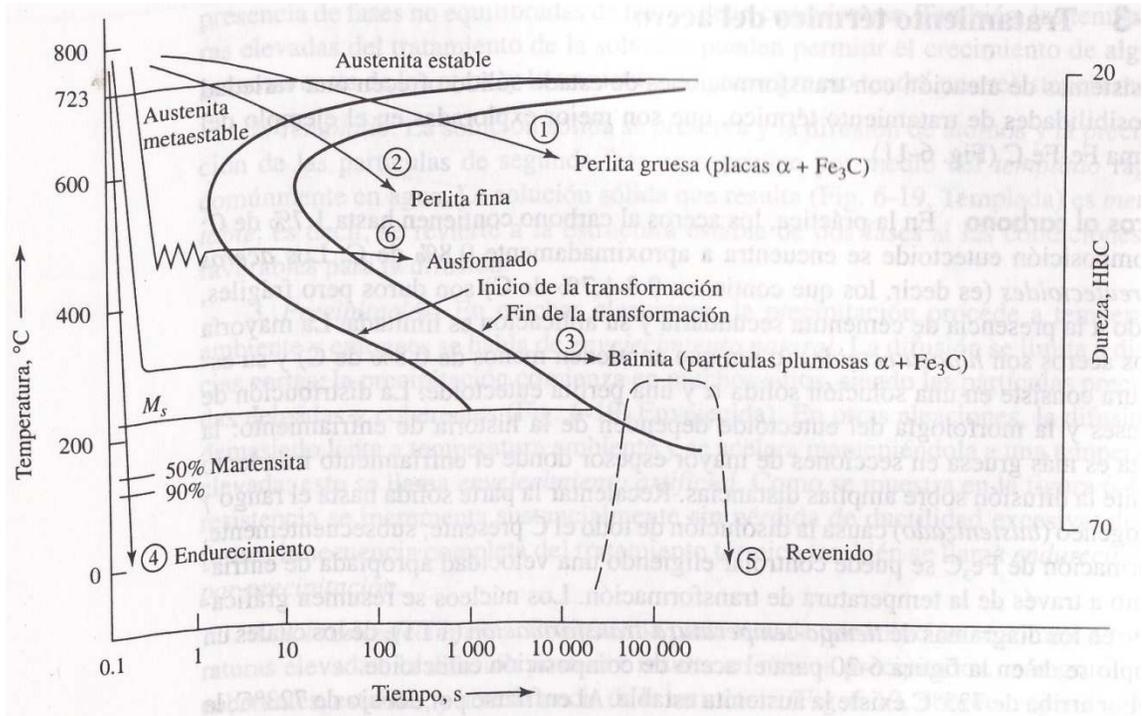
#### 5.4 Tratamiento térmico del acero

En la práctica, los aceros al carbono contienen hasta 1.7% de C; la composición eutectoide se encuentra a aproximadamente 0.8% de C. Los

aceros hipereutectoides (es decir, los que contienen 0.8-1.7% de C) son duros pero frágiles, debido a la presencia de cementita secundaria y su aplicación es limitada. La mayoría de los aceros son hipoeutectoides (o sea que contiene menos de 0.8% de C) y su estructura consiste en una solución sólida  $\alpha$  y una perlita eutectoide.

1. En un enfriamiento lento (figura 20, línea 1) la curva de transformación se cruza a una temperatura elevada. La perlita se nuclea en las fronteras de grano de la austenita; la difusión es rápida, y la estructura consistirá en laminillas gruesas de cementita en una matriz de ferrita. Esta perlita laminar gruesa es relativamente suave pero no dúctil. El tratamiento térmico que consiste en austenización seguida por enfriamiento lento al aire se llama recocido de normalización. La cementita puede ser cambiada a una forma esferoidal manteniendo el acero un poco por debajo de la temperatura eutectoide, o calentándola y enfriándola en forma repetida un poco por arriba y por debajo de dicha temperatura. Los aceros esferoidizados tienen una resistencia menor pero una ductilidad muchos mayor.
2. En un enfriamiento más rápido (figura 20, línea 2), la curva se cruza a temperaturas menores. La difusión es más lenta y la estructura consistirá en perlita mucho más fina pero aún laminar, de mayor resistencia.
3. Si el acero se enfría muy rápidamente y después se mantiene a una temperatura intermedia, digamos alrededor de 300°C, la nariz de la curva de transformación no se cruza y la transformación ocurre isotérmicamente, a lo largo de la línea 3 en la figura 20, con la formación de bainita.

**Figura 20. Diagrama de las durezas en los enfriamientos de los aceros.**



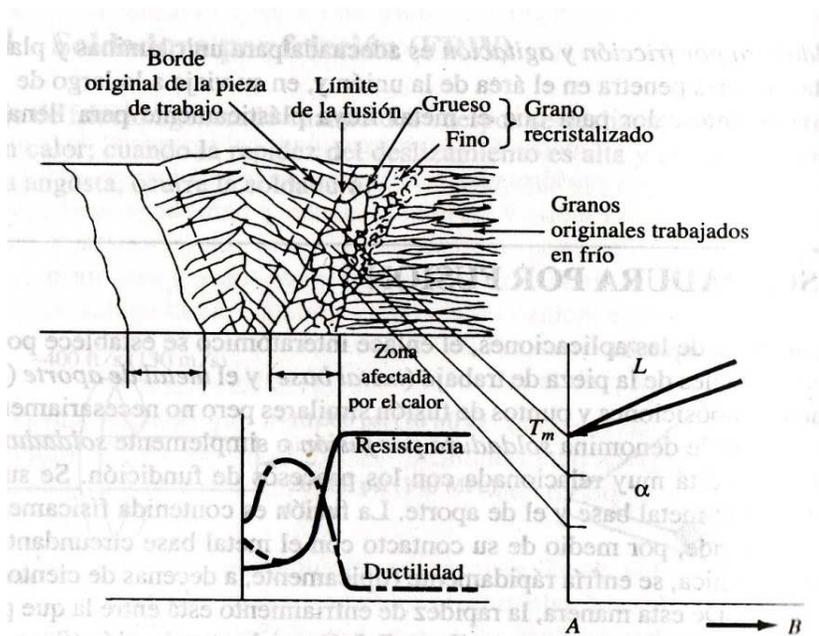
Fuente: Schey John A. **Procesos de manufactura**. Pág. 180.

### 5.5 Materiales de una fase

Una sección a través de la unión en un metal puro (figura 21), como aluminio o cobre, soldada con una varilla de composición idéntica, demuestra que el calor aplicado no sólo ha fundido la varilla de soldadura sino también un tanto del material base para formar el cordón de soldadura (o simplemente la soldadura). El material base adyacente al límite de la fusión se expuso a altas temperaturas y las propiedades y la estructura son cambiadas dentro de esta zona afectada por el calor.

Si el material de la pieza de trabajo se trabajó en frío originalmente y por lo tanto era de grano altamente alargado, la zona afectada por el calor presentará recristalización. En cualquier caso, una estructura de grano grueso de menor resistencia existe en el límite de la fusión. La solidificación comienza en este límite a través del crecimiento epitaxial, es decir, por la deposición de átomos en la misma orientación cristalina que la de los cristales superficiales (del griego epi = en, teinen = arreglados y eje). Esto conduce al desarrollo de granos columnares gruesos en el material de la soldadura.

**Figura 21. La fusión de un metal puro o de una aleación de solución sólida.**

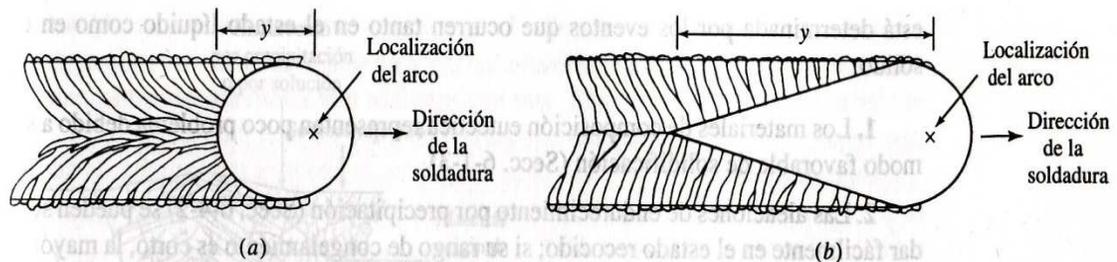


Fuente: Schey John A. **Procesos de manufactura**. Pág. 784.

Visto de arriba, hay un charco de soldadura en el punto de entrada máxima de calor (figura 22). Cuando se hace una soldadura en línea, la fuente de calor se mueve a una velocidad de viaje fija. En un metal puro o en una aleación diluida, a baja velocidad del viaje, los granos que se solidifican empiezan a

seguir la fuente de calor, y el centro del cordón de soldadura a menudo tiene granos independientemente nucleados, en especial en presencia de agentes de nucleación (figura 22a). A altas velocidades de viaje, el charco de soldadura se torna alargado y la solidificación comienza casi perpendicular al límite de la fusión hacia el centro (figura 22b). Si hay constituyentes de bajo punto de fusión, se segregan en los límites de los granos fundidos y puede presentarse el agrietamiento en caliente.

**Figura 22. Charco de soldadura en el punto de entrada máxima de calor.**



Fuente: Schey John A. **Procesos de manufactura**. Pág. 785.

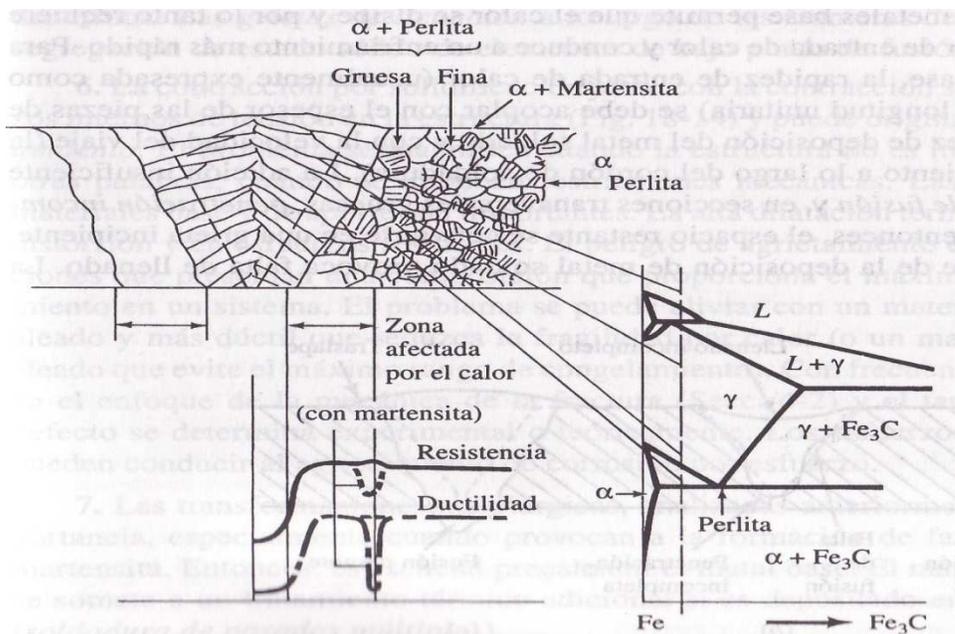
## 5.6 Materiales de dos fases

La mayoría de las aleaciones técnicamente importantes tiene una estructura de dos fases o de fases múltiples, y su adecuación para la soldadura está determinada por los eventos que ocurren tanto en el estado líquido como en el sólido.

Las transformaciones de fase de estado sólido originan cambios complejos. Tomando como ejemplo un acero al medio carbono en estado recocido (figura 23), el metal base tiene una microestructura consistente en colonias de perlita que alternan con granos de ferrita. La soldadura en sí tiene la estructura usual gruesa y fundida. Próxima a ésta, el material se calienta profundamente dentro

del rango de temperatura austenítica y luego se enfría, provocando en granos gruesos. Al disminuir la temperatura, los granos de la austenita se vuelven más finos; así, normalmente se encuentran ferrita y perlita de grano más fino en la estructura transformada, aunque la alta rapidez de enfriamiento puede producir bainita o martensita. El borde de la zona afectada por el calor es calentado un poco por encima de la temperatura eutectoide. La elevada rapidez de reducción de la ductilidad. Con mayor contenido de carbono (por encima de aproximadamente 0.5%), inevitablemente se formará la martensita, como también ocurre en los aceros aleados.

**Figura 23. Acero al medio carbono en estado recocido.**



Fuente: Schey John A. **Procesos de manufactura**. Pág. 787.

## 5.7 Materiales Disímiles

La situación se complica aún más cuando se emplean dos o más materiales disímiles, ya sea en la pieza de trabajo o en el material de aporte. Con

frecuencia éste es el caso, debido a que los materiales de aporte desiguales facilitan la obtención de soldaduras libres de grietas. La historia de calentamiento y enfriamiento se complica debido a los efectos de la aleación, mientras que los eventos en la zona de soldadura se determinan por medio de los diagramas de equilibrio relacionados con ambos materiales.

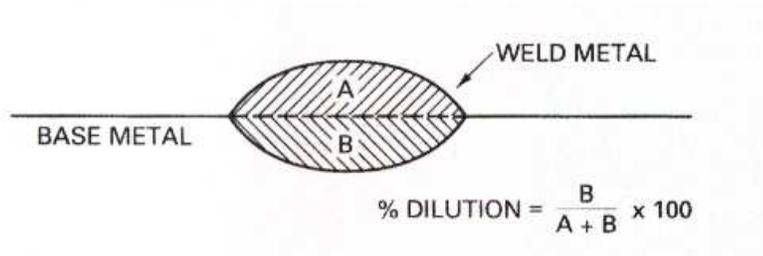
Como se podría esperar, las aleaciones que forman soluciones sólidas presentan pocos problemas. Las eutécticas tienden a ser más frágiles, aunque son favorables cuando ambas fases del eutéctico son dúctiles. Los compuestos intermetálicos invariablemente fragilizan la estructura hasta inutilizarla; así por ejemplo, el cobre no se puede unir con el hierro.

En muchos casos, la diferencia entre los puntos de fusión es muy amplia, de manera que el metal base no se funde, por lo que se acostumbra clasificar al proceso como soldadura fuerte o suave.

## **5.8 Dilución**

La dilución es un parámetro que nos permite cuantificar el porcentaje de fusión, la superficie que se consigue en el proceso al depositar material de aporte sobre el material base da como resultado ciertas propiedades o dimensiones deseadas. Probablemente la única gran diferencia entre la soldadura de una junta y el material depositado es concerniente a la dilución. La figura 24 muestra la dilución como una función de la cantidad de metal base fundido B y la superficie del metal base adherido A. Entonces podemos concluir que las propiedades de la superficie del material son fuertemente influenciadas por la dilución.

**Figura 24. Dilución en A y B**



Fuente: [www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/.../8/Cap.2.3.4%20-%20Dilución.doc](http://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/.../8/Cap.2.3.4%20-%20Dilución.doc)

Es importante conocer el efecto de cada electrodo a utilizar, así como también las variables de los parámetros de soldadura que afectan a la dilución.

### **5.9 Transformaciones en la fase sólida durante el calentamiento**

Durante el proceso de soldadura existen transformaciones en fase sólida que sufre el metal base y el metal fundido por pasadas múltiples, durante el calentamiento debido al ciclo térmico del proceso de soldadura.

Aunque muchas veces no se destaca, la fase de calentamiento es tan importante como la del enfriamiento de la zona fundida constituida por el cordón de soldadura, la región adyacente y el metal base.

El ciclo térmico de la soldadura establece en cada punto del metal base un estado térmico estacionario, definido por la máxima temperatura alcanzada,  $t_m$ , y la velocidad de enfriamiento,  $V_m$ , que determinan los siguientes parámetros.

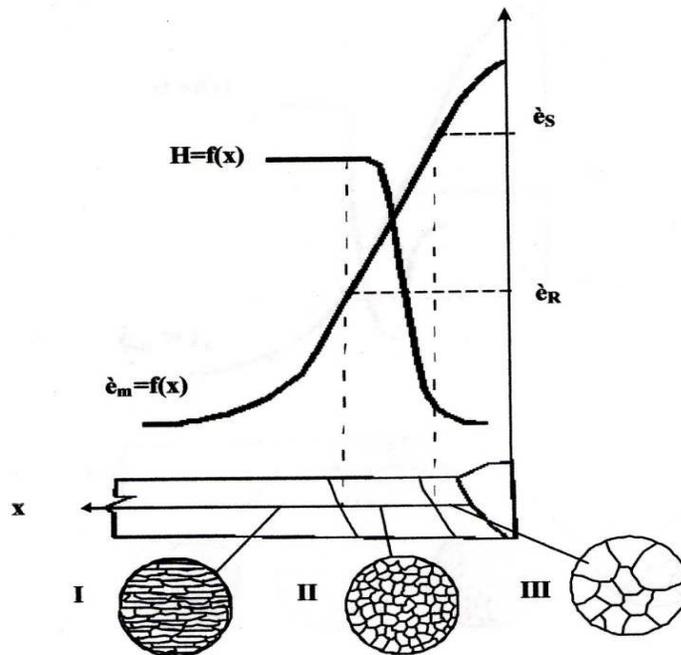
### 5.9.1 Fenómeno de recristalización

Cuando se realiza un proceso de soldadura en aleaciones que han sido trabajadas en frío, el calentamiento del ciclo térmico conduce a una recristalización del metal base, debido a que sufre un tratamiento térmico localizado. La importancia de estas transformaciones se debe al ciclo térmico y a la naturaleza de la aleación.

Las aleaciones que han sido deformadas en frío, se encuentran en un estado inestable, caracterizado por un incremento en su resistencia a la tracción y su límite elástico. Este estado tiende a cambiar cuando se calienta por encima de su temperatura de recristalización, dando lugar a las siguientes etapas:

- **Recristalización primaria:** se lleva a cabo a la temperatura  $\bar{\epsilon}_R$ , en donde se realiza la reorganización de la estructura cristalina de la aleación.
- **Recristalización secundaria:** es la que ocurre cuando la aleación es sometida a temperaturas mayores ( $\bar{\epsilon}_S$ ) que la recristalización primaria, la cual genera un gran crecimiento de grano dando lugar a una disminución en la resistencia a la tracción y dureza de la aleación. La figura 25 presenta la variación de la dureza en una unión soldada de una aleación deformada por trabajo mecánico en función a la temperatura máxima alcanzada durante el enfriamiento.

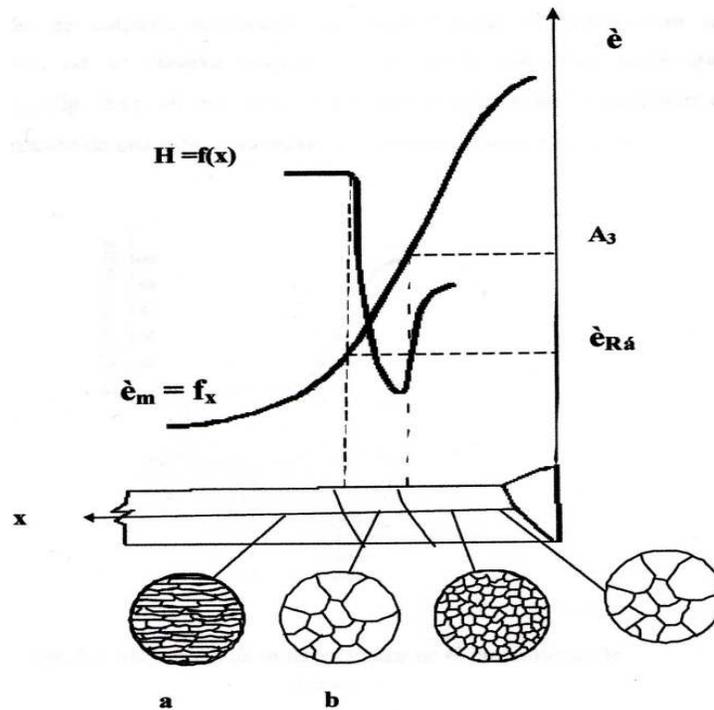
**Figura 25. Variación de la dureza en función de la temperatura máxima alcanzada en el calentamiento.**



Fuente: [http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/Tesis/Ingenie/calderon\\_cj/Cap3.pdf](http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/Tesis/Ingenie/calderon_cj/Cap3.pdf)

En el proceso de soldadura de aceros al carbono deformados por trabajo mecánico, la disminución de su dureza por efecto de la recristalización se observará principalmente en la región calentada entre la temperatura de recristalización de la ferrita  $\epsilon_{R\alpha}$ , y el punto de transformación alotrópica  $A_3$ , la transformación  $\alpha \rightarrow \gamma$  produce el efecto de un tratamiento térmico de normalizado, es decir la disminución del tamaño de grano y un ligero endurecimiento, como se muestra en la figura 26.

**Figura 26. Disminución del tamaño de grano debido a la temperatura de recristalización de la ferrita ( $\dot{\epsilon}_{Ra}$ ).**



Fuente: [http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/Tesis/Ingenie/calderon\\_cj/Cap3.pdf](http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/Tesis/Ingenie/calderon_cj/Cap3.pdf)

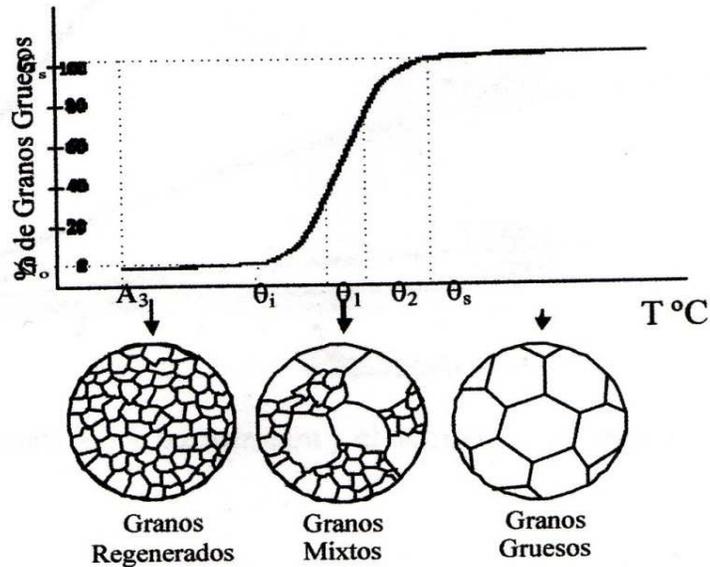
### 5.9.2 Crecimiento de grano

El efecto del calentamiento tiene influencias inmediatas durante el ciclo térmico del proceso de soldadura, generalmente aumenta el tamaño de grano de la zona afectada por el calor (ZAC) y también en la zona fundida. Este crecimiento de grano tiene como consecuencia alterar las propiedades mecánicas finales.

Cuando se calienta lentamente una cero desde la temperatura ambiente hasta la temperatura  $A_3$ , no se observa ningún cambio en la estructura hasta que se alcanza una temperatura  $\dot{\epsilon}_i$ , (Figura 27); en ese instante los granos

comienzan a aumentar de tamaño, dando lugar a la formación de una estructura mixta con granos grandes y pequeños.

**Figura 27. Influencia de la temperatura en el crecimiento de grano.**



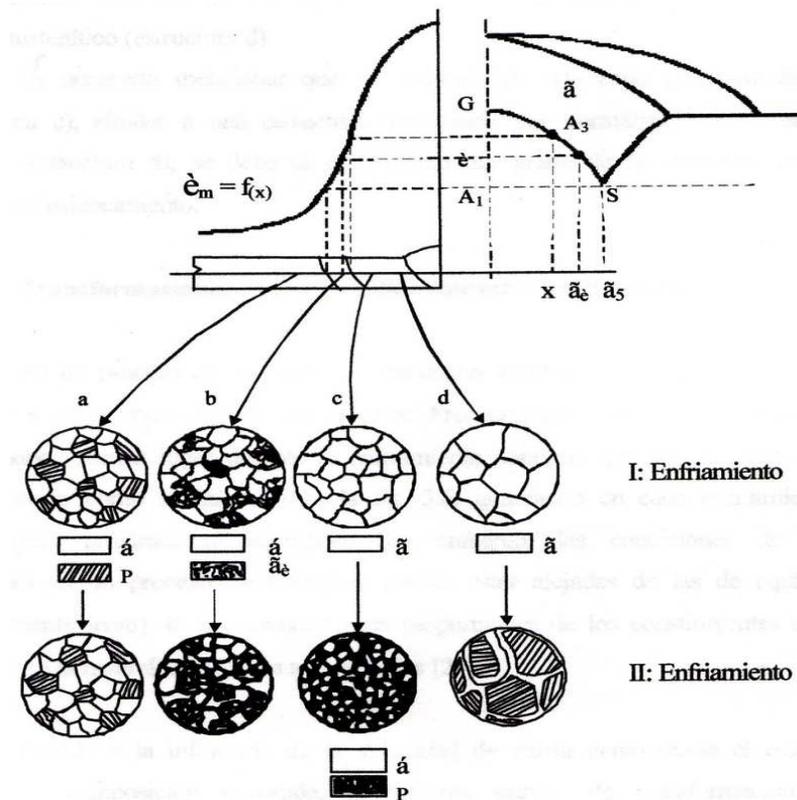
Fuente: [http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/Tesis/Ingenie/calderon\\_cj/Cap3.pdf](http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/Tesis/Ingenie/calderon_cj/Cap3.pdf)

Desde este momento, al aumentar la temperatura, los granos absorben a los pequeños y la proporción de los grandes aumenta. La temperatura  $\theta_s$ , a la cual se obtiene un 100% de granos gruesos, es la temperatura de sobrecalentamiento.

### 5.9.3 Transformaciones alotrópicas

Las velocidades de calentamiento son afectadas por las temperaturas de transformación en estado sólido, en los procesos de soldadura por arco están entre  $200 - 300 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{seg}}$ . En los aceros la transformación  $\alpha \rightarrow \gamma$ , tiene lugar a temperaturas muy superiores a las que indica el diagrama Fe - C y estas son mayores en la medida que el tiempo de calentamiento es menor como se muestra en la figura 28.

**Figura 28. Estructuras generadas en el calentamiento del ciclo térmico del proceso de soldadura de un acero al carbono.**



Fuente: [http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/Tesis/Ingenie/calderon\\_cj/Cap3.pdf](http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/Tesis/Ingenie/calderon_cj/Cap3.pdf)

Haciendo el análisis de un acero al carbono con estructura ferrita y perlita, su microestructura no se alteraría si la temperatura máxima de calentamiento no pasa del punto  $A_1$ , que corresponde a la transformación perlítica (estructura a). Cuando la temperatura máxima está entre  $A_1$  y  $A_3$ , la perlita se transforma en austenita con un menor contenido de carbono a medida que la temperatura alcanzada sea mayor. A una temperatura intermedia  $\theta$ , coexiste austenita con un contenido de carbono igual a  $\gamma_\theta$  y ferrita (estructura b). Cuando se alcanza la temperatura  $A_3$ , la transformación austenítica es total (estructura c) y todo calentamiento adicional ya no supone un cambio estructural, sino solo un crecimiento del grano austenítico (estructura d).

Es necesario mencionar que la aparición de una zona de grano fino (a partir de la estructura c), similar a una estructura regenerada por normalizado y de otra zona de grano grueso (estructura d), se debe al crecimiento del grano de la austenita que se llevó a cabo durante el calentamiento.

### **5.10 Transformaciones en la fase sólida durante el enfriamiento**

En un proceso de soldadura, se producen transformaciones en estado sólido en la zona fundida y en la zona afectada por el calor. Frecuentemente estas transformaciones en un acero al carbono, tienen lugar durante el enfriamiento continuo que se producen en un intervalo de temperaturas como se ha visto en la figura 28, generando en cada enfriamiento estructuras en condiciones próximas al equilibrio. Sin embargo, las condiciones de los enfriamientos normales en un proceso de soldadura suelen estar alejadas de las de equilibrio (enfriamiento infinitamente lento), lo que afecta en las proporciones de los constituyentes del acero (ferrita y perlita) y a la naturaleza de fases metaestables.

Debido a la influencia de la velocidad de enfriamiento desde el estado austenítico del acero de composición conocida, se utilizan curvas de transformación en enfriamiento continuo (TEC), que expresen los productos de transformación obtenidos en enfriamientos realizados a diferentes velocidades, junto con los tiempos de inicio y fin de aquellas transformaciones.

Estos diagramas, son de gran utilidad a la hora de realizar tratamientos térmicos de aceros pero, tienen una aplicación restringida en los procesos de soldadura, debido a las altas temperaturas de austenización producidas y los tiempos cortos de permanencia a esas temperaturas.

Durante un proceso de soldadura, la velocidad de enfriamiento de la austenita ocasiona las siguientes transformaciones.

### **5.10.1 Transformación perlítica**

En la ZAC de grano fino, la transformación de la austenita en ferrita y perlita (si la velocidad de enfriamiento es suficientemente lenta) ocurre por nucleación y crecimiento, resultando una estructura final más fina a la del metal base y cuando la velocidad de enfriamiento en un proceso de soldadura es rápida, la distancia interlaminar de la perlita es menor.

En la región sobrecalentada de grano grueso, la ferrita proeutectoide se nuclea en las juntas del grano austenítico y forma también agujas dirigidas hacia el interior de los granos grandes existentes (estructura de *Widmanstaetten*). Estructuras similares aparecerán también en el enfriamiento de metal fundido si, su composición química coincide con la del acero base.

Las propiedades mecánicas de la ZAC, varían con respecto al acero base y se notará un ligero aumento de la dureza, límite elástico y resistencia a la tracción, mientras que la estructura basta de la zona recalentada (estructura de *Widmanstaetten*) suponen una disminución de la resiliencia y como consecuencia un aumento en la fragilización, que en algunos casos se recomienda un posterior tratamiento térmico con la finalidad de regenerar el grano.

### 5.10.2 Transformación martensítica

En los aceros con %C < 0.4, la transformación de la martensita está gobernada por su templabilidad y en la soldadura: si la velocidad del proceso de soldadura es  $18 \frac{\text{pulg}}{\text{min}}$  influirá directamente sobre la velocidad de enfriamiento formando martensita tan dura que podría generar fragilidad.

La influencia de los elementos de aleación se puede saber a través del carbono equivalente (CE) del cual existen muchas fórmulas, una muy común es:

$$CE = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{1}{5}(\%Cr + \%Mo + \%V) + \frac{1}{15}(\%Ni + \%Cu)$$

La martensita formada con contenidos altos de carbono, tiene mayor dureza y mayor tendencia a fisurarse en frío y es también un constituyente metaestable que se transforma en ferrita y cementita globular, o bien en austenita si se alcanzan temperaturas más altas.

### 5.11 Continuidad de la soldadura con el metal base

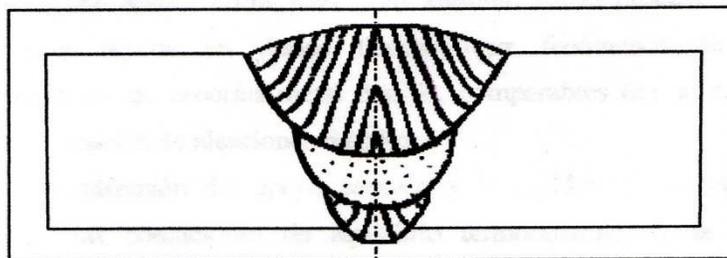
De todas las definiciones concernientes a la tecnología de la soldadura, la más apropiada desde el punto de vista de la metalurgia es la que destaca la noción de continuidad. De acuerdo a esta definición, la soldadura es el proceso mediante el cual establece una continuidad entre las piezas a unir.

La continuidad entre dos piezas metálicas a escala macroscópica implica la ausencia de cualquier elemento o partícula no metálica, entre las superficies unidas.

Un examen minucioso a nivel microscópico nos aclara mejor el concepto de continuidad metálica que establece el proceso de soldadura:

- Antes de realizar la soldadura, los átomos que constituyen cada parte, se agrupan formando redes cristalinas diferentes.
- Después de la soldadura, los dos conjuntos atómicos se unen en una sola red cristalina figura 29.

**Figura 29. Fenómeno de epitaxia**

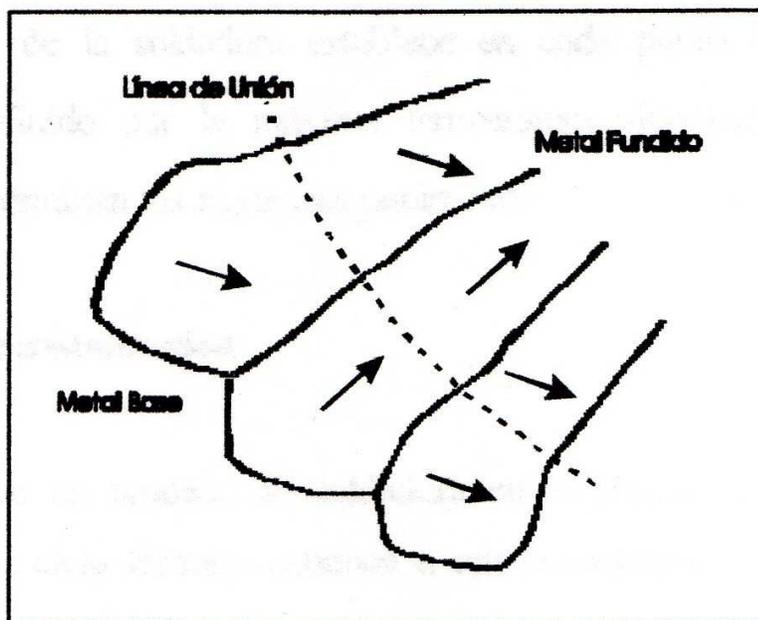


Fuente: [http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/Tesis/Ingenie/calderon\\_cj/Cap3.pdf](http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/Tesis/Ingenie/calderon_cj/Cap3.pdf)

- En la mayoría de los procesos de soldadura, la mencionada continuidad metálica se obtiene como resultado de la solidificación de una fase líquida sobre otra sólida. En estos casos, la continuidad metálica queda

asegurada por el fenómeno de la epitaxia, según el cual la fase líquida solidifica y su estructura cristalina coincide con la del metal base, que actúa como soporte. De este modo las estructuras cristalinas (granos y bordes de grano) luego del proceso de soldadura son comunes a ambos lados de la línea de unión (figura 30).

**Figura 30.** La estructura de la soldadura tiene la misma orientación que la del metal base.



Fuente: [http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/Tesis/Ingenie/calderon\\_cj/Cap3.pdf](http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/Tesis/Ingenie/calderon_cj/Cap3.pdf)

## **6. ANÁLISIS METALOGRÁFICO DE LA SOLDADURA DE LOS ACEROS AISI 1018 Y AISI 1045**

### **6.1 Proceso de soldadura con material de aporte**

Los aparatos de arco eléctrico permiten la soldadura eléctrica. La mayoría se alimentan de una red eléctrica (220 V), y están equipados de un hilo de tres hebras y de una simple toma de tierra. Los puestos más potentes, que ofrecen una intensidad superior a 140 A, son alimentados en corriente trifásica. Dos hilos salen del puesto de soldadura; uno estará unido al electrodo, el otro a la pinza de masa, que estará unida, al mismo tiempo, a la pieza metálica a soldar.

El aporte de soldadura en los aceros tiene por objeto analizar los cambios que pueda sufrir el material soldado así como el tipo de enfriamiento utilizado después de aplicar la soldadura.

La mayoría de las soldaduras se ejecutan con electrodos recubiertos al producirse el arco, se forma un baño de metal líquido. El calor intenso generado también funde al electrodo, el que se mezcla con el baño de metal base. El recubrimiento, que se funde a temperatura más elevada que el núcleo, forma con las impurezas una escoria que solidifica sobre el cordón constituyendo un recubrimiento protector sobre la soldadura terminada. También hay un desprendimiento gaseoso que forma una atmósfera que protege al metal fundido del nitrógeno y el oxígeno existentes en la atmósfera.

En general la longitud del arco debe ser igual al diámetro del electrodo. Si el arco es muy largo, el metal forma glóbulos grandes en forma irregular porque el arco es errático. También, la fusión del metal base es defectuosa. Si el arco es muy corto, el electrodo se adhiere al metal base. También, si el arco no es suficientemente caliente o si es muy corto, el metal base no funde suficientemente y el cordón reposa sobre la superficie de la pieza. En este caso la fusión es pobre y se producen agujeros por acción del gas y de la escoria.

### **6.1.1 Elementos de trabajo**

- a) Soldadora *Lincoln Electric* (transformadora-Rectificadora) (véase figura 31 de los anexos).
- b) Electrodo E-6013 y E-7018 (véase figura 32 de los anexos).
- c) Cepillo metálico
- d) Careta para Soldar (véase figura 33 de los anexos).
- e) Probetas de acero (véase figura 34 de los anexos).

- AISI 1018

- AISI 1045

### **6.1.2 Técnica operatoria**

Antes que nada se deben de preparar las probetas a soldar, luego mediante una prensa colocar las probetas sujetándolas de manera tal que no tiendan a moverse, tener puesto la careta y materiales de protección durante el proceso de soldado; seleccionar el electrodo a utilizar y proceder a soldar.

Tener cubierto por lo menos un buen tramo de material de aporte sobre el acero seleccionado; tomando en cuenta que al parar el proceso de soldado se debe tender a retirar la escoria producida por el electrodo. Además de cepillar la superficie mediante el cepillo metálico para poder seguir con el proceso de soldado (véase figura 35 y 36 de los anexos).

### **6.2 Torneado y lijado de probetas**

La función principal del torno es maquinar piezas para poder darles un mejor aspecto y manejo.

Estas máquinas-herramienta operan haciendo girar la pieza a mecanizar mientras una o varias herramientas de corte son empujadas en un movimiento regulado de avance contra la superficie de la pieza, cortando la viruta de acuerdo con las condiciones tecnológicas de mecanizado adecuadas.

### **6.2.1 Elementos de trabajo**

- a) Torno (véase figura 37 de los anexos).
- b) Probeta con soldadura (véase figura 38 y 39).
  - AISI 1018 E-6013
  - AISI 1018 E-7018
  - AISI 1045 E-6013
  - AISI 1045 E-7018
- c) Plancha de vidrio de 20 X 40 cm aproximadamente. (véase figura 40 de los anexos).
- d) Papeles abrasivos “3M” o similar números (80, 150, 180, 220, 320, 380, 400, 500 y 600) (véase figura 40 de los anexos).
- e) Repasador, algodón y alcohol.

### **6.2.2 Técnica operatoria**

Al operar las diversas máquinas para maquinado de piezas se deben de tener en cuenta siempre los materiales de protección que deben de utilizarse, mediante los procesos de torneado y cepillado de las probetas de acero con material de aporte soldado se refrentó la superficie plana de cada una de las

probetas, así como también el cepillado de las probetas longitudinalmente hasta poder definir las áreas del acero original y el material de aporte en este caso de los electrodos E-6013 y E-7018 (véase figura 38 y 39).

Luego del proceso de maquinado de las piezas se utilizaron diversos papeles abrasivos para pulir las probetas.

Apoyar sobre la mesa de trabajo la plancha de vidrio y sobre ésta el papel abrasivo de grano más grueso. Tomar firmemente la probeta y apoyar la cara elegida sobre la superficie de papel abrasivo. Frotarla sobre éste arrastrándola longitudinalmente en un solo sentido, tanto en la parte plana como en la longitudinal, ejerciendo una presión suficiente como para eliminar las marcas originales, cuidando de conservar la cara devastada, enjuagar ésta con alcohol y secarla con algodón.

Repetir este proceso de desbaste durante aproximadamente unos 10 minutos con cada uno de los papeles abrasivos hasta llegar al más fino.

### **6.3 Ataque químico**

Mediante la observación microscópica de las probetas previamente pulidas se permite reconocer la integridad y la presencia de inclusiones no metálicas dentro de la estructura cristalina macroscópica de la misma.

La estructura metalográfica completa sólo puede desarrollarse después de un ataque mediante un agente químico o electrolítico con un reactivo adecuado. Mediante el ataque es posible poner de manifiesto la forma, el tamaño y el

claroscuro o la coloración de cada uno de los constituyentes metalográficos contenidos en la estructura cristalina macroscópica observada.

El grado de ataque para una probeta dada es función de la composición y temperatura del reactivo y del tiempo de ataque.

### **6.3.1 Elementos de trabajo**

- a) Plancha de vidrio de 20 X 40 cm aproximadamente. (véase figura 40 de los anexos).
- b) Papeles abrasivos “3M” o similar números (80, 150, 180, 220, 320, 380, 400, 500 y 600) (véase figura 40 de los anexos).
- c) Reactivo: Solución alcohólica de ácido nítrico al 5 % en volumen (Nital).
- d) Microscopio metalográfico provisto de ocular 10x. (véase figura 41).
- e) Probetas de acero (véase figura 42 y 43).
  - AISI 1018 E-6013
  - AISI 1018 E-7018
  - AISI 1045 E-6013
  - AISI 1045 E-7018

### **6.3.2 Técnica operatoria**

Desengrasar con alcohol la cara a atacar de las probetas previamente pulidas y secarlas. Tomar las probetas y sumergirlas, con la superficie pulida hacia abajo, en el reactivo de ataque contenido en el cristalizador. Mantener la probeta durante 1 a 2 minutos luego extraerlas, lavarlas con alcohol, secarlas y observarlas al microscopio. Registrar el campo observado a distintos aumentos.

### **6.4 Observación microscópica de estructuras**

Mediante el proceso de micrografía se trató de definir el tamaño y forma de los granos de la matriz metálica así como también la composición, el grado de fraccionamiento y la distribución de los granos posterior al proceso de solidificación. Así mismo se tuvo presente los cambios sufridos luego de la aplicación del reactivo químico y a través del mismo poder observar la estructura en el microscopio metalográfico.

#### **6.4.1 Elementos de trabajo**

- Microscopio metalográfico (véase figura 41).
- Probetas atacadas químicamente (véase figura 44).
- Diagrama Hierro Carbono con estructuras (véase figura 45).

a) Microfotografías de los aceros analizados.

- Fotomicrografía de acero AISI 1018 (véase figura 46 y 47).
- Fotomicrografía de acero AISI 1045 (véase figura 48).
- Fotomicrografía de acero AISI 1018, E-6013 (véase figura 49 y 50).
- Fotomicrografía de acero AISI 1018, E-7018 (véase figura 51 y 52).
- Fotomicrografía de acero AISI 1045, E-6013 (véase figura 53 y 54).
- Fotomicrografía de acero AISI 1045, E7018 (véase figura 55 y 56).

#### **6.4.2 Técnica operatoria**

En el proceso de análisis de los diferentes aceros utilizados se trató de definir el comportamiento que tuvieron cada uno de ellos al aplicarles soldadura mediante soldadura SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*) o de arco protegido, así mismo develar la estructura que cada uno de los aceros posee sin soldadura y posteriormente ya con soldadura. En cada una de las fotomicrografías tomadas en los aceros podemos observar estructuras como perlita para aceros de bajo carbono como lo fue el acero AISI 1018, que de

acuerdo al diagrama de hierro carbono posee una estructura ferrita- perlita pero en su estructura mayor posee un porcentaje mucho mayor de ferrita.

Mientras que para aceros de medio-alto carbono como lo fue el acero AISI 1045 posee una estructura igualmente que la del acero AISI 1018 ferrita-perlita pero en su estructura mayor posee un porcentaje mucho mayor de perlita.

Se observó microscópicamente a diversos aumentos mediante el microscopio metalográfico con ocular de 10x y lentes con aumentos de 10x, 20x, 50, y 100x aplicados a diferentes áreas de las probetas utilizadas con y sin soldadura.



## CONCLUSIONES

- 1) La calidad de una soldadura también depende de la combinación de los aceros usados para el material base y el material de aporte. No todos los aceros son adecuados para la soldadura, y no todos los materiales de aporte trabajan bien con los diferentes aceros. Para los aceros utilizados en el análisis podemos describir que las estructuras metalográficas para los aceros AISI 1018 establecen una estructura ferrita-perlita según el diagrama hierro-carbono; y que en un porcentaje mucho mayor posee ferrita. Mientras que para un acero AISI 1045 su estructura es también ferrita-perlita pero en este caso posee un porcentaje mucho mayor de perlita.

Las propiedades y características de cada uno de los aceros utilizados cambiaron de acuerdo a que la temperatura durante la soldadura y agregado a esto la rapidez con que se pudo enfriar dicha soldadura pudo producir una estructura que conocemos como martensita, la cual no es beneficiosa por la poca utilidad dentro de la industria; para nuestro análisis la temperatura a la que se enfrió la soldadura es a temperatura ambiente estamos hablando de aproximadamente 20-25 °C. Como la temperatura de la zona cercana a la soldadura varía de un lugar a otro, el metal de la zona afectada por el calor (ZAC) también varía en cuanto a su estructura y sus diferentes propiedades. En el área sobrecalentada en la que el grano es grueso, el metal perdió algo de su ductilidad, y especialmente su resistencia.

Podemos mencionar también que debido al incremento de la dureza, debido al cambio de la temperatura de enfriamiento de la soldadura, los aceros generalmente aumentan su fragilidad y reducen su ductilidad. Para que las propiedades o características de los aceros AISI 1018 y AISI 1045 utilizando electrodos revestidos como lo fueron los E-6013 y E-7018 se debe de aplicar un precalentamiento y un postcalentamiento para así poder reducir los efectos de la temperatura y del enfriamiento en pocas palabras reducir la formación de martensita.

- 2) Es de suma importancia el tratamiento que se le debe de hacer al metal base antes de poder someterlo a un proceso de soldado. Como lo son el tratamiento de deshidrogenado, el precalentamiento del metal base así como también un postcalentamiento luego de aplicada la soldadura para reducir los esfuerzos residuales en el material; controlar la velocidad de enfriamiento para evitar así estructuras metalográficas no deseadas, conocer los materiales de aporte que se adecuen a los diferentes aceros, su composición química y efectos del material de aporte en los metales base respectivos.
- 3) Es de suma importancia analizar los aspectos metalúrgicos en la soldadura e interesar a cada uno de los estudiantes en la aplicación del mismo en la industria, para así poder mejorar la eficiencia de ciertas piezas utilizadas en maquinaria u otras aplicaciones.
- 4) Mediante este análisis de soldadura en aceros de bajo-medio carbono y alto carbono se dieron los fundamentos teóricos y prácticos para poder desarrollar una forma de aprendizaje en el laboratorio de metalografía; y así brindar un soporte investigativo en dicha aplicación.

## RECOMENDACIONES

- 1) Se debe de controlar la velocidad de enfriamiento para así evitar fisuras, así como evitar las corrientes de aire durante la ejecución de la soldadura.
- 2) Para realizar una buena soldadura en aceros de bajo-medio carbono o alto carbono se deben de hacer algunos tratamientos térmicos al acero, para utilizar de mejor forma sus propiedades; ya sean físicas, químicas o mecánicas y así evitar futuros daños a las estructuras o piezas soldadas.
- 3) Verificar las propiedades y características de los electrodos que serán utilizados para la aplicación de la soldadura en cada uno de los diferentes aceros, ya sean estos; aceros de bajo carbono, aceros de bajo-medio carbono, aceros de medio carbono o aceros de alto carbono.
- 4) Saber aplicar cada uno de los procedimientos a los diferentes aceros para poder verificar de mejor forma las estructuras metalográficas y así tener un mejor análisis de la porosidad, de la ductilidad o de la fragilidad de los mismos.

5) No forzar nunca los tornillos giratorios del microscopio (macrométrico, micrométrico, platina, revólver y condensador).

## BIBLIOGRAFÍA

1. Avner, Sydney H. **Introducción a la Metalurgia Física**. (2ª Edición, 1998).
2. Donald R Askeland. **La ciencia e ingeniería de los materiales**. (3ª Edición México: Editorial International Thompson, 1998).
3. Guy, Albert G. **Metalurgia Física para Ingenieros**. (única edición, 1965).
4. Leyensetter, A. **Tecnología de los oficios metalúrgicos**. (Editorial Reverté, s.a. Edición 38).
5. Schey, John A. **Procesos de Manufactura**. (Editorial McGraw-Hill, Tercera Edición).
6. Amstead, Oswald. **Procesos de Manufactura**. (Editorial Continental, Décima Octava reimpresión 2003).
7. Bresler, Boris. **Diseño de Estructuras de Acero**. (Editorial LIMUSA, Novena Edición).
8. [http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/Tesis/Ingenie/calderon\\_cj/Cap3.pdf](http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/Tesis/Ingenie/calderon_cj/Cap3.pdf). (2004)
9. [http://fain.uncoma.edu.ar/materias/Metalurgica\\_de\\_la\\_soldadura/Archivos%20de%20Metsold/Unidad%203-%20CICLO%20TERMICO%20EN%20SOLDADURAS-09.pdf](http://fain.uncoma.edu.ar/materias/Metalurgica_de_la_soldadura/Archivos%20de%20Metsold/Unidad%203-%20CICLO%20TERMICO%20EN%20SOLDADURAS-09.pdf) (2008)

10. [http://cad-cae.com/PDF\\_CAD\\_CAE/Soldadura.pdf](http://cad-cae.com/PDF_CAD_CAE/Soldadura.pdf) (2008)

11. <http://materias.fi.uba.ar/6713/CursoIASListook.pdf> (2004)

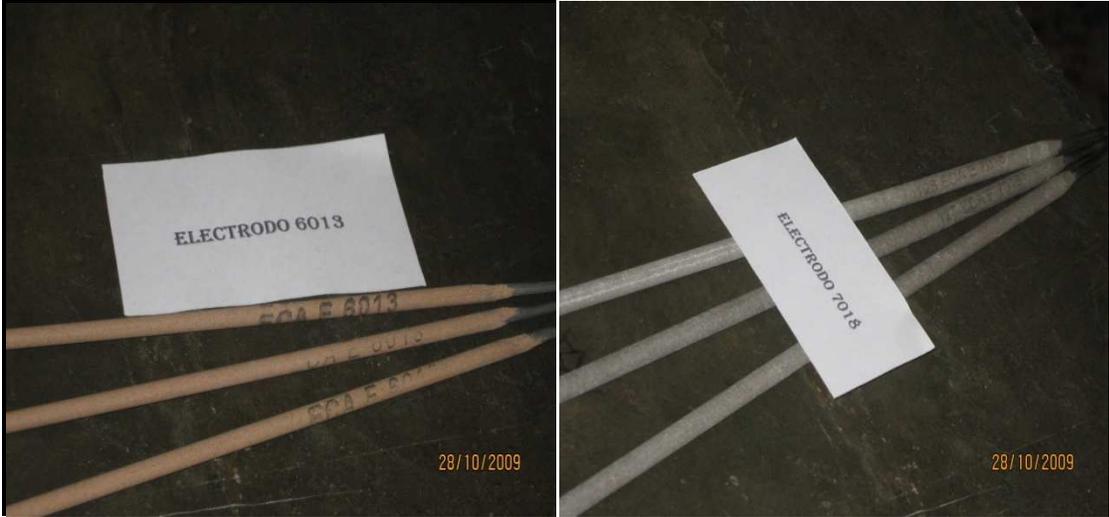
## ANEXOS

Figura 31. Soldadora *Lincoln Electric* (transformadora-rectificadora)



Fuente: Rivera, Gerson. **Laboratorio de Metalografía.** Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala

**Figura 32. Electrodo E-6013 y E-7018**



Fuente: Rivera, Gerson. **Laboratorio de Metalografía.** Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala

**Figura 33. Careta para soldar**



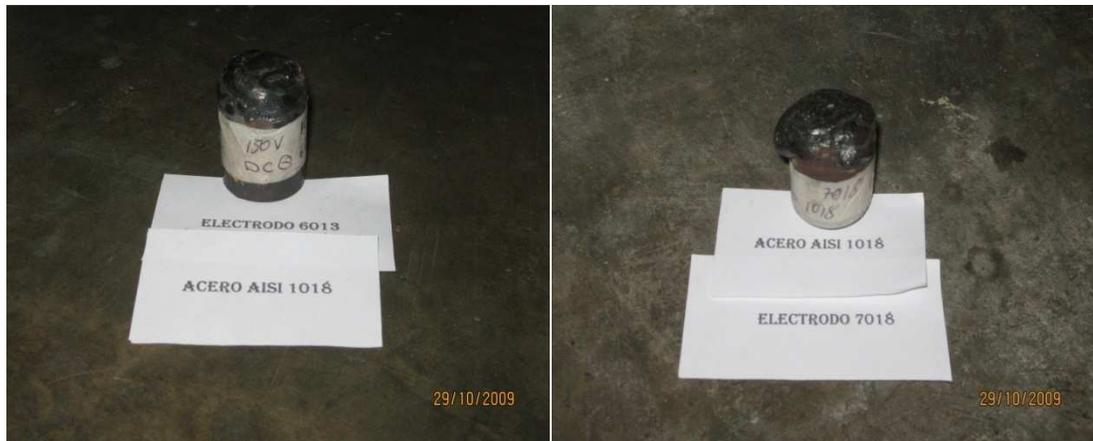
Fuente: Rivera, Gerson. **Laboratorio de Metalografía.** Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala

**Figura 34. Probetas de acero AISI 1018 y AISI 1045**



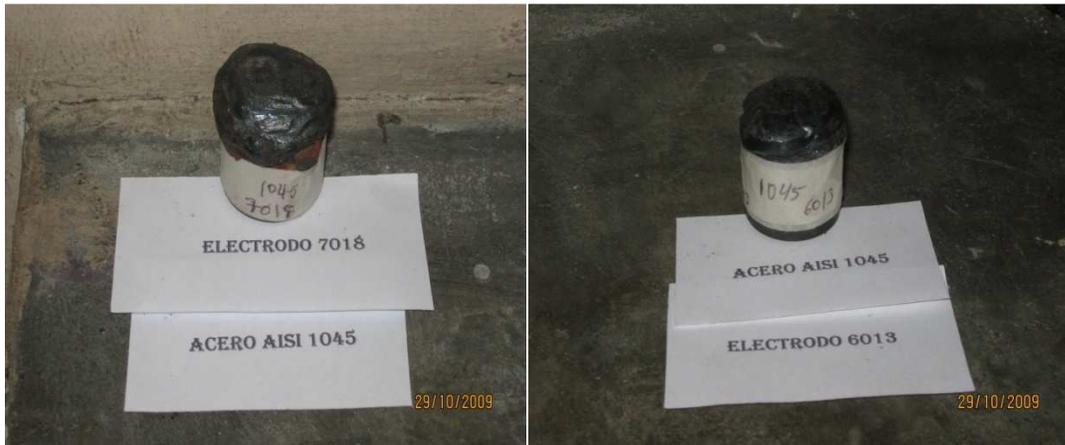
Fuente: Rivera, Gerson. **Laboratorio de Metalografía.** Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala

**Figura 35. Probetas con material soldado sin maquinar acero AISI 1018 E-6013 y AISI 1018 E-7018**



Fuente: Rivera, Gerson. **Laboratorio de Metalografía.** Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala

**Figura 36. Probetas con material soldado sin maquinar acero AISI 1045 E-6013 y AISI 1045 E-7018**



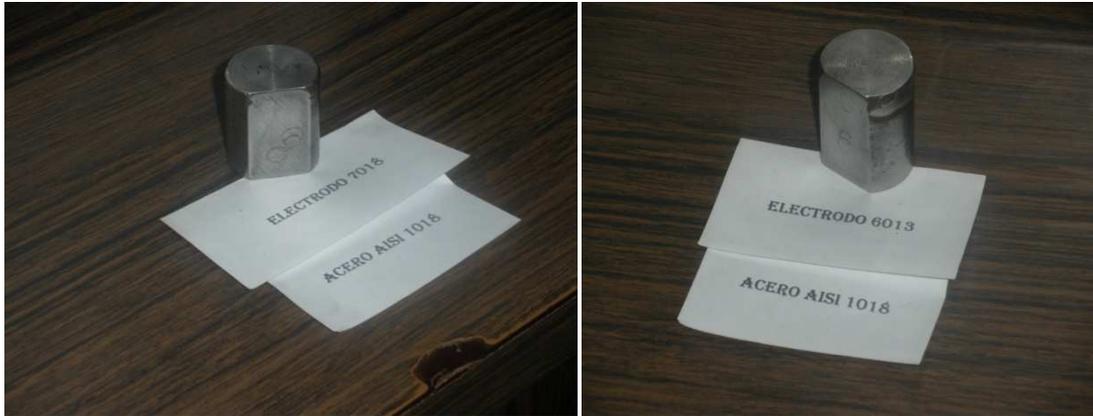
Fuente: Rivera, Gerson. **Laboratorio de Metalografía.** Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala

**Figura 37. Torno**



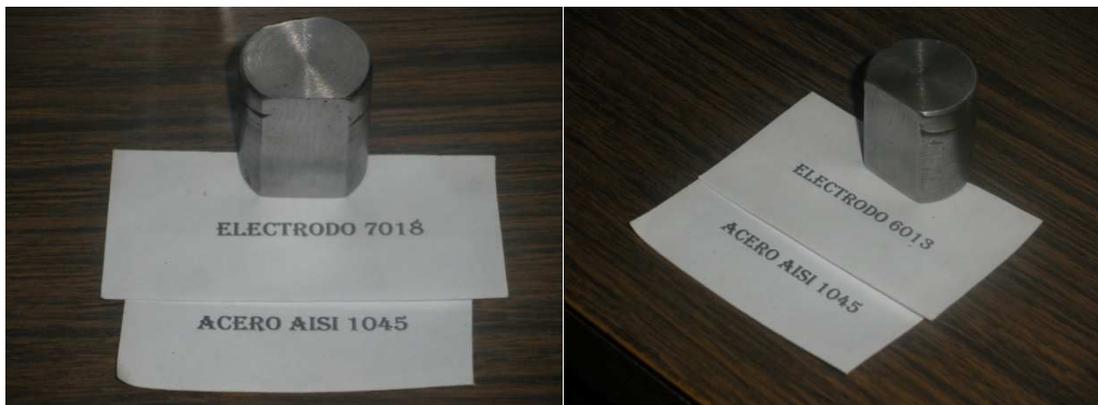
Fuente: Rivera, Gerson. **Laboratorio de Mecánica Industrial.** Instituto Nacional Técnico de Capacitación y Productividad INTECAP II

**Figura 38. Probetas con material soldado ya maquinado acero AISI 1018 E-6013 y AISI 1018 E-7018**



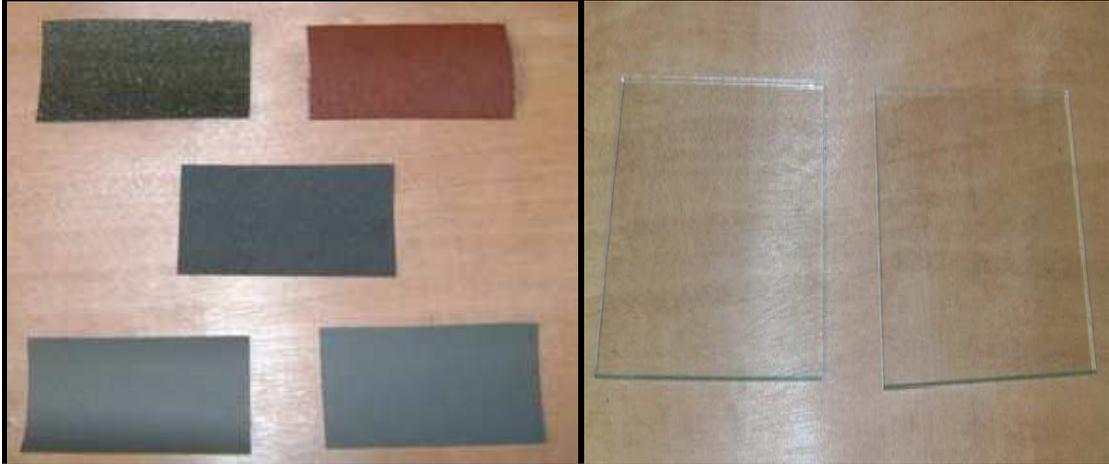
Fuente: Rivera, Gerson. **Laboratorio de Metalografía.** Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala

**Figura 39. Probetas con material soldado ya maquinado acero AISI 1045 E-6013 y AISI 1045 E-7018**



Fuente: Rivera, Gerson. **Laboratorio de Metalografía.** Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala

**Figura 40. Plancha de vidrio y papeles abrasivos**



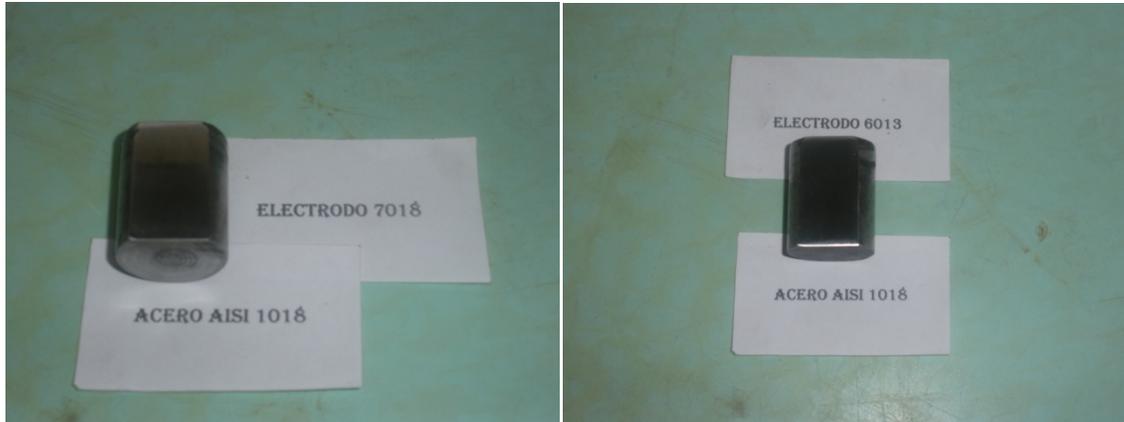
Fuente: Rivera, Gerson. **Laboratorio de Metalografía.** Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala

**Figura 41. Microscopio metalográfico**



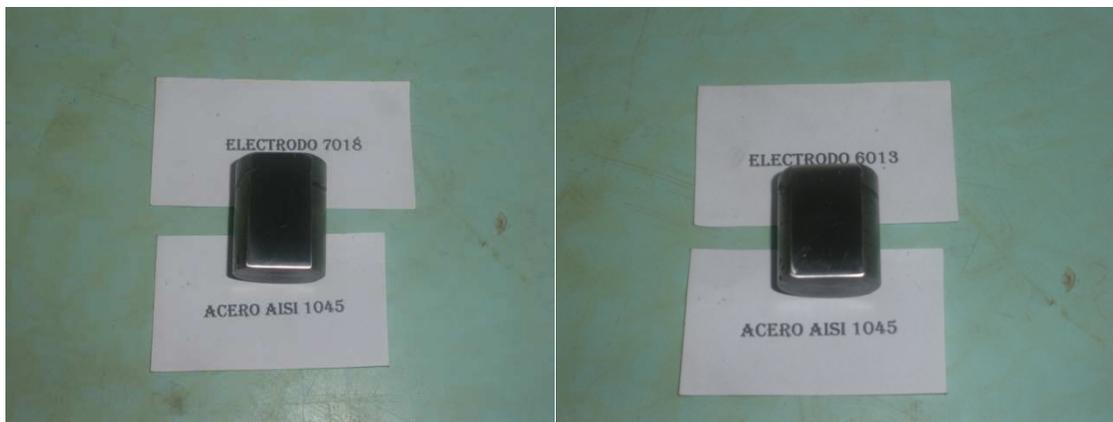
Fuente: Rivera, Gerson. **Laboratorio de Metalografía.** Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala

**Figura 42. Probetas con material soldado ya pulido acero AISI 1018 E-6013 y AISI 1018 E-7018**



Fuente: Rivera, Gerson. **Laboratorio de Metalografía.** Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala

**Figura 43. Probetas con material soldado ya pulido acero AISI 1045 E-6013 y AISI 1045 E-7018**



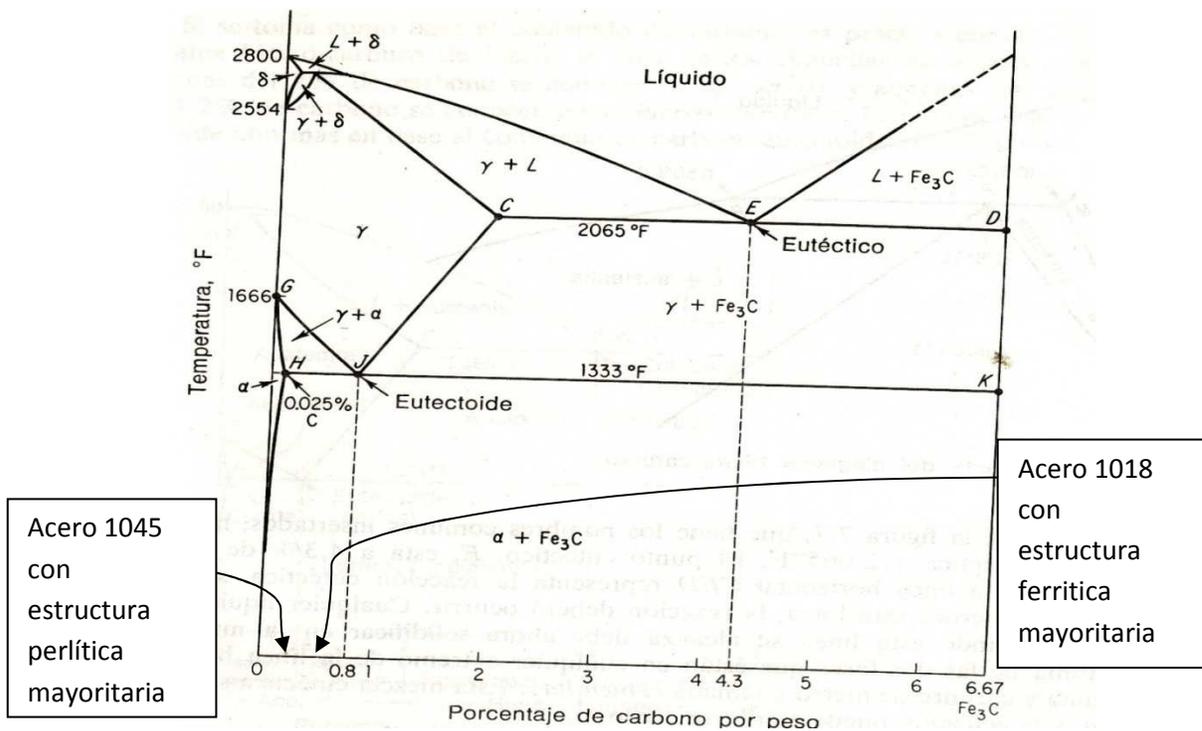
Fuente: Rivera, Gerson. **Laboratorio de Metalografía.** Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala

**Figura 44. Probeta atacada químicamente (Nital)**



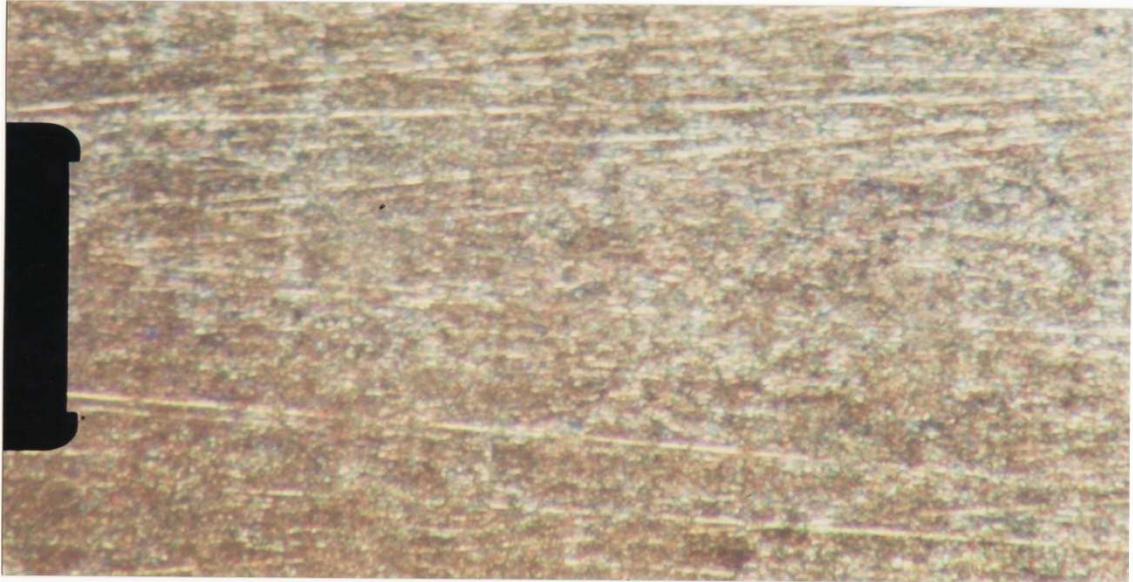
Fuente: Rivera, Gerson. **Laboratorio de Metalografía.** Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala

**Figura 45. Diagrama hierro Carbono definiendo los aceros elegidos**



Fuente: Rivera, Gerson. **Laboratorio de Metalografía.** Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala

**Figura 46. Fotomicrografía de acero AISI 1018 con magnificación en el microscopio: 10x.**



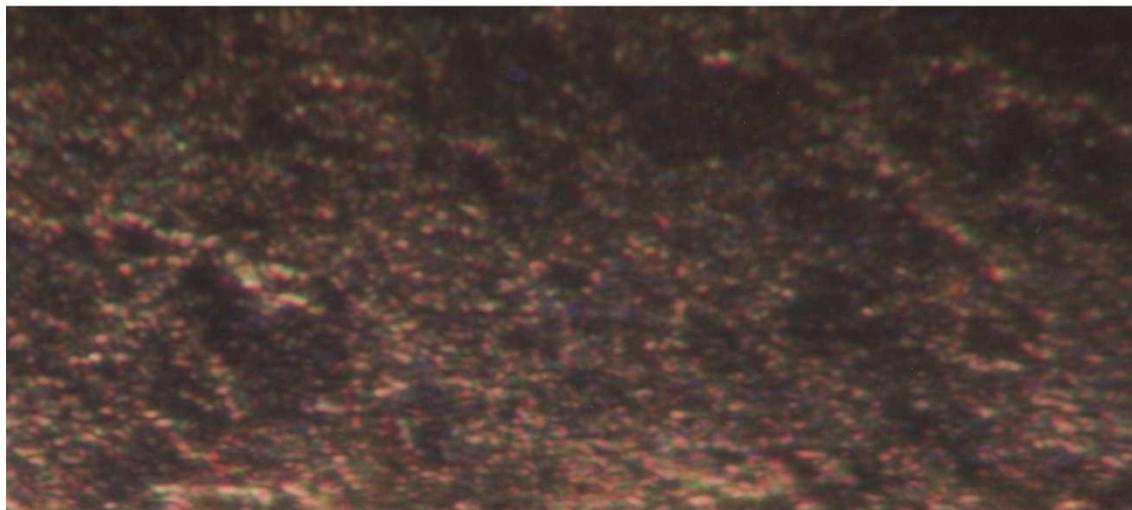
Fuente: Rivera, Gerson. **Laboratorio de Metalografía.** Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala

**Figura 47. Fotomicrografía de acero AISI 1018 con magnificación en el microscopio: 20x.**



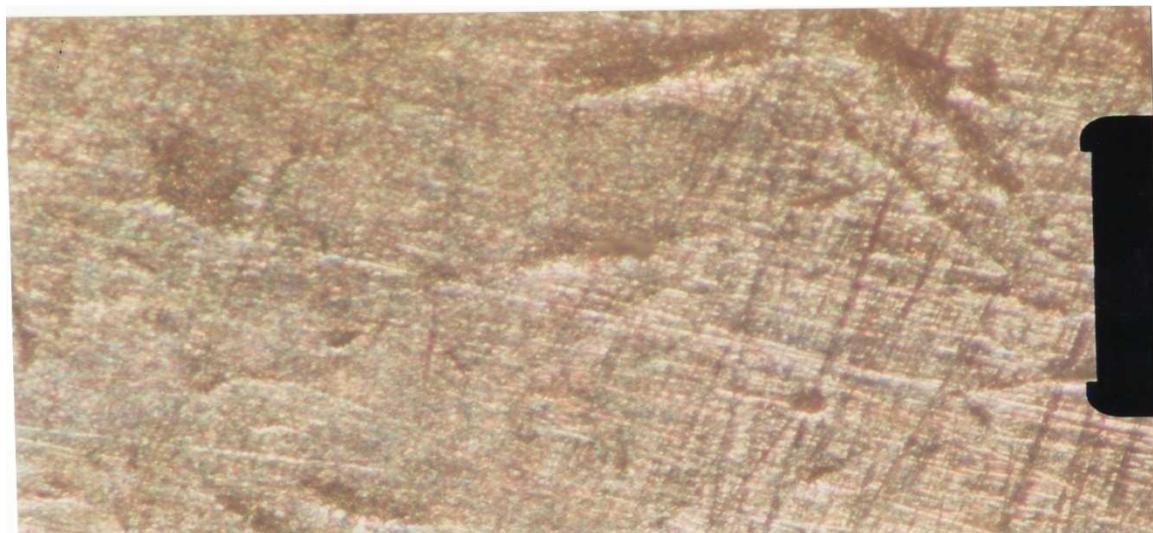
Fuente: Rivera, Gerson. **Laboratorio de Metalografía.** Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala

**Figura 48. Fotomicrografía de acero AISI 1045 con magnificación en el microscopio: 10x.**



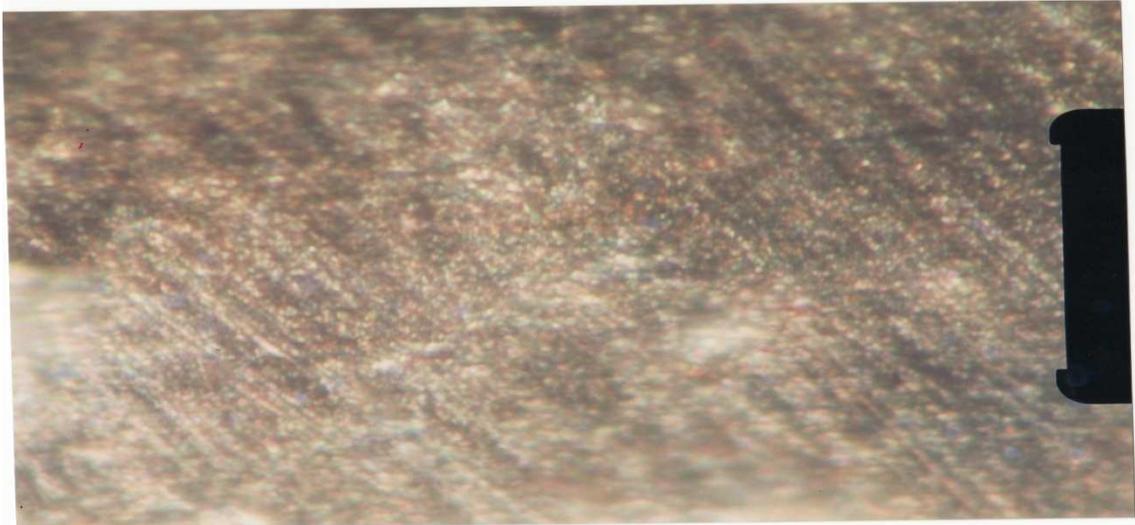
Fuente: Rivera, Gerson. **Laboratorio de Metalografía.** Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala

**Figura 49. Fotomicrografía de acero AISI 1018, E-6013 magnificación en el microscopio: 50x.**



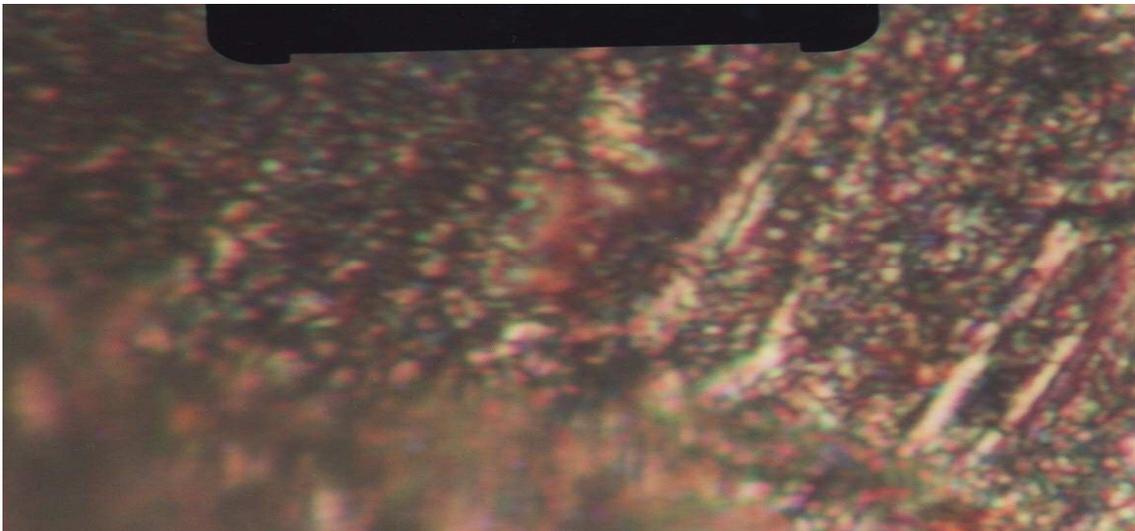
Fuente: Rivera, Gerson. **Laboratorio de Metalografía.** Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala

**Figura 50. Fotomicrografía de acero AISI 1018, E-6013 magnificación en el microscopio: 100x.**



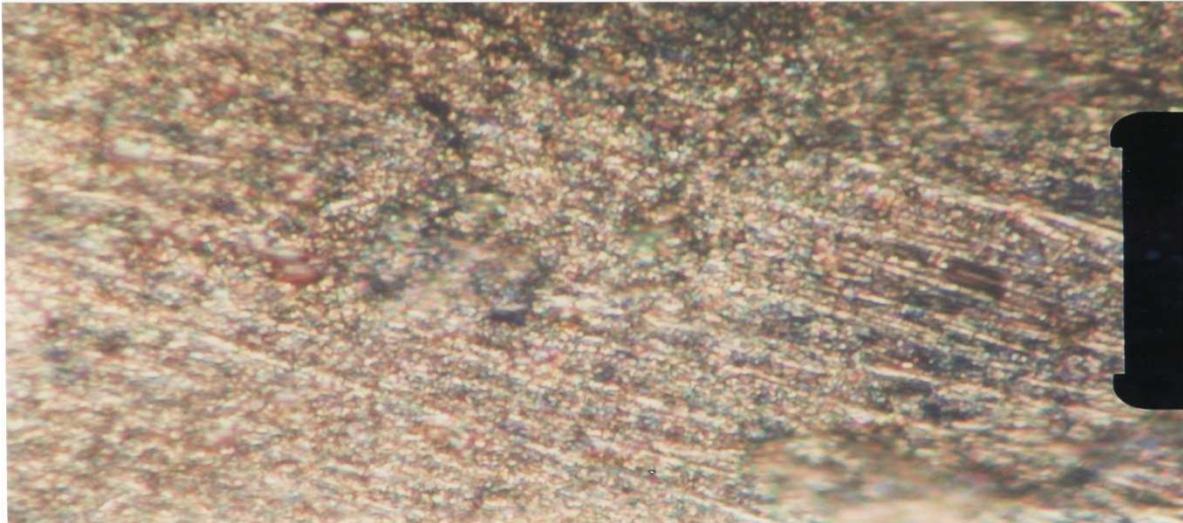
Fuente: Rivera, Gerson. **Laboratorio de Metalografía.** Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala

**Figura 51. Fotomicrografía de acero AISI 1018, E-7018 magnificación en el microscopio: 50x.**



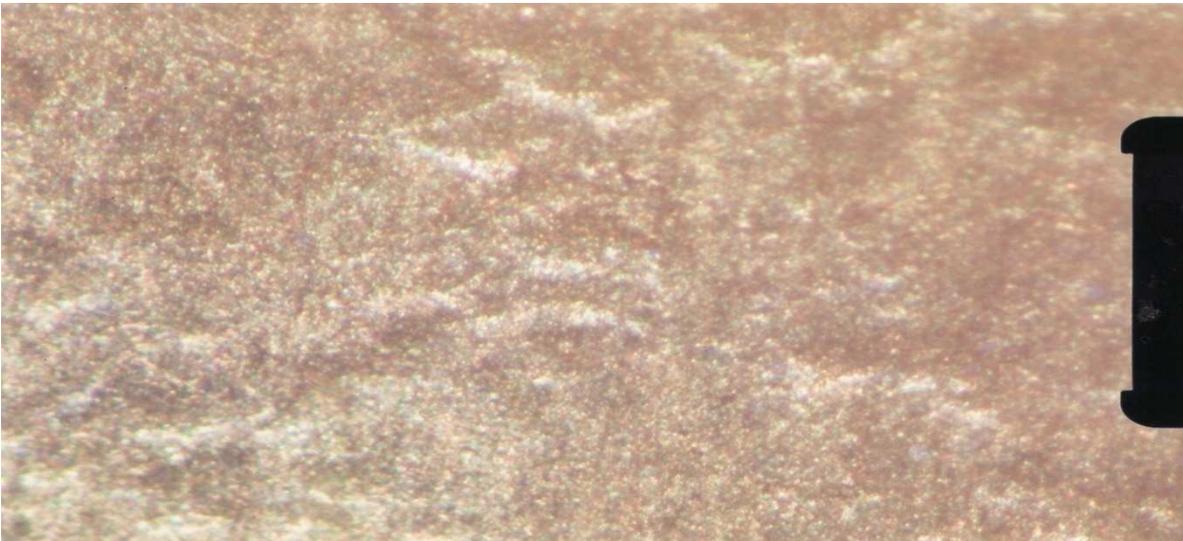
Fuente: Rivera, Gerson. **Laboratorio de Metalografía.** Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala

**Figura 52. Fotomicrografía de acero AISI 1018, E-7018 magnificación en el microscopio: 100x.**



Fuente: Rivera, Gerson. **Laboratorio de Metalografía.** Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala

**Figura 53. Fotomicrografía de acero AISI 1045, E-6013 magnificación en el microscopio: 50x.**



Fuente: Rivera, Gerson. **Laboratorio de Metalografía.** Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala

**Figura 54. Fotomicrografía de acero AISI 1045, E-6013 magnificación en el microscopio: 100x.**



Fuente: Rivera, Gerson. **Laboratorio de Metalografía.** Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala

**Figura 55. Fotomicrografía de acero AISI 1045, E-7018 magnificación en el microscopio: 50x.**



Fuente: Rivera, Gerson. **Laboratorio de Metalografía.** Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala

**Figura 56. Fotomicrografía de acero AISI 1045, E-7018 magnificación en el microscopio: 100x.**



Fuente: Rivera, Gerson. **Laboratorio de Metalografía.** Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala