

## **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

### **INFLUENCIA DEL RECOCIDO Y TEMPLE SOBRE LA DUREZA DE UN DEPOSITO DE RECARGUE DURO DEL TIPO EFe5-B**

TUTOR ACADEMICO: Prof. Vicente Ignoto

TUTOR INDUSTRIAL: Lic. Ana María Rodríguez  
Ing. Martínez Simón

Presentado ante la ilustre  
Universidad Central de  
Venezuela para optar al título  
de Ingeniero Metalúrgico  
Por el Br. Suárez B., Efrén J

Caracas, Octubre de 2001

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por darme la oportunidad de vivir y guiar mis pasos a lo largo de todo el camino

A mis padres y hermanas por tenerme paciencia y comprensión

A la Universidad Central de Venezuela y en especial a la Escuela de Metalurgia y Ciencia de los Materiales por formarme como profesional

A la Empresa Inversiones ARCOMETAL por su colaboración en la realización de esta tesis

Al personal técnico y de Recursos Humanos de dicha empresa por su colaboración incondicional durante todo este trabajo, sin el cual hubiese sido imposible concluirlo

Al personal técnico y empleados que laboran en la Escuela de Metalurgia

Al personal técnico de la Facultad de Ciencias, en especial al Dpto de Rayos X

A mis amigos y compañeros dentro de la Escuela y en especial a Lourdes, Iván, Rosalyn, Elio, Clara, Eduardo, Marcial, Isis y Maribel

A Sara, por ser mi punto de apoyo, gracias por cruzarte en mi camino y Andrés gracias por ser quien eres.

Ana Maria Rodríguez, Simón Martínez, Vicente Ignoto, Victor J, Victor M, Erika, Maria, Mirin Berrios, Mirian Morales, Norkys, Eddy, Edwards y Fanny, por su apoyo incondicional.

A mis seres más queridos y todos aquellos que no pude nombrarles por no hacer una lista tan larga..... Gracias

## ÍNDICE

1. CAPITULO I.....	1
1. FUNDAMENTO TEÓRICO.....	1
1.1 Proceso de soldadura SMAW.....	1
1.1.1 Definición y descripción general del proceso SMAW.....	1
1.1.2 Principios del proceso SMAW.....	2
1.1.3 Capacidades y limitaciones del proceso.....	3
1.1.4 Corriente de soldadura .....	3
1.1.5 Fuentes de potencia.....	4
1.1.6 Selección de la fuente de potencia.....	5
1.1.7 Importancia de la curva tensión.....	6
1.1.8 Electrodo cubiertos.....	6
1.1.9 Electrodo de recubrimiento .....	7
1.1.10 Diámetro del electrodo.....	8
1.1.11 Orientación del electrodo.....	9
1.1.12 Estabilidad del arco.....	9
1.1.13 Longitud del arco .....	10
1.1.14 Velocidad de recorrido.....	10
1.1.15 Eliminación de escoria .....	11
1.2 Metalurgia de la soldadura .....	11
1.2.1 Soldabilidad de los metales .....	11
1.2.2 Capacidad de endurecimiento y enfriamiento.....	16
1.2.3 Alteraciones de la estructura del acero.....	17
1.2.3.1 Contenido de carbono.....	17
1.2.3.2 Efecto de la temperatura.....	18
1.2.4 Transformaciones del acero en condiciones de soldadura.....	18
1.2.5 Soldadura.....	20
1.2.6 Aspectos Metalúrgicos de la Soldadura.....	24
1.2.7 Alteraciones en la Estructura Causadas por la Soldadura.....	31
1.2.8 Efectos del calor en la soldadura.....	33
1.2.9 Elementos de aleación que forman carburos.....	35
1.2.10 Dilución.....	38
1.2.11 Desgaste.....	38
1.3 Tratamientos térmicos en la soldadura.....	40
1.3.1 Calentamiento y Medición de Temperaturas.....	41
1.3.2 Pre calentamiento y temperatura entre pases.....	42
1.3.3 Tratamientos térmicos de los aceros.....	46
1.3.4 Tratamientos térmicos posteriores a la soldadura .....	46
1.3.5 Normalizado .....	47
1.3.6 Recocido.....	47
1.3.7 Templado.....	52
1.3.8 Revenido.....	54
1.3.9 Alivio de Tensiones .....	60
1.4 Recubrimientos duros o hardfacing.....	60
1.4.1 Definición y descripción general.....	60
1.4.2 Propiedades de los materiales para recubrimientos duros .....	62

1.4.3	Factores de uso .....	63
1.4.4	Selección de la aleación de revestimiento duro .....	67
1.4.5	Procesos de soldadura de recargues duros .....	73
1.4.6	Recomendaciones para la aplicación de recargues duros .....	74
1.5	Especificaciones del procedimiento de soldadura.....	75
1.5.1	Preparación de la soldadura.....	75
1.5.2	Soldadura al arco protegida sobre superficies tratadas .....	75
1.5.3	Técnica de soldadura .....	75
1.5.4	Sugerencias de precalentamiento .....	76
1.5.5	Selección del electrodo para el trabajo .....	76
1.5.6	Ensayo de dureza .....	77
1.5.7	Ensayo metalografico .....	78
1.5.8	Observación metalografica de la soldadura .....	79
2.	CAPITULO II .....	83
2.	Procedimiento experimental .....	84
2.1	Caracterización de los materiales .....	84
2.1.1	Material base .....	84
2.1.1.1	Análisis químico .....	86
2.1.2	Material de aporte .....	86
2.2	Caracterización de la muestra para composición química .....	86
2.3	Preparación del proceso de soldadura .....	88
2.3.1	Diseño y preparación de la mesa de trabajo .....	88
2.3.2	Fuente de energía eléctrica .....	89
2.4	Elaboración del recargue .....	89
2.4.1	Preparación del material base .....	89
2.4.2	Preparación de los electrodos de recargue .....	89
2.4.3	Precalentamiento de las piezas de trabajo .....	89
2.4.4	Elaboración del recargue .....	90
2.4.5	Rendimiento .....	91
2.5	Ensayos .....	92
2.5.1	Caracterización de los depósitos según la norma A5.13-801R .....	92
2.5.1.1	Análisis químico .....	92
2.5.1.2	Inspección Visual .....	92
2.5.1.3	Tratamientos Térmicos .....	92
2.5.1.3.1	Probetas sin tratamiento Térmico .....	93
2.5.1.3.2	Probetas Recocidas .....	93
2.5.1.3.3	Probetas Templadas y revenidas .....	94
2.5.1.4	Evaluación microestructural .....	94
2.5.1.5	Dureza .....	94
2.5.1.6	Evaluaciones Adicionales .....	96
2.5.1.6.1	Evaluación Macroestructural .....	96
2.5.1.6.2	Difraccion de rayos X .....	96
3	CAPITULO III .....	97
3	Resultados experimentales y análisis.....	98
3.1	Caracterización de los materiales.....	98
3.1.1	Material Base .....	98
3.1.1.2	Metalografía.....	98

3.1.2	Material de Aporte.....	99
3.2	Rendimiento de los electrodos.....	100
3.3	Tratamientos térmicos.....	102
3.4.	Dureza .....	103
3.4.1	Dureza Longitudinal.....	103
3.4.1.1	Probetas sin Tratamiento Térmico.....	103
3.4.1.1.1	Cordones de 1 Pase.....	103
3.4.1.1.2	Cordones de 2 pases sobrepuestos.....	104
3.4.1.1.3	Cordones de 3 pases sobrepuestos.....	104
3.4.1.1.4	Dureza en las probetas sin tratamiento térmico.....	105
3.4.1.2	Probetas con Tratamiento Térmico de recocido.....	106
3.4.1.2.1	Cordones de 1 Pase.....	106
3.4.1.2.2	Cordones de 2 pases sobrepuestos.....	107
3.4.1.2.3	Cordones de 3 pases sobrepuestos.....	107
3.4.1.2.4	Dureza en las probetas con tratamiento térmico de recocido.....	108
3.4.1.3	Probetas con Tratamiento Térmico de Temple y Revenido.....	109
3.4.1.3.1	Cordones de 1 Pase.....	109
3.4.1.3.2	Cordones de 2 pases sobrepuestos.....	109
3.4.1.3.3	Cordones de 3 pases sobrepuestos.....	110
3.4.1.3.4	Promedio de dureza en las probetas con tratamiento térmico de Temple-Revenido.....	111
3.4.1.4	Comparación de la dureza en probetas, en función de los tratamientos térmicos.....	112
3.4.2	Dureza Transversal.....	116
3.4.2.1	Dureza transversal en las probetas sin tratamiento térmico.....	116
3.4.2.2	Dureza transversal en las probetas con tratamiento térmico de Recocido.....	120
3.4.2.3	Dureza transversal con tratamiento térmico de temple y revenido.....	124
3.5	Estudio macrográfico.....	132
3.5.1	Geometría del cordón para 1 pase.....	132
3.5.2	Geometría del cordón para 2 pases.....	133
3.5.3	Geometría del cordón para 3 pases.....	134
3.6	Caracterización microestructural.....	136
3.7	Metalografía.....	154
3.8	Evaluaciones adicionales.....	183
3.8.1	Difracción de Rayos X.....	183
4.	CAPITULO IV .....	188
4	Conclusiones .....	189
5.	CAPITULO V .....	190
5	Recomendaciones.....	191
6.	CAPITULO VI .....	192
6	Referencias bibliográficas .....	193
7.	CAPITULO VII .....	195
7	Anexos.....	196
7.1	ASTM Norma E18 - 89 <sup>a</sup> .....	196
7.2	Espectroscopia de emisión por plasma ICP.....	197

## **INFLUENCIA DEL RECOCIDO Y TEMPLE SOBRE LA DUREZA DE UN DEPOSITO DE RECARGUE DURO DEL TIPO Efe-5B**

**Tutor Académico: Prof. Vicente Ignoto. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales.**

**Año 2001, 216 p.**

**Palabras claves:** SMAW, Tratamiento Térmico, Recocido, Temple, Revenido, Revestimientos Duros, AGA BH-88.

**Resumen.** El objetivo de esta investigación consiste en evaluar y conocer la influencia de los tratamientos térmicos de recocido y temple revenido en el proceso SMAW para revestimientos duros “Hardfacing” sobre aceros de bajo carbono (aceros ASTM 1010), usando un electrodo revestido denominado AGA BH-88, basados en la norma AWS A5.13-80R.

Una vez establecidos y utilizados los parámetros óptimos recomendados por el fabricante, se procedió a la realización de los ensayos de análisis químico, dureza, metalografía y difracción de rayos X. Todos los ensayos realizados, calificaron según la norma. Concluyéndose que la aplicación de tratamientos térmicos sobre revestimientos duros empleado sobre aceros al carbono, mejoran su maquinabilidad, disminuyendo la dureza. La mayor cantidad de pases recomendados corresponde a dos, ya que tres origina agrietamiento; y el mejor tratamiento a realizar es el de recocido, ya que los cordones no presentan mayores defectos y la disminución de la dureza es aceptable

## **INTRODUCCION .-**

La soldadura de revestimientos duros es usada en procesos de fabricación y recuperación de diversos componentes y equipos metálicos empleados en los diferentes sectores industriales y agrícolas con el objeto de proporcionar resistencia al desgaste en su superficie. Los serios problemas que presenta la industria con relación al desgaste sobre los equipos y componentes causan un aumento significativo de los costos de mantenimiento y reposición, siendo en gran parte evitables dados los beneficios que produce este tipo de procesos de soldadura y aun siendo usados, se hacen de una forma inadecuada en cuanto al proceso o material aplicado. Siguiendo la tendencia de la industria moderna, una mayor utilización de los procesos automáticos o semi-automáticos puede conferir a los cordones de revestimientos duros mejores propiedades, acabados superficiales de superior calidad, etc<sup>(0)</sup>, así como también una mayor productividad del proceso.

La fabricación de piezas nuevas con superficies recubiertas generalmente conducen a la construcción de componentes bimetálicos, pues las características del metal que se aporta a la superficie resultan diferentes a la del metal que constituye el resto del cuerpo.

Por estas razones, la sustitución gradual de los electrodos revestidos para el proceso de soldadura manual al arco (SMAW) por electrodos tubulares (FCAW), como una variante del proceso de soldadura automática o semiautomática con protección gaseosa (MIG-MAG), es cada vez más seguida por la industria de mantenimiento y fabricación de piezas de equipos sometidos al desgaste. El objetivo de este trabajo consiste en la evaluación de los efectos al someter cordones de material de recargue duro a diferentes tratamientos térmicos tomando como base la variación del parámetro de dureza.

# Capítulo I

---

## FUNDAMENTO TEORICO

## **1.1.- PROCESO DE SOLDADURA SMAW**

### **1.1.1.- Definición y descripción del proceso SMAW**

La soldadura por arco de metal protegido (shielded metal arc welding, SMAW) es un proceso de soldadura por arco en el que se produce coalescencia de metales por medio del calor de un arco eléctrico que se mantiene entre la punta de un electrodo cubierto y la superficie del metal base en la unión que se está soldando.

El núcleo del electrodo cubierto consiste en una varilla de metal sólida de material estirado o colado, o bien una varilla fabricada encerrando metal en polvo en una funda metálica. La varilla del núcleo conduce la corriente eléctrica al arco y suministra metal de aporte a la unión. Las funciones principales de la cobertura del electrodo son estabilizar el arco y proteger el metal derretido de la atmósfera por medio de los gases que se crean cuando el recubrimiento se descompone por el calor del arco.

La protección empleada, junto con otros ingredientes de la cobertura y del alambre del núcleo, controlan en gran medida las propiedades mecánicas, la composición química y la estructura metalúrgica del metal de soldadura, así como las características de arco del electrodo. La composición de la cobertura del electrodo varía dependiendo del tipo de electrodo.

El proceso SMAW se usa para aplicaciones de unión y recubrimiento sobre diversos metales base. La idoneidad del proceso para un metal base específico depende de la disponibilidad de un electrodo cubierto cuyo metal de aporte tenga la composición y propiedades requeridas. Hay electrodos para los siguientes metales base:

- 1) Aceros al carbono
- 2) Aceros de baja aleación
- 3) Aceros resistentes a la corrosión
- 4) Hierros colados (dúctiles y grises)
- 5) Aluminio y aleaciones de aluminio
- 6) Cobre y aleaciones de cobre
- 7) Níquel y aleaciones de níquel

Se dispone de electrodos para la aplicación a estos mismos metales de recubrimientos resistentes al desgaste, el impacto o la corrosión.

### **1.1.2.- Principios del proceso SMAW**

La soldadura por arco de metal protegido es, por mucho, el más ampliamente utilizado de los procesos de soldadura por arco. Aprovecha el calor del arco para derretir el metal base y la punta de un electrodo consumible cubierto. El electrodo y el trabajo forman parte de un circuito eléctrico. Este circuito comienza con la fuente de potencia eléctrica e incluye los cables de soldadura, un portaelectrodos, una conexión con la pieza de trabajo, la pieza de trabajo (soldamento) y un electrodo de soldadura por arco. Uno de los dos cables de la fuente de potencia se conecta al trabajo; el otro se conecta al portaelectrodos.

La soldadura se inicia cuando se enciende un arco eléctrico entre la punta del electrodo y el trabajo. El intenso calor del arco derrite la punta del electrodo y la superficie del trabajo cerca del arco. En la punta del electrodo se forman con rapidez pequeños glóbulos de metal fundido, los cuales se transfieren a través del chorro del arco hasta el charco de soldadura fundida<sup>1</sup>. De esta forma se deposita metal de aporte conforme el electrodo se va consumiendo. El arco se mueve sobre el trabajo con una longitud de arco y velocidad de desplazamiento apropiadas, derritiendo y fusionando una porción del metal base añadiendo continuamente metal de aporte. Puesto que el arco es uno de los más calientes que producen las fuentes de calor comerciales (se han medido temperaturas por encima de 5000°C) en su centro, la fusión del metal base se efectúa en forma casi instantánea al iniciarse el arco. Si las soldaduras se hacen en posición plana u horizontal, la transferencia de metal es inducida por la fuerza de gravedad, la expansión del gas, fuerzas eléctricas y electromagnéticas y la tensión superficial. Si se suelda en otras posiciones, la gravedad actuará oponiéndose a las demás fuerzas.

El proceso requiere suficiente corriente eléctrica para derretir tanto el electrodo como una cantidad adecuada del metal base. También requiere un espacio apropiado entre la punta del electrodo y el metal base o el charco de soldadura. Estos requisitos son necesarios para establecer las condiciones en que se llevará a cabo la coalescencia. Los tamaños y tipos de electrodos para soldadura por arco de metal protegido definen los requerimientos de voltaje (dentro del intervalo global de 16 a 40 V) y de amperaje (dentro del intervalo global de 16 a 40V) y de amperaje (dentro del intervalo global de 20 a 550 A) del arco. La corriente puede ser alterna o continua, dependiendo del electrodo empleado, pero la fuente de potencia debe

ser capaz de controlar el nivel de corriente dentro de un intervalo razonable para responder a las complejas variables del proceso de soldadura en sí.

### **1.1.3.- Capacidades y limitaciones del proceso**

La soldadura por arco de metal protegido es uno de los procesos más ampliamente utilizados, sobre todo para soldaduras cortas en trabajos de producción, mantenimiento y reparación, y para construcción en el campo. Las siguientes son ventajas del proceso:

- 1) El equipo es relativamente sencillo, económico y portátil
- 2) El electrodo cubierto proporciona el metal de aporte el mecanismo para proteger dicho metal y el metal de soldadura contra una oxidación perjudicial durante la soldadura.
- 3) No se requiere protección con gas auxiliar ni un fundente granular
- 4) El proceso es menos sensible al viento y las corrientes de aire que los procesos de soldadura por arco protegidos con gas
- 5) Se puede utilizar en áreas de acceso limitado
- 6) El proceso es adecuado para la mayor parte de los metales y aleaciones de uso común.

### **1.1.4.- Corriente de soldadura**

La soldadura por arco de metal protegido puede efectuarse con corriente tanto alterna como continua, siempre que se use el electrodo adecuado. El tipo de corriente de soldadura, la polaridad y los constituyentes de la cobertura del electrodo afectan la rapidez de fusión de todos los electrodos cubiertos. Para un electrodo determinado, la rapidez de fusión se relaciona directamente con la energía eléctrica suministrada al arco. Parte de esta energía se destina a fundir una porción del metal base, y otra parte sirve para fundir el electrodo.

#### *Corriente continua*

La corriente continua siempre produce un arco más estable y una transferencia de metal más uniforme que la corriente alterna. Esto se debe a que la polaridad de la corriente no está cambiando todo el tiempo, como sucede con ca. La mayor parte de los electrodos cubiertos trabajan mejor con polaridad inversa (electrodo positivo), aunque algunos son apropiados (e incluso están diseñados) para polaridad directa (electrodo negativo). La polaridad inversa logra mayor penetración, pero la directa aumenta la rapidez de fusión del electrodo.

El arco de cc hace que el charco de soldadura moje mejor las superficies de unión y produce una franja de soldadura de dimensiones más uniformes incluso con amperajes

bajos. Por esta razón, la corriente continua es ideal para soldar secciones delgadas. La mayor parte de los electrodos combinados de cc/ca trabajan mejor con cc, a pesar de estar diseñados para operar con cualquiera de los dos tipos de corriente.

La corriente continua es la preferida para soldar en posición vertical o cenital, y también para soldar con arco corto. El arco de cc no es tan propenso a entrar en cortocircuito cuando glóbulos de metal fundido se transfieren a través de él.

El golpe del arco puede ser un problema al soldar con cc metales magnéticos (hierro y níquel). Una forma de resolver este problema es cambiar a ca.

#### *Amperaje*

Los electrodos cubiertos de un tamaño y clasificación específicos pueden operar de manera satisfactoria a diversos amperajes dentro de cierto intervalo. Este intervalo varía un poco dependiendo del espesor y la formulación de la cobertura. La rapidez de deposición aumenta con el amperaje y las tasas de deposición resultantes varían dependiendo de la clasificación del electrodo. Para un tipo y tamaño de electrodo específico, el amperaje óptimo depende de varios factores como la posición de soldadura y el tipo de unión. El amperaje debe ser suficiente para obtener una buena fusión y penetración sin perder el control del charco de soldadura. No conviene usar amperajes que rebasen el intervalo recomendado, ya que el electrodo puede sobrecalentarse y causar demasiadas salpicaduras, golpe de arco, socavamiento y agrietamiento del metal de soldadura.

### **1.1.5.- Fuentes de potencia**

#### *1.1.5.1 Tipo de corriente de salida:*

Se puede usar corriente alterna (ca) o bien continua (cc) para la soldadura por arco de metal protegido, dependiendo de la corriente suministrada por la fuente de potencia y del electrodo escogido. El tipo de corriente utilizada influye en el rendimiento del electrodo. Ambos tipos de corriente tienen ventajas y limitaciones, y éstas deben considerarse al seleccionar el tipo de corriente para una aplicación específica. Los factores que deben tenerse en cuenta son los siguientes:

- a) Caída de voltaje: Es menor si se usa ca. Esto hace a la corriente alterna más apropiada cuando la soldadura debe efectuarse a cierta distancia de la fuente de potencia.
- b) Baja corriente: Si los electrodos son de diámetro pequeño y baja corriente de soldadura, la corriente continua ofrece mejores características de operación y un arco más estable.
- c) Inicio del arco: es más fácil encender el arco con cc, sobre todo si se usan electrodos de diámetro pequeño
- d) Longitud del arco: La soldadura con arco corto (bajo voltaje de arco) es más fácil con cc que con ca.
- e) Golpe de arco: La corriente alterna pocas veces presenta problemas de golpe de arco porque el campo magnético se está invirtiendo constantemente (120 veces por segundo).
- f) Posición de la soldadura: La corriente continua es un poco mejor que la alterna para soldaduras verticales o por encima de la cabeza porque permite usar amperaje menor.
- g) Espesor del metal: se puede soldar tanto metal laminado como secciones gruesas empleando cc. La soldadura de lámina metálica con ca es menos recomendable que con cc.

#### **1.1.6.- Selección de la fuente de potencia**

Son varios los factores a considerar cuando se selecciona una fuente de potencia para SMAW:

- 1) El tipo de corriente de soldadura requerida
- 2) El intervalo de amperaje requerido
- 3) Las posiciones en que se soldará

La potencia primaria disponible en la estación de trabajo.

### 1.1.7.- Importancia de la curva tensión

Las fuentes de voltaje constante no son apropiadas para SMAW porque con su curva plana ocurre un cambio aunque sea pequeño en la longitud del arco (voltaje) produce un cambio relativamente grande en el amperaje. Las fuentes de potencia de corriente constante son preferibles para la soldadura manual, porque cuanto mayor sea la pendiente de la curva (dentro del intervalo de soldadura), menor será el cambio en la corriente para un cambio dado en el voltaje del arco (longitud del arco).

### 1.1.8.- Electrodo Cubiertos

Los electrodos cubiertos se clasifican de acuerdo con los requisitos de especificaciones emitidas por la American Welding Society. Ciertas agencias del Departamento de Defensa de Estados Unidos también emiten especificaciones para los electrodos cubiertos. Los números de especificaciones de la AWS y las clasificaciones de electrodos correspondientes se dan en la tabla 1. Los electrodos se clasifican con base en la composición química o en las propiedades mecánicas, o en ambas cosas, de su metal de soldadura sin diluir. Los electrodos de acero al carbono, acero de baja aleación y acero inoxidable también se clasifican de acuerdo con el tipo de corriente de soldadura con la que trabajan mejor, y en ocasiones de acuerdo con las posiciones de soldadura en las que pueden emplearse.

Tabla 1. Especificaciones de la AWS para electrodos cubiertos

Tipo de electrodo	Especificación de la AWS
Acero al carbono	A5.1
Acero de baja aleación	A5.5
Acero resistente a la corrosión	A5.4
Hierro colado	A5.15
Aluminio y aleaciones de aluminio	A5.3
Cobre y aleaciones de cobre	A5.6
Níquel y aleaciones de níquel	A5.11
Recubrimiento	A5.13 y A5.21

Además de establecer el arco y proporcionar metal de aporte para el depósito de soldadura, el electrodo introduce otros materiales en el arco o sus inmediaciones, o en ambos lugares. Dependiendo del tipo de electrodo que se use, la cobertura desempeña una o más de las siguientes funciones:

- 1) Provee un gas para proteger el arco y evitar una contaminación excesiva del metal de aporte derretido por parte de la atmósfera.
- 2) Suministra limpiadores, desoxidantes y agentes fundentes para purificar la soldadura y evitar un crecimiento excesivo de granos en el metal de soldadura.
- 3) Establece las características eléctricas del electrodo.
- 4) Proporciona un manto de escoria que protege el metal de soldadura caliente del aire y mejora las propiedades mecánicas. La forma de la franja y limpieza superficial de dicho metal.
- 5) Constituye un medio para añadir elementos de aleación que modifiquen las propiedades mecánicas del metal de soldadura.

#### **1.1.9.- Electrodo de recubrimiento**

La mayor parte de los electrodos de recubrimiento duro se diseñan de modo que cumplan con ANSI/AWS A5.13, *Especificación para electrodos y varillas de soldadura para recubrimiento sólido*, o ANSI/AWS A5.21, *especificación para electrodos y varillas de soldadura para recubrimiento compuesto*. Se dispone de una amplia gama de electrodos para SMAW (dentro de esta y otras especificaciones AWS para metales de aporte) que producen capas resistentes al desgaste, el impacto, el calor o la corrosión sobre diversos metales base. Todos los electrodos cubiertos especificados en A5.13 tienen alambre de núcleo sólido; los especificados en A5.21 tienen un núcleo compuesto. El sistema de designación de los electrodos en ambas especificaciones es similar al que se usa para los electrodos de carburo de tungsteno, en los que la E de la designación para estos electrodos va seguida por WC y por los límites de tamaño de malla para los gránulos de carburo de tungsteno para completar la designación. En este caso, el núcleo consiste en un tubo de acero relleno con los gránulos de carburo de tungsteno.

El recubrimiento con electrodos cubiertos se emplea para revestimientos, untaduras, engrosamientos y aplicación de superficies duras. El objetivo del depósito de soldadura en estas aplicaciones es conferir a las superficies una o más de las siguientes cualidades:

- 1) Resistencia a la corrosión
- 2) Control metalúrgico
- 3) Control dimensional
- 4) Resistencia al desgaste
- 5) Resistencia al impacto

La selección de electrodos recubiertos para una aplicación de recubrimiento en particular deberá hacerse después de analizar detenidamente las propiedades que debe tener el metal de soldadura aplicado a un metal base específico.

#### **1.1.10.- Diámetro del electrodo**

El diámetro del electrodo correcto es aquel que, usado con el amperaje y velocidad de desplazamiento correctos, produce una soldadura del tamaño requerido en el tiempo más corto posible. El diámetro que se escoja dependerá en gran medida del espesor del material por soldar, la posición en la que se efectuará la soldadura y el tipo de unión. En general se escogerán electrodos más grandes para aplicaciones que impliquen materiales más gruesos y para soldar en la posición plana, a fin de aprovechar sus mayores tasas de deposición. Al soldar en las posiciones horizontal, vertical y cenital, el metal de soldadura fundido tiende a fluir hacia fuera de la unión debido a la fuerza de gravedad. Esta tendencia puede controlarse empleando electrodos pequeños a fin de reducir el tamaño del charco de soldadura. La manipulación del electrodo y la mayor velocidad de recorrido a lo largo de la unión también ayudarán a controlar el tamaño del charco de soldadura. Al seleccionar el tamaño del electrodo también debe considerarse el diseño del surco de la unión. El electrodo empleado en las primeras pasadas debe ser lo bastante pequeño como para que pueda manipularse con facilidad en la raíz de la unión.

### **1.1.11.- Orientación del electrodo**

La orientación del electrodo con respecto al trabajo y al surco de soldadura es importante para la calidad de la soldadura. Una orientación incorrecta puede causar atrapamiento de escoria, porosidad y socavamiento. La orientación adecuada depende del tipo y tamaño del electrodo, la posición de soldadura y la geometría de la unión.

### **1.1.12.- Estabilidad del arco**

Se necesita un arco estable para producir soldaduras de calidad. Los defectos como fusión inconsistente, escoria atrapada, agujeros de respiración y porosidad pueden ser el resultado de un arco inestable.

Los siguientes factores influyen de manera importante en la estabilidad del arco:

- 1) El voltaje de circuito abierto de la fuente de potencia
- 2) Las características de recuperación de voltaje transitorios de la fuente de potencia
- 3) El tamaño de las gotas de metal de aporte fundido y escoria en el arco
- 4) La ionización del trayecto del arco desde el electrodo al trabajo
- 5) La manipulación del electrodo

La acción de protección del arco, es en esencia la misma para todos los electrodos, pero el método específico de protección y el volumen de escoria producido varían de un tipo a otro. El grueso de los materiales de cobertura de algunos electrodos se convierte en gas por el calor del arco, y sólo se produce una pequeña cantidad de escoria. Los electrodos de este tipo dependen en buena medida de un escudo gaseoso para evitar la contaminación por parte de la atmósfera. El metal de soldadura de tales electrodos puede identificarse por la capa incompleta o clara de escoria que cubre la franja.

### **1.1.13.- Longitud del arco**

Es la distancia entre la punta derretida del núcleo del electrodo y la superficie del charco de soldadura. Es importante usar un arco con la longitud apropiada para obtener una soldadura de buena calidad. La transferencia de metal desde la punta del electrodo hasta el charco de soldadura no es una acción suave y uniforme, no obstante, las variaciones en el voltaje serán mínimas si se suelda con el amperaje y la longitud de arco correctos. La longitud del arco correcta varía con la clasificación del electrodo, su diámetro y la composición de su cobertura; asimismo varía con el amperaje y la posición de la soldadura. Aumenta al incrementarse el diámetro del electrodo y el amperaje, pero por regla general no debe exceder el diámetro del alambre del núcleo del electrodo.

### **1.1.14.- Velocidad de recorrido**

La velocidad de recorrido o de desplazamiento es la rapidez con que el electrodo se desplaza a lo largo de la unión. La velocidad de recorrido correcta es aquella que produce una franja de soldadura con el perfil y el aspecto correctos, son varios los factores que determinan cuál debe ser la velocidad correcta:

- 1) Tipos de corriente de soldadura, amperaje y polaridad
- 2) Posición de soldadura
- 3) Rapidez de fusión del electrodo
- 4) Espesor del material
- 5) Condición de la superficie del metal base
- 6) Tipo de unión
- 7) Embonamiento de la unión
- 8) Manipulación del electrodo

### **1.1.15.-Eliminación de escoria**

La minuciosidad con que se elimina la escoria de cada franja de soldadura antes de soldar sobre ella influye directamente en la calidad de las soldaduras de múltiples pasadas. Si no se limpia exhaustivamente cada franja, aumenta la probabilidad de atrapar escoria y, por tanto, de producir una soldadura defectuosa. Para la eliminación completa y eficiente de la escoria es necesario que cada franja tenga el perfil apropiado y que se funda en forma continua con la franja o el metal base adyacente.

## **1.2.- METALURGIA DE LA SOLDADURA**

### **1.2.1.-Soldabilidad de los Metales**

La American Welding Society define a la soldabilidad como “La capacidad de un material para ser soldado bajo las condiciones de fabricación impuestas dentro de una estructura específica y convenientemente diseñada y para tener un rendimiento satisfactorio en el servicio que se pretende”. Esta definición incluye muchas afirmaciones por Ejemplo, ¿Es adecuado el diseño?, ¿es satisfactorio el metal ?, ¿Procesos y procedimientos de soldadura ?, una definición más practica podría ser “la facilidad con la cual se pueda soldar satisfactoriamente y que se logre una unión igual al metal que se está soldando”.

En cualquiera de estas definiciones es importante saber todo acerca de los metales que se van a soldar, el diseño de la soldadura, y los requerimientos de servicios, incluyendo las cargas y el ambiente al cual se expondrán. Tal vez la mejor definición sea que un material soldable logre que la coyuntura sea igual en todos los aspectos al metal base , en otras palabras, una unión 100% soldada.

El metal base o el metal que se va a soldar deben considerarse desde todos los puntos de vista. Esto incluye sus propiedades físicas, sus propiedades mecánicas, la composición y la estructura química.

Las propiedades físicas no siempre son idénticas en los materiales de la misma composición. Esto se relaciona con el tamaño de la muestra de prueba, con el método de prueba, y con el tipo de microestructura. Las propiedades mecánicas pueden ser diferentes

para cada uno de los materiales, aun cuando corresponda a la misma especificación o clase. Por ejemplo, la dureza está relacionada con la estructura, la cual se ve afectada por los antecedentes térmicos o por el empleo de calor. La dirección de las pruebas tiene un gran efecto sobre los niveles de fuerza, dureza y ductilidad. Además, la composición y la microestructura pueden variar. En el material pesado, la composición puede tener más carbono o aleación para proporcionar la fuerza exigida por la especificación, y la estructura cambiará desde el exterior hasta el centro, basándose en la diferencia de las velocidades de enfriamiento cuando se elaboró el material.

Para determinar mejor la soldabilidad, es necesario efectuar varias suposiciones:

1. El material para soldar es satisfactorio para el uso que se pretende. En otras palabras, proporcionará las propiedades necesarias y adecuadas para soportar los requerimientos del servicio.
2. El diseño de la soldadura es adecuado para el uso que se pretende. Al considerar el diseño de la soldadura hay que incluir el diseño de la parte por soldar.

Después de tomar en cuenta estas suposiciones, es necesario examinar la coyuntura de la parte por soldar. La unión de la soldadura que se requiere tiene que tener fuerza uniforme, ductilidad, muesca dura, resistencia a los esfuerzos continuos, defenderse de la corrosión por medio de la soldadura y el material adyacente.

La mayoría de soldaduras implican el uso de calor y al agregar una estructura metalúrgica diferente respecto del metal base no afectado. Las soldaduras también pueden incluir defectos como huecos, fracturas y materiales atrapados.

El objetivo es lograr soldar sin problemas. Las fracturas por calor fuerte pueden resultar por cualquiera de los siguientes cuatro factores: estiramiento, forma de la soldadura, energía por calor excesivo o composición del material. Puede resultar por cualquier factor, pero es mucho más probable cuando se combinan dos o más factores.

En cualquier tipo de soldadura siempre hay estiramiento porque a medida que se solidifica adquiere fuerza, pero continúa enfriándose y encogiéndose. Es el grado de estiramiento lo que se vuelve crítico. El estiramiento se relaciona con el diseño de la soldadura, con el diseño de la pieza por soldar, y con el grosor de los materiales que se están uniendo.

La forma de la soldadura también es una función del diseño de la misma, del diseño de la pieza por soldar, y del procedimiento de soldadura. El procedimiento de soldadura se relaciona con el lugar que se va a soldar o con los rebordes en la soldadura, con la forma de los rebordes y con la que tiene la superficie terminada de la parte soldada.

El tercer factor es la composición química del metal. Si embargo, la segregación es importante, puesto que las impurezas, como el azufre y el fósforo, tienden a formar películas con un punto de fundición bajo entre los granos solidificantes del metal. Estas impurezas se relacionan con el detalle de la coyuntura de la soldadura y con el proceso de soldadura, puesto que afectan a la cantidad de dilución. El desgarre de las láminas también está asociado con las impurezas del metal base y su fuerza transdireccional. Cuando el grado de estiramiento aumenta, tal como sucede con los metales más gruesos, este problema se vuelve mas serio.

Los cuatro principales factores que afectan a la fractura de la zona afectada por el calor son:

- El espesor del metal base y el tipo de soldadura
- La composición del metal base
- El proceso de soldadura y tipo de material de aporte
- El gasto de energía y las temperaturas de calentamiento previo.

Los efectos de los cuatro factores están interrelacionados. El espesor de la composición del metal lo establece el diseño. La configuración de la unión de la soldadura, el tipo de metal de aporte y el procedimiento de la soldadura pueden contribuir a que se efectúe una fractura tipo HAZ. El consumo de energía puede modificarse por el proceso de soldadura, por el procedimiento que se utilice y por la temperatura del calentamiento previo a la soldadura. Estos también se pueden modificar para reducir la velocidad de enfriamiento.

Todos los factores anteriores determinan el tipo de microestructura que ocurrirá en la zona afectada por el calor. Los dos factores más importantes para la soldabilidad son la capacidad de endurecimiento y la susceptibilidad a las fracturas de la estructura endurecida. Ambas se incrementan usando un contenido de carbono más alto y de aleación más alta en el metal base. Ciertos elementos de aleación incrementan la capacidad de endurecimiento

sin un incremento significativo en la susceptibilidad de las fracturas. En este aspecto el equivalente del carbono del metal base se vuelve importante. La formula del equivalente de carbono se puede ver a continuación:

$$C.E = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Ni}{20} + \frac{\%Cr}{10} + \frac{\%Mo}{10} + \frac{\%Cu}{40}$$

Los aceros al carbono sin mezcla, que tienen un equivalente de carbono de no más del 0,40% se consideran fáciles de soldar. Este equivalente de carbono puede incrementarse hasta 0,45%, siempre y cuando el carbono no exceda del 0,22%, el fósforo no exceda del 0,06% y el espesor del acero no tenga mas de ¾ de pulgada (19,1 mm). Generalmente, cuando el equivalente de carbono excede de 0,40% se requieren controles especiales. Se debe usar el proceso de hidrógeno bajo o metales de aporte. Hay que utilizar energía por calor mas alta y se puede requerir calentamiento previo. Cuando el equivalente de carbono excede 0,60%, se requieren procesos de hidrógeno bajo; si el grosor excede de ¾ de pulgada hay que emplear calentamiento previo. La capacidad de endurecimiento está relacionada con la velocidad de enfriamiento de los metales. La velocidad de enfriamiento más rápida tiende a producir una mayor dureza. La velocidad de enfriamiento depende de la masa del metal, del proceso de soldadura, del procedimiento de soldadura, y de las temperaturas de calentamiento previo. El proceso y el procedimiento de la soldadura influyen sobre el consumo de energía que se usa para hacer la soldadura. Entre más energía se utilice más baja será la velocidad de enfriamiento. La energía por calor es una función de la corriente de soldadura, del voltaje del arco y de la velocidad de desplazamiento. Para incrementar la energía por calor, hay que aumentar la corriente de la soldadura o reducir la velocidad de desplazamiento. La corriente de la soldadura se relaciona con el proceso y con el tamaño del electrodo. La energía por calor se calcula con la fórmula que se dio anteriormente.

De este modo, al incrementar los amperios o el voltaje; aumenta la energía por calor, pero al incrementar la velocidad de desplazamiento esta disminuye. El voltaje tiene un efecto menor, puesto que varía sólo ligeramente en comparación con otros factores. En general, si se utiliza calor fuerte se reduce la velocidad de enfriamiento. Esto debe usarse con precaución, puesto que en los aceros templados y atemperados si la energía por calor es muy alta tenderá a suavizar la zona afectada por el calor y su nivel de resistencia se verá

reducido. En los aceros con capacidad de endurecimiento relativamente baja se puede producir una zona suave afectada por el calor, incrementando la energía por calor. En los aceros con capacidad de endurecimiento más alta, la tendencia hacia la fractura y la dureza máxima se verán reducidas por una velocidad de enfriamiento más lenta. Hay límites que se pueden utilizar para la cantidad de energía por calor. En este caso, se usa el calentamiento previo para reducir la velocidad de enfriamiento.

La fractura de la zona afectada por el calor depende de muchos de los mismos factores que se acaban de mencionar. Sin embargo, se deben tomar precauciones con ciertos tipos de aceros para evitar la fractura HAZ. Los aceros para construcción se pueden agrupar en cinco clasificaciones generales, dependiendo de si son o no endurecibles y de la naturaleza de la estructura endurecida. Estos deben templarse con los efectos de espesor que aumentan el estiramiento y contribuyen al problema de la fractura. Las cinco clases son las siguientes:

1. Aceros suaves no endurecibles y de bajo carbono.
2. Baja capacidad de endurecimiento con poca susceptibilidad a las fracturas cuando se endurecen, o aceros de baja aleación con un equivalente de carbono de no más de un máximo de 0,20%
3. Baja capacidad de endurecimiento con bastante susceptibilidad a las fracturas cuando se endurece, normalmente aceros al manganeso carbono, con menos de un 0,25% de carbono y no más de 1 % de manganeso.
4. Aceros con alta capacidad de endurecimiento y baja susceptibilidad a la fractura cuando se endurecen. Esto incluye a la mayoría DE LOS ACEROS DE BAJO CARBONO con baja aleación y alta resistencia generalmente con un carbono de menos del 0,15% , un manganeso hasta del 1,5%, níquel hasta de 1,5%, cromo al 0,25%, molibdeno hasta 0,25% y vanadio hasta de 0,20%.
5. Aceros altamente endurecibles con alta susceptibilidad a las fracturas cuando se endurecen. Esto incluirá a los aceros de aleación con un carbono que no excediese del 0,25% pero con aleaciones.

Hay varias precauciones que deben tomarse en cuenta con las cinco clasificaciones, y son las siguientes:

1. Precauciones no extraordinarias que se requieren cuando se sueldan materiales con un espesor de delgado a mediano.
2. Uso de procesos de hidrógeno bajo y de materiales de aporte y utilización de calentamiento previo para secciones gruesas o incremento de energía por calor
3. Los procesos de hidrógeno bajo son recomendables, pero no esenciales. Se debe usar energía por calor alta, y no se requiere calentamiento previo, excepto con los materiales más gruesos, y deben fluctuar entre 250 a 350°C.
4. Se requieren procesos de hidrógeno bajo, se sugieren el calentamiento previo, y los interpases, se recomienda los procesos con energía por calor alto, y el calentamiento previo se incrementa a medida que aumenta el grosor.
5. Se requieren procesos de hidrógeno bajo, calentamiento previo y temperatura de interpase entre 150 a 250°C, así como el empleo de calor después de la soldadura.

La soldabilidad es extremadamente compleja y todos los factores de la soldadura se interrelacionan entre sí. Para lograr el éxito en los trabajos de soldadura es de importancia fundamental tomar en cuenta todos los factores.<sup>2</sup>

### **1.2.2.- Capacidad de endurecimiento y enfriamiento**

El empleo de calor en los aceros para incrementar la dureza y la metalurgia de la soldadura tiene mucho en común. El uso del calor para incrementar la dureza se logra por medio de un calentamiento seguido por enfriamiento rápido del metal dentro de la soldadura y en lugares adyacentes a ella es en el mismo orden. Si se logra un endurecimiento adecuado por medio del calor serán más precisos los cambios metalúrgicos que se efectúen durante la soldadura. La mayoría de los aceros tienen capacidad de endurecimiento, lo cual se define por la propiedad que determina la profundidad y la distribución de la dureza inducida por el templado. Esta propiedad puede medirse por la prueba Jominy. En esta prueba, una barra redonda se calienta a una temperatura de zona austenítica y posteriormente se coloca en posición vertical en un soporte y una boquilla de agua se dirige hacia arriba, hasta el extremo del fondo. La barra se enfría rápidamente a la temperatura ambiente. Las mediciones de dureza se hacen entonces a lo largo de la barra, desde el extremo templado

hasta el no templado y se representan gráficamente contra distancia. Esto produce una curva de alta dureza desde el extremo templado. Esta curva de capacidad de endurecimiento muestra la dureza máxima, la profundidad de la dureza y demás aspectos similares, bajo condiciones normalizadas. Es muy útil para establecer procedimientos de endurecimiento por tratamiento térmico. Esta información también proporciona datos para la soldadura, puesto que indica el efecto de diferentes elementos de aleación sobre la dureza del acero templado. La microestructura del acero templado también puede estudiarse o relacionarse con la microestructura de las soldaduras.

En general el tamaño de grano y la microestructura se relacionan directamente con la dureza y la resistencia. Para incrementar la capacidad de endurecimiento del acero se agregan elementos de aleación. El carbono es el más importante y efectivo, el manganeso sigue en importancia. El cromo y el molibdeno también incrementan la capacidad de endurecimiento. Estas aleaciones también contribuyen con otras propiedades..<sup>3</sup>

### **1.2.1.-Alteraciones de la estructura del acero**

#### **1.2.3.1.- Contenido de carbono**

Un acero se llama hipoeutectoide siempre cuando su contenido de carbono sea por debajo del 0,77%. La imagen microscópica de estos aceros muestran perlita y ferrita. Con mayor porcentaje de perlita a medida que aumenta el porcentaje de carbono, es decir, con más contenido de carbono la dureza y la ductilidad aumentan.

Un acero se llama eutéctico siempre y cuando su contenido de carbono sea de 0,77%. El aspecto microscópico muestra perlita en todo el corte. La ductilidad y la tensión de rotura mantienen una relación excelente. Este acero se puede temprar muy bien.

Un acero se llama hipereutectoide cuando su contenido de carbono sea mayor a un 0,77%. La cementita se separa alrededor de los cristales individuales. Esta aleación es posible hasta un contenido máximo de carbono del 2,11%. Aleaciones de hierro carbono solamente se llaman Aceros cuando su contenido de carbono sea no mayor al 2,11%.

Al pasar el 2,11% el contenido del carbono es una aleación Fe-C, el carbono puede aparecer separadamente. Al segregarse el carbono en la fórmula químicamente pura como

grafito en laminillas entre dos cristales, entonces el material se llama fundición gris. La calidad de la fundición gris depende del tamaño de las laminillas de grafito.

### **1.2.3.2.- Efecto de la temperatura**

Cuando se somete un acero hipoeutectoide al efecto calorífico, la perlita se transforma con una temperatura de 721°C. También la ferrita se descompone lentamente. Cuando un acero se enfría rápidamente después de una temperatura de algo más de 900°C, las fases no disponen del tiempo suficiente como para regresar a su forma original. Se forma una estructura llamada martensita si se cumplen determinadas condiciones.

Cuando al acero de estructura austenítica se calienta hasta 1150°C aproximadamente, los cristales en tamaño crecen. Los granos de la estructura, entonces serán mucho más grandes que los granos del material anteriormente. Las propiedades así se empeoran. En este caso el acero se llama material recalentado.

### **1.2.4.- Transformaciones del acero en condiciones de soldadura**

Se encuentran dificultades cuando se aplican, en los casos de soldadura, los diagramas TTT en las condiciones clásicas de tratamiento térmico. En efecto, las condiciones muy particulares de tratamiento térmico que sufren los aceros durante la soldadura, modifican sensiblemente el desarrollo de las transformaciones. La tabla 2 compara, esquemáticamente las principales características del tratamiento “Clásico” con las de soldadura. La importancia no es despreciable en algunos casos.

Tabla 2. Comparación entre el tratamiento térmico y la soldadura

Características	Tratamiento térmico Clásico	Soldadura
<i>Calentamiento</i>		
Tiempo	30 minutos	Arco manual- automático: algunos segundos
		Electroescoria: algunos minutos
<i>Austenización</i>		
Temperatura	$A_{c3} + 50^{\circ}\text{C}$	Desde $A_{c3}$ hasta la temperatura de fusión
Tiempo	de 10 a 30 minutos	Mantenimiento a $T_{\text{máx}}$ . Prácticamente nulo
		Depende de la $T_{\text{máx}}$ . Alcanzada Arco manual y Automático algunos segundos
<i>Enfriamiento</i>		
Duración (tiempo 800 - 500°C)	Desde algunos segundos hasta varias horas	Arco manual: 5 a 30 segundos Arco Automático: 5 s hasta varios minutos Electroescoria: varios minutos

Las particularidades de las condiciones de soldadura pueden ser resumidas en algunos puntos importantes que afectan el trazado de los diagramas CCT-S.

- El factor primordial es la temperatura máxima, que es variable por encima de  $A_{c3}$ , hasta la temperatura de fusión.
- La velocidad de calentamiento, que es netamente superior depende de los otros tratamientos térmicos.
- Por el contrario el tiempo de austenización es muy corto y ello trae aparejado modificaciones sensibles en el estado austenítico.
- Las velocidades de enfriamiento varían en amplia gama, sin embargo, son más restringidas que las empleadas en los tratamientos térmicos clásicos. En soldadura las velocidades de enfriamiento, en ciertas condiciones, son mayores aún que las que se logran en un temple en agua.

Independientemente de la gran cantidad de ensayos de soldabilidad conocidos, pero que principalmente se refieren a la recepción de los productos de acero, es fácil deducir que son pocos los datos precisos que se obtienen del dominio de la metalurgia de la soldadura. Esto se debe a la complejidad de los fenómenos y por ello, hasta el momento, sólo se tenían en cuenta dos aspectos para verificar la soldabilidad de los aceros estructurales : limitar el carbono equivalente y la dureza bajo el cordón.

La noción de carbono equivalente, dada por las distintas fórmulas de cálculo, son relativamente independientes de las condiciones de soldadura. Ellas surgen de una evaluación de la templabilidad, que tiene en cuenta el endurecimiento debido a las transformaciones estructurales pero no al debido a la martensita, que es función únicamente del tenor de carbono. Por otra parte, las comparaciones sobre la base del carbono equivalente no son válidas más que para los aceros de propiedades similares y para los cuales las fórmulas fueron establecidas<sup>4</sup>.

#### **1.2.5.- Soldadura**

La ciencia de unir metales por soldadura se relaciona estrechamente con el campo de la metalurgia. La metalurgia se relaciona con la ciencia de producir metales a partir de minerales, de hacer y componer aleaciones, y de las reacciones de los metales hacia muchas actividades y situaciones diferentes. El empleo del calor, la fabricación y el procesamiento de acero, el forjado y las fundiciones utilizan la ciencia de la metalurgia. La metalurgia de la soldadura se puede considerar una rama especial, puesto que una reacción se lleva a cabo en minutos, segundos y fracciones de segundos, mientras que en otras ramas las reacciones se efectúan en horas y minutos.

La metalurgia de la soldadura trata de la interacción de diferentes metales y de la interacción de los metales con gases y sustancias de todo tipo. El metalurgista de soldadura también tiene que conocer los cambios de las características físicas que suceden en periodos cortos. La solubilidad de los gases en los metales y el efecto de las impurezas son de gran importancia para el metalurgista de la soldadura.

Un estudio general de la soldadura, incluye factores y prácticas metalúrgicas. La estructura de los metales es compleja. Cuando el metal se encuentra en estado líquido, generalmente

muy caliente, no tiene una estructura distinta o distribución ordenada de átomos, los átomos se mueven libremente entre sí, dentro de los confines del líquido. Su movilidad permite que el metal líquido se flexione a la presión más ligera y que se ajuste a la forma del recipiente. Este grado de movilidad de los átomos se debe a la energía del calor implícita durante el proceso de la soldadura.

A medida que el metal fundido se enfría la energía por calor de los átomos en estado líquido disminuye y los átomos se mueven menos. Conforme la temperatura se reduce aún más y el metal se enfría, los átomos ya no se pueden mover y se atraen entre sí en base a diferentes formas. Estas formas consisten en patrones tridimensionales conocidos como reticulado, los cuales están hechos de líneas imaginarias que conectan los átomos en base a distribuciones simétricas. Estas líneas imaginarias aproximadamente están a la misma distancia entre sí y limitan el movimiento. Los metales, en estado sólido, poseen esta distribución uniforme, denominada cristal.

La distribución general de los granos, el límite de los granos, y las fases en que está una aleación se conocen como microestructura. La microestructura es responsable de las propiedades del metal. Se ve afectada por la composición o el contenido de aleación o por otros factores, el estiramiento, la forma de emplear el calor y otros. En la microestructura del metal de la soldadura en el metal adyacente influyen el proceso de soldadura y el procedimiento de soldadura, los que afectarán las propiedades de la soldadura.

Cualquier cosa que se haga al metal y que altere o distorsione la estructura hace que el metal se endurezca. El trabajar en frío un metal distorsiona la estructura y por tanto lo endurece. La presencia de átomos extraños en la estructura por medio de adiciones de aleaciones distorsiona la estructura y tiende a endurecerla. Cuando los átomos se disuelven en una estructura de estado sólido y luego se precipitan hacia fuera, la estructura se distorsiona y por consiguiente endurece.

Los límites de los granos contienen materiales con punto de fundición más bajo puesto que dichos límites son la última porción que se solidifica. La fuerza de los metales se determina algunas veces por los límites de los granos. Los límites de los granos incrementan la fuerza de algunos materiales a la temperatura cambiante inhibiendo la deformación de cada uno de los granos cuando el material se estira. A temperaturas

elevadas, los átomos de los límites se pueden mover fácilmente y deslizarse más allá del otro, reduciendo de este modo la fuerza del material. Los materiales de granos finos tienen mejores propiedades a la temperatura ambiente.<sup>5</sup>

Cuando se hace una soldadura ocurren cambios de temperatura, cambio de dimensiones, crecimiento de cristales y granos, fase de transformación y otras. El tipo de proceso de soldadura determina, en general, la forma en la que éstos sucederán. En el proceso de soldadura de arco el ciclo de calor es de importancia primordial. En la sección anterior se explicó la relación de energía por calor tiempo- temperatura o ciclo térmico. La velocidad de enfriamiento o templado es de importancia fundamental y está controlada por el proceso, procedimiento, metal y masa. En el proceso electroescorial la velocidad de enfriamiento es baja, mientras que en el arco de metal y de gas es más rápida. El ritmo de cambio disminuye a medida que es mayor la distancia desde el centro de la soldadura. Es obvio que fluctúa considerablemente la velocidad del enfriamiento, y que resultarán distintas microestructuras.

Con cualquier proceso de arco, en el que el metal se transfiere a través del mismo, el metal alcanza una temperatura sobrecalentada muy por arriba de la temperatura de fundición que se muestra en el diagrama de hierro - carbono. Cuando se deposita en la soldadura se funde o en la fase líquida. Inmediatamente, el metal de la soldadura empieza a congelarse o a solidificarse. El calor contenido en el metal fundido se transmite al metal base y su temperatura en la soldadura se incrementa a la etapa de fundición. A lo lejos de la soldadura el metal presenta una temperatura más baja. Esto crea una multitud de curvas de tiempo - temperatura basadas en la ubicación. A medida que el metal de la soldadura se congela los cristales forman granos, los cuales se enfrían rápidamente hasta que ya no haya metal líquido. La velocidad de enfriamiento es mucho más rápida de lo que sucede en una pieza fundida o lingote, y por consiguiente, el equilibrio, tal como se representa en el diagrama de hierro carbono, realmente no se efectúa.

Además de las complicaciones originadas por el rápido enfriamiento también surge complicación en relación con las variaciones de la composición. A medida que el metal de la soldadura se deposita sobre el metal base parte de éste se funde y se mezcla con el metal de la soldadura, produciendo la dilución de este último. A menos que la composición que

la composición del metal de aporte depositado y la composición del metal base sean idénticas habrá, una variación de la composición del metal en las superficies de separación. En las soldaduras de multipases, el primer pase tendrá un alto factor de dilución, el del segundo pase será menor, y el tercer pase tendrá muy poca o ninguna. Cuando se suelda sobre un metal base con una composición diferente del metal depositado esta variación puede ser considerable. Las variaciones tanto en la composición como en las velocidades de enfriamiento darán lugar a variaciones en la microestructura. Esta es la razón por la cual la microestructura de la soldadura es importante y debe estudiarse. Cada microestructura tiene sus características particulares, tal como se expuso anteriormente. Una de las características más importante es la dureza de la microestructura a través de toda el área de la soldadura. La dureza no debe variar sobre limitaciones específicas. Se observa la mayor dureza del metal de la soldadura comparada con el metal base y que en la zona afectada por el calor la dureza está entre estos dos valores.

El área entre la superficie de separación del metal de soldadura depositado, y que se extiende hasta el metal base lo suficientemente lejos como para que ocurran cambios de fase, se conoce como zona afectada por el calor (HAZ). La zona afectada por el calor, aunque es parte del metal base, se considera una porción de la unión de la soldadura, puesto que influye sobre el tiempo que dure la soldadura. La zona afectada por el calor y la zona de mezclado son las más críticas en muchas soldaduras. Por ejemplo, cuando se suelda un acero endurecible la zona afectada por el calor puede aumentar de dureza hasta un nivel indeseable. Por otra parte, cuando se suelda un acero endurecido la zona afectada por el calor puede volverse suave puesto que el calor de la soldadura ha templado al metal endurecido. En el caso de la soldadura electroescorial, la zona afectada por el calor contendrá granos extremadamente grandes debido y que la alta temperatura se prolongó demasiado y a la posibilidad de que creciera el grano. La dureza del metal soldado, del metal base, y de la zona afectada por el calor de una soldadura electroescorial será relativamente uniforme.

Cuando el metal base y el arco del metal de la soldadura son de un análisis completamente diferente la zona de las superficies de separación contienen aleaciones que pueden ser perjudiciales. Normalmente se observa la zona afectada por el calor del metal base y la pequeña cantidad del mezclado del depósito de acero inoxidable de color más claro que el

metal base. En este caso, la mezcla de la aleación producida es de una cantidad tan pequeña que no tiene un efecto apreciable sobre las propiedades generales de la unión de la soldadura.<sup>6</sup>

### **1.2.6.- 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 lo que se observa 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 pocillo de metal fundido tienen una temperatura considerablemente más elevada que en los hornos de fusión. Como resultado del enfriamiento rápido del pocillo de soldadura, las reacciones químicas que se inician en el metal fundido y en la escoria no tienen tiempo para completarse.

Al avanzar la formación del cordón, la temperatura del pocillo de soldadura desciende, debido a la abstracción del calor hacia el metal 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 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.

La solidificación uniforme del pocillo del 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. 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. En una ranura que es más ancha que profunda (relación de aspecto mayor a la unidad), las bolsas de metal fundido que se forman al final estarán en la parte media de la superficie de la soldadura, eliminándose todas las impurezas del metal de la soldadura.

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).

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 de 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.

Una junta soldada está constituida por diferentes zonas: el cordón de soldadura, la zona afectada por el calor, y el metal base no afectado térmicamente, como se puede observar en la figura 1.

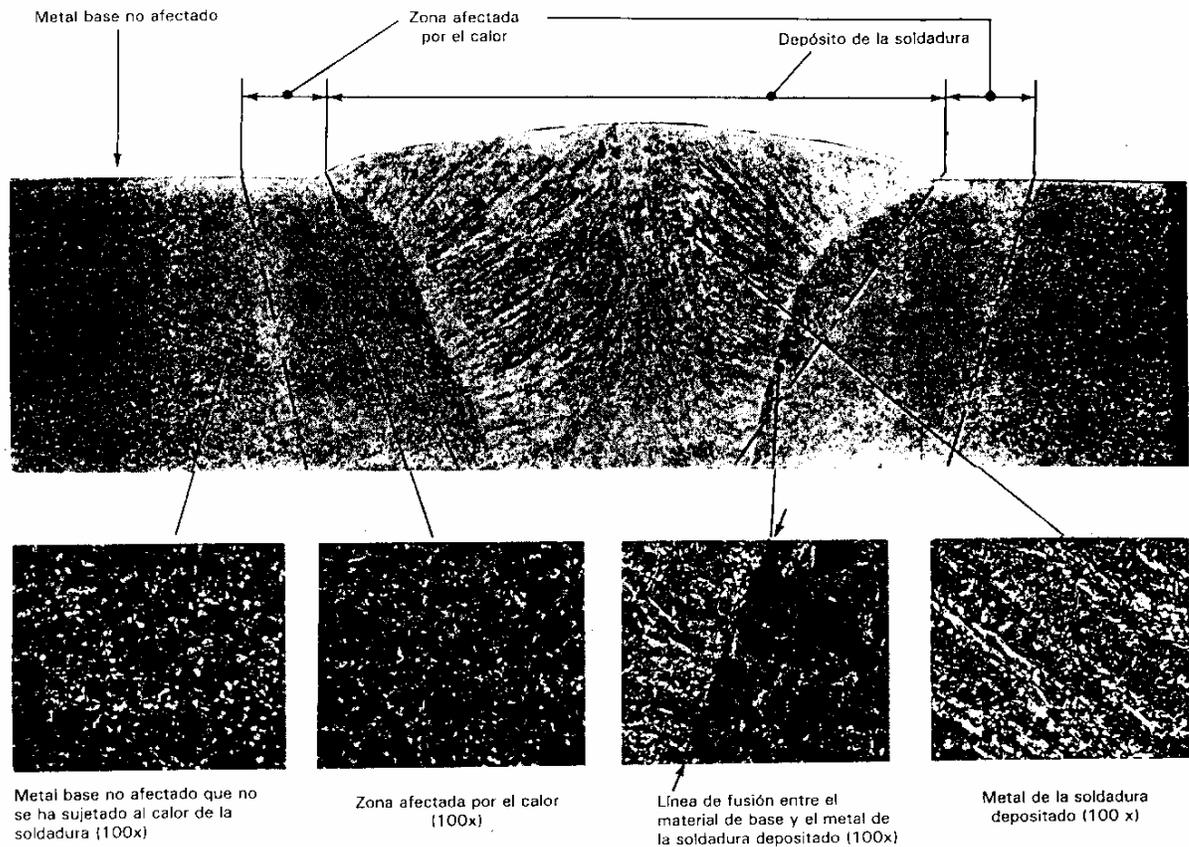


Fig 1. Zona afectadas por el calor en una soldadura

La metalurgia de cada una de estas zonas está íntimamente relacionada con las características del metal base, el metal de aporte y el procedimiento de soldadura utilizado.

Todos los procesos de soldadura por arco eléctrico presentan una zona donde el material ha fundido totalmente y otra zona dentro de la cual ha sufrido un calentamiento, tal como se muestra en la figura 1 señalando a cada sub-zona con la designación que le corresponde. Además, debe señalarse que todo el proceso de soldadura ocurre en un tiempo muy breve, con temperaturas extremas que van desde la de fusión hasta aquéllas que ya no afectan a la estructura del metal base y lógicamente originan velocidades de enfriamiento variables, en cada y dentro de cada zona, pero todas ellas sumamente rápidas y, en las proximidades del

cordón, superiores a las que se logran en el tratamiento térmico de temple. Estas condiciones no habituales traen como consecuencia dilataciones y contracciones localizadas, reacciones químicas entre el metal fundido y la atmósfera ambiente, modificaciones metalográficas profundas en pequeñas distancias y alteraciones de las propiedades mecánicas y físicas del material.

La distribución de la temperatura y la velocidad de enfriamiento en cada zona del cordón y sus adyacencias está influenciada por (1) el aporte de energía expresado en joules por centímetro, (2) la temperatura inicial o de precalentamiento ( $t_0$ ), (3) por la geometría de la junta, o sea, espesores y forma, (4) las características térmicas del material, (5) el diámetro del electrodo y (6) condiciones particulares de enfriamiento, influencia de la escoria o de las placas de enfriamiento de la soldadura electroescoria o electrogas, por ejemplo. <sup>(7)</sup>

Se observa que los tiempos de permanencia del punto considerado a la temperatura máxima aumentan con el aporte de energía y que ellos provoca una disminución de las velocidades de enfriamiento. Por otra parte la temperatura de precalentamiento disminuye la velocidad de enfriamiento pero no afecta el tiempo de permanencia a temperaturas próximas a la máxima alcanzada.

Queda demostrado que es posible actuar sobre el aporte de energía y la temperatura del precalentamiento para controlar el tiempo de permanencia del acero por encima de una dada temperatura y la velocidad de enfriamiento en la zona afectada por el calor; también es posible actuar sobre el ancho de la ZAC. <sup>(8)</sup>

Es conveniente aclarar que la disipación del calor producido por el arco eléctrico de una soldadura se efectúa casi exclusivamente por conducción, resultando despreciables los efectos de convección y radiación. <sup>(9)</sup>

La variación de la longitud del arco está determinada fundamentalmente por las diferencias entre la velocidad de alimentación del consumible y su velocidad de fusión, siendo directamente proporcional a la tensión de soldadura. Para un diámetro del electrodo, la velocidad de fusión depende principalmente de la corriente de soldadura, que será proporcional a la velocidad de alimentación de aquél. <sup>(10)</sup>

1. *Cordón de soldadura*: es la región que ha sido fundida durante el proceso de soldadura y se compone de metal base y material de aporte; aunque algunas soldaduras se producen

sin material de aporte, como en el caso de aquéllas realizadas mediante el proceso de soldadura por resistencia eléctrica. La composición química del cordón de soldadura depende de la composición del metal base y del material de aporte, así como de la relación que exista entre la cantidad de material base fundido, y la cantidad de material de aporte agregada durante la soldadura (dilución). Adicionalmente, elementos presentes en el área de la soldadura pueden afectar la composición del cordón si éstas entran en contacto con el metal fundido. Elementos tales como oxígeno, el nitrógeno y el hidrógeno pueden aparecer como contaminantes cuando el metal fundido no se protege adecuadamente de la atmósfera. En general, estos elementos son perjudiciales para la soldadura.

2. *Zona afectada por el calor (ZAC)*: es aquella zona del material base, que por estar adyacente al metal fundido, es afectada por el calor generado durante el proceso de soldadura. Esta zona se define frecuentemente en función de su dureza (determinando perfiles de dureza), o de su microestructura (ver fig 1). Los fenómenos metalúrgicos que ocurren en esta zona son determinados por los ciclos térmicos que sufre el material. Estos ciclos dependen de: la cantidad de calor suministrada durante el proceso de soldadura, la temperatura del material base inmediatamente antes de realizar la soldadura, del espesor y geometría de la junta a soldar. Mediante el control de los dos primeros factores se pueden modificar, en cierta forma, las características de la zona afectada por el calor. Entre los efectos que se producen en el material base como consecuencia de los ciclos térmicos están :

2.1 Cambios microestructurales: dilución o precipitación de fases, crecimiento de grano, etc.

2.2 Variación de las propiedades mecánicas: resistencia de cedencia, resistencia a la tracción, tenacidad, dureza, etc.

2.3 Disminución de la resistencia a la corrosión.

2.4 Generación de esfuerzos residuales.

3. *Suministro de calor*: el calor suministrado durante la producción de una unión soldada es un factor que afecta las temperaturas y velocidades de enfriamiento del cordón de soldadura y de la zona afectada por el calor. Al aumentar el suministro de calor, se

obtienen mayores temperaturas y menores velocidades de enfriamiento. En ciertas aplicaciones se requiere de un mínimo suministro de calor para prevenir el agrietamiento del material; mientras que en otras, se especifica un máximo para prevenir su ablandamiento; como el caso de los aceros templados y revenidos, o para prevenir problemas de corrosión en los aceros inoxidable austeníticos. Los factores que determinan la entrada de calor en un procedimiento de soldadura son: la intensidad de la corriente de soldadura, el voltaje de soldadura, y la velocidad de avance. La entrada de calor generalmente se especifica en unidades de energía de longitud (por ejemplo: julios/milímetros o julios/ pulgadas).

4. *Temperatura del material:* la temperatura del material base, antes de realizar la soldadura, influye directamente en las velocidades de enfriamiento de la unión soldada. Al aumentar la temperatura (precalentamiento), las velocidades de enfriamiento disminuyen produciendo ciertos efectos que serán discutidos con más detalles más adelante.
5. *Espesor del material:* al aumentar el espesor del material, aumentan las velocidades de enfriamiento del depósito de soldadura y de la zona afectada por el calor. Esto es importante en los aceros estructurales ya que al aumentar el espesor del material aumenta las posibilidades de obtener microestructuras duras (martensita) durante la fabricación por soldadura, lo cual puede ser perjudicial en servicios donde se requiera buena tenacidad y ductilidad.
6. *Metal base:* la tercera zona que compone una unión soldada es el metal base propiamente dicho. La mayoría de los materiales que se utilizan hoy en día son soldables. La selección de un material para una aplicación que involucra soldadura requiere que se considere su soldabilidad; entendiéndose por soldabilidad la capacidad de un metal o combinación de metales de ser soldados en condiciones de fabricación y comportarse satisfactoriamente en el servicio requerido. Uno de los principales problemas que se presenta al soldar cierto tipo de materiales es el agrietamiento. Básicamente existen dos tipos fundamentales de agrietamiento: agrietamiento en frío o por hidrógeno, y el agrietamiento en caliente.

7. *Agrietamiento en frío*: este problema se presenta en la soldadura de los aceros, y se produce por la combinación simultánea de tres factores:

- a) Presencia de hidrógeno en la soldadura
- b) Microestructuras susceptibles al agrietamiento (duras)
- c) Esfuerzos en la soldadura

Este tipo de agrietamiento se produce después que el material ha solidificado; pudiéndose presentar, incluso, después de varias semanas de haber puesto la pieza soldada en servicio.

8. *Hidrógeno en la soldadura*: el hidrógeno puede entrar en la soldadura a partir de cualquiera de las siguientes fuentes de contaminación: grasa o aceite en la superficie del metal base o material de aporte; humedad en el revestimiento de los electrodos, fundentes de soldar, gases de protección, o en la superficie de la pieza de soldar; cierto tipo de óxidos superficiales.

9. *Microestructuras susceptibles*: como regla general, mientras más duro sean el depósito de soldadura y la zona afectada por el calor, mayor será la susceptibilidad de los aceros al agrietamiento por hidrógeno. La microestructura que presenta mayor tendencia al agrietamiento en los aceros es la martensita por su elevada dureza.

10. *Esfuerzos*: los esfuerzos en el material soldado se producen inevitablemente debido a las expansiones y contracciones que sufre el material como consecuencia de los ciclos térmicos que se producen durante el proceso de soldadura.

Métodos para prevenir el agrietamiento por hidrógeno de la soldadura:

- a) Evitar cualquier fuente de contaminación de hidrógeno en la junta a soldar y en los materiales de aporte.
- b) Utilizar electrodos y fundentes de bajo contenido de hidrógeno. El almacenamiento y manejo de este tipo de materiales requiere de cuidado para evitar que éstos absorban humedad del ambiente.
- c) Prevenir mediante el ajuste apropiado de las variables del procedimiento de soldadura la obtención de microestructuras susceptibles al agrietamiento. Estas variables incluyen el suministro de calor, la temperatura de precalentamiento, la

temperatura entre pases y el tratamiento térmico posterior a la ejecución de la soldadura.

- d) Evitar la rigidez excesiva de las piezas a soldar y cualquier condición de desalineamiento que pudiese originar altas concentraciones de esfuerzos.

11. *Agrietamiento en caliente*: el agrietamiento o fisuración en caliente se produce en una soldadura durante su proceso de enfriamiento, y antes de que el material logre alcanzar la temperatura ambiente. Este tipo de agrietamiento generalmente se produce en el depósito de soldadura, pero también puede presentarse en la zona afectada por el calor. Los factores que determinan este tipo de agrietamiento son:

- a) Los esfuerzos que se producen durante la ejecución de la soldadura debido a las expansiones y contracciones del material
- b) La susceptibilidad del material al agrietamiento la cual depende de su composición química y microestructuras.
- c) La presencia de impurezas, tales como azufre y fósforo en los aceros o de plomo y cobre en aleaciones de aluminio favorecen su aparición.

Entre los materiales que presentan mayor tendencia a este tipo de agrietamiento están: las aleaciones de aluminio, los aceros inoxidable austeníticos y las aleaciones de níquel.<sup>11</sup>

### **1.2.7.- Alteraciones en la Estructura Causadas por la Soldadura**

Para hacer una soldadura de fusión se necesita mucho calor. Este calor licua el electrodo y produce un baño líquido de fusión en la pieza de trabajo.

El calor introducido en la pieza de trabajo pasa hacia las partes frías, adyacentes a la zona de soldadura. Así resulta que no solamente la junta, sino también las zonas adyacentes se someten al efecto calorífico. La temperatura es más alta en la misma costura y disminuye hacia los lados.

De acuerdo a las diferentes temperaturas, la estructura de la pieza está influenciada como sigue :

- a) La zona de soldadura (costura): el baño de fusión se enfría y el material licuado se solidifica bastante rápido debido al poco ancho de la junta (zona de soldadura) y al cese de aplicación de calor del arco avanzado. Con electrodos desnudos o con revestimiento delgado el enfriamiento y la solidificación se produce inmediatamente tras el paso del arco voltaico. El enfriamiento rápido causa dentro de la costura una estructura de fusión con cristales en forma de varilla. Estos cristales están colocados verticalmente a la superficie de la costura y sus cantos, es decir, a aquellas partes de la costura que transmiten el calor. Esta estructura de fundición reduce bastante la posibilidad de deformación de la costura.
- b) *Las zonas de transición* : la temperatura alta dentro de la zona de soldadura recalienta las zonas inmediatamente adyacentes a la costura y produce un aumento en los granos de la estructura. El ancho de la zona recalentada como el tamaño del aumento de los cristales depende tanto del calor introducido por el electrodo, como también de la velocidad de la soldadura, es decir, de la velocidad con la cual se pasa con el electrodo. Como la temperatura del arco depende de la corriente, se puede decir: una corriente muy alta produce una temperatura muy alta, y una temperatura alta produce una zona ancha de estructura gruesa. Debido a lo expuesto se debe evitar la soldadura con exceso de corriente. La zona que sufrió temperaturas más ventajosas, adyacentes a la zona de estructura gruesa, muestra una estructura normalizada. La estructura normalizada muchas veces tiene propiedades mejores que la estructura de la misma pieza de trabajo. Como ya fue mencionado, el ancho de las zonas de transición depende del calor introducido por la corriente de soldadura. Así resulta que estas zonas de transición son más pequeñas cuando se usan electrodos desnudos para la soldadura. Las zonas de transición se aumentan de acuerdo al aumento del espesor del revestimiento de los electrodos. Las zonas de transición son las más grandes en la soldadura autógena.<sup>13</sup>

### **1.2.8.- Efectos del calor en la soldadura**

Al analizar los efectos del calor sobre una soldadura, una unión soldada, es necesario determinar:

1. La velocidad de calentamiento
2. La máxima temperatura que se logrará
3. El tiempo que se mantendrá la temperatura
4. La velocidad de enfriamiento.

Estos factores son difíciles de determinar; sin embargo, se puede hacer un análisis adecuado de los efectos potencialmente peligrosos sobre la soldadura. Esto permite cambiar las precauciones o los procedimientos para reducir los efectos perjudiciales.

La tasa de calentamiento depende de varios factores, entre los cuales se incluyen: el tamaño y la intensidad de la fuente de calor, la adecuada transferencia de calor al metal base, la utilización del calor al hacer una soldadura, la masa del metal base, la geometría de la unión y la conductividad térmica. La conductividad térmica, la habilidad para transmitir calor a través de toda su masa es de gran importancia cuando se considera la velocidad de calentamiento. No se pueden dar fórmulas para proporcionar respuestas exactas; sin embargo, la relación de la conductividad térmica de un metal contra otro proporciona una clave. Por ejemplo, el acero tiene tan solo aproximadamente un décimo de la conductividad térmica del cobre. La temperatura máxima que se logrará en el metal base también es importante. El metal base de la soldadura debe elevarse a su temperatura de fundición y por arriba de ella. Es importante determinar qué tanto por arriba, ya que de eso depende el proceso de soldadura. Una soldadura bien hecha no requiere que el metal base se caliente muy arriba de su temperatura de fundición. Los procesos de soldadura que utilizan fuentes de calor de temperatura extremadamente alta, como el haz de electrones o el rayo láser, pueden aumentar la temperatura del metal base a un nivel tan alto que se volatilizará el metal. Esta es la razón por la cual se pueden usar algunos procesos, tanto para soldadura como para corte, dependiendo del calor absorbido.

El tiempo que se mantendrá la temperatura al máximo depende del control de un equilibrio de calor entre la energía por calor y las pérdidas del mismo. Rara vez hay un equilibrio de calor verdadero en cualquier tipo de soldadura. Durante el periodo de formación de arco, la energía por calor casi siempre excede a las pérdidas de calor y el metal base se vuelve más caliente. Muchas veces el soldador debe esperar que el trabajo se enfríe cuando la pudelación de la soldadura se vuelve demasiado grande y difícil de manejar. La corriente disminuye o el arco se rompe, y la energía por calor se reduce o se suspende. Las pérdidas de calor continúan, y la pudelación y el metal base empiezan a enfriarse. Casi siempre, la temperatura de la pieza, cerca del arco, aumenta al máximo. Tan pronto como el arco se mueve hacia adelante, la temperatura adyacente a la soldadura empieza a disminuir. Entre más tiempo el metal base, adyacente a la soldadura, permanezca a temperatura alta, más probable será que se formen fibras en el metal de la soldadura y en el área afectada por el calor. La cantidad del metal fundido, la energía y la pérdida de calor afectan esta relación.

La velocidad e enfriamiento de la soldadura y del metal adyacente es el cambio de temperatura desde las temperaturas de soldadura hasta la del ambiente. La velocidad de enfriamiento puede controlarse bastante bien por condiciones de transferencia de calor y la conductividad térmica del metal base. Sin embargo, hay que considerar varios factores que se pueden usar para regular la velocidad de enfriamiento. El más importante es la temperatura inicial del metal base antes de la soldadura. Un calentamiento previo bastante alto ayudará a que se enfríe mas lentamente. El segundo factor de importancia es la energía por calor que se puede dar a la soldadura después de soldar. Por lo general se desea reducir la velocidad de enfriamiento si hay problemas metalúrgicos, por ejemplo roturas o zonas duras. Las zonas duras adyacentes a una soldadura o en ella por lo general son pocas duras, muy dúctiles tienden a romperse si hay tensiones térmicas. Al reducir la velocidad de enfriamiento éstos pueden eliminarse y lograrse soldaduras de calidad. Los factores que incrementan la energía por calor disminuirán la velocidad de enfriamiento, lo que reducirá la posibilidad de que se observen estos defectos.

En la aleación hierro - carbono, el carbono ejerce mucha influencia sobre las propiedades del material. Sólo una pequeña variación del contenido de carbono produce un cambio determinante en las propiedades del material<sup>14</sup>.

### **1.2.11.- Elementos de aleación que forman carburos**

La influencia sobre la templabilidad de los elementos aleantes, cuando ellos forman carburos no disueltos e inclusiones no metálicas afectan el tenor de carbono de la austenita y al mismo tiempo, el tamaño de grano. Estos dos factores influyen la posición de las curvas de transformación.

Los elementos de aleación que tienen gran afinidad con el carbono y que se encuentran en las condiciones requeridas para formar carburos en el dominio de la austenita, la empobrecen en carbono. Este empobrecimiento de la austenita tendrá, como consecuencia, una disminución de la templabilidad. Este fenómeno es, sin embargo, de poca influencia en la mayor parte de los aceros medianamente aleados, porque la fase carburos es poco abundante. Por el contrario, en los aceros al cromo que contengan titanio, el tenor de carbono en la austenita puede disminuir hasta tal punto que su aptitud para tomar temple es apenas un poco mayor que la de un acero dulce.

Es posible, en general, disminuir el empobrecimiento de la austenita en carbono calentando el acero a alta temperatura, durante un tiempo suficientemente largo, que provoque la redisolución de los carburos.

De esta forma la austenita se enriquece en carbono y se aumenta la templabilidad del metal. En ciertos casos, sin embargo, cuando la temperatura  $M_f$  es muy baja por ejemplo, es preferible no redissolver completamente los carburos, para evitar la presencia de una cantidad importante de austenita residual a la temperatura ambiente. El tiempo de incubación de la transformación de la austenita en un acero de grano fino es menor que el del mismo acero pero con grano grueso. Recíprocamente, el aumento del tamaño de grano de la austenita aumenta el tiempo de incubación de la transformación austenítica y desplaza las curvas de transformación hacia la derecha.

Lamentablemente, los aceros de grano grueso son frágiles y menos dúctiles y no conviene acrecentar su templabilidad, aumentando el tamaño de grano de la austenita. Es, entonces, preferible mantener un grano fino y mejorar la templabilidad agregando elementos aleantes. Con tal fin conviene señalar que los elementos que forman inclusiones no metálicas o carburos libres muy estables y de pequeñas dimensiones, dificultan el aumento de tamaño

del grano austenítico y sirven de gérmenes para la transformación. Es así que los aceros al tungsteno, al molibdeno y al vanadio, son automáticamente de grano fino.

Sintetizando: los elementos disueltos en la austenita desplazan las curvas de transformación TTT y CCT de los aceros hacia la derecha y aumentan su templabilidad; los elementos que forman carburos empobrecen la austenita en carbono y afinan el grano gracias a los carburos que forman núcleos que propician la transformación de la austenita y, por consecuencia, disminuyen la templabilidad.

En cuanto a la influencia sobre la templabilidad de los elementos aleantes más empleados en la práctica corriente de acería, diremos:

- **Manganeso** : Se disuelve en la austenita y no da carburos especiales, aunque sí un carburo  $Mn_3C$  soluble en toda proporción en la cementita. Con tenores inferiores al 5% desplaza las curvas hacia la derecha sin cambiarles la forma. Con tenores más elevados, los dominios de la perlita y de la bainita tienden a separarse. El Mn es, después del carbono, el elemento que más hace descender la temperatura  $M_s$ , aumentando entonces la templabilidad. Sin embargo, se constata experimentalmente que aumenta las tensiones internas que pueden fragilizar el acero y también producir fisuras temple.
- **Cromo** : desplaza las curvas de transformación hacia la derecha. Eleva las temperaturas de dominio de la perlita y baja las del dominio de la bainita, creando entre ambos dominios una zona de estabilidad de la austenita. Baja la temperatura del punto  $M_s$ . Su acción sobre la posición de las curvas de transformación depende, esencialmente, de la temperatura de austenización antes del temple; si ella es baja o si el tiempo es corto, demora en la austenita los carburos no disueltos, que retiene el cromo y el carbono, y el acero es menos templable debido, por una parte, al empobrecimiento en cromo y en carbono de la austenita y, por otra parte, porque los carburos no disueltos hacen de gérmenes, facilitando la transformación. Para una temperatura de austenización más elevada y para un tiempo más largo, el cromo y el carbono se disuelven en la austenita y el acero toma temple con mayor facilidad. Es posible, entonces, para una redisolución más y más completa que los carburos, obtener un acero

templable al agua, en aceite o el aire y aun obtener que, en frío, se mantenga la estructura austenítica ( $M_f$  por debajo del ambiente).

- Vanadio : puede apoderarse de una parte del carbono para formar carburos que empobrecen en carbono a la austenita y las partículas de  $V_4C_3$  hacen de gérmenes para la transformación, con lo cual el acero disminuye su templabilidad. Si se austeniza un acero al vanadio muy poco por encima de  $A_{c3}$ , la dureza y la profundidad de temple serán menores que para un acero no aleado de igual tenor totalmente disuelto. Si por el contrario, se austeniza a una temperatura elevada, los carburos se disuelven y el acero adquiere una templabilidad por lo menos igual a la de los aceros no aleados. La temperatura de austenización para el temple de los aceros al vanadio debe ser elevada, pero teniendo cuidado de no llegar al sobrecalentamiento que aumente el tamaño de grano.
- Molibdeno: Puede disminuir o aumentar la templabilidad según que los carburos empobrezcan o no en carbono a la austenita, afinen el grano y sirvan de gérmenes para la transformación o que se disuelvan en la austenita por una elevación de temperatura y tiempo de austenización.
- Tungsteno : en bajos tenores aumenta la templabilidad. Con mayor tenor se forman carburos de tungsteno en mayor cantidad y la austenita se empobrece en carbono y la templabilidad disminuye, a menos que por calentamiento a alta temperatura (superior a  $1050^\circ\text{C}$ ) los carburos se redisuelvan. El poder de temple de los aceros al W (ej: 1,5%C y 8% W) depende, en consecuencia, de la temperatura de austenización.
- Silicio : su influencia sobre la templabilidad es muy compleja. Este elemento se disuelve en la cementita y provoca su descomposición en hierro y carbono libre (grafito). Esta tendencia a la grafitización de la cementita se manifiesta en los aceros que tengan, a la vez, altos tenores de C y Si. La separación del grafito disminuye mucho la aptitud para el temple. Si ello no tiene lugar, el silicio más bien facilita el temple. La influencia del silicio sobre la templabilidad desaparece

cuando se adiciona un elemento, tal como el cromo, que da lugar a la formación de carburos. <sup>(16)</sup>

### **1.2.12.- Dilución**

La dilución se define como un cambio en la composición química de él metal soldado por causa de la mezcla del metal base con el aporte por el proceso de soldado. El arco minimiza la dilución en el proceso a un sector en particular. La dilución es usualmente considerada como un porcentaje de él metal base. La dilución del metal por el método de moldeo manual al arco es aproximadamente entre 25-40%.

Estos son los factores que afectan la dilución:

- Amperaje : controlando este parámetro se controla la penetración en el material base.
- Polaridad : con electrodos de corriente directa negativa (DCEN) la penetración es menor, y menor rata de dilución con electrodos de corriente positiva (DCEP).
- Tamaño del electrodo: Un electrodo pequeño usa menor amperaje, por consiguiente menor es la dilución.

### **1.2.13.- Desgaste**

El desgaste es el resultado de impacto, erosión, contacto metal con metal, abrasión, oxidación, o una combinación de ellos. Los efectos del desgaste, que es extremadamente caro, se pueden reparar por medio de soldadura. El revestimiento con metales de aporte especiales sirve para reemplazar el metal gastado con superficie nueva. El revestimiento duro aplica una capa con el objeto de reducir el desgaste o la pérdida de material por abrasión, impacto, erosión, oxidación, cavitación, etc. Se puede usar para aumentar la vida útil de las partes que se gastan. Puede ahorrar costos porque el reemplazo de las partes es costoso, especialmente cuando se consideran los tiempos muertos y la mano de obra de reparación.

La selección de un material de revestimiento duro es extremadamente compleja. Para seleccionar la aleación adecuada de revestimiento duro es necesario comprender el desgaste

que causó el deterioro del metal. Los distintos tipos de desgaste se pueden clasificar y definir como sigue:

El desgaste de impacto es el golpeteo de un objeto contra otro. Es un tipo de desgaste de choque que rompe, parte o deforma las superficies metálicas. Un buen ejemplo es el impacto que se observa en una apisonadora.

La abrasión es el desgaste de las superficies por frotamiento, fricción o pulimento. Generalmente, sucede cuando se usa un material duro contra uno suave. Casi siempre es causada por la acción de la arena, grava, escoria o material en forma de piedrilla sobre maquinaria.

La erosión es el desgaste de los materiales por la acción abrasiva de un líquido. Este tipo de acción vacía o hace surcos en las superficies metálicas. También puede originarse por el vapor y las pulpas que arrastran materiales abrasivos. Las partes de las bombas están sujetas a este tipo de desgaste.

La compresión es un tipo de desgaste causado por deformación, grandes cargas estáticas o un aumento lento de presión sobre las superficies metálicas. El desgaste por compresión origina que el metal se mueva y pierda su exactitud dimensional.

El desgaste por cavitación resulta del flujo turbulento de los líquidos, que contienen partículas abrasivas en suspensión.

El desgaste metal con metal es del tipo de agarrotamiento y fricción que desgarran y arrancan porciones de la superficie metálica. A menudo se origina porque se agarrotan o marran las partes entre sí por falta de lubricación. El calor de fricción contribuye a provocar este tipo de desgaste.

El desgaste por corrosión es la desaparición o deterioro gradual de las superficies metálicas por los efectos de la atmósfera, los ácidos, gases, álcalis, etc. Este tipo de desgaste origina puntos o pozos y perforaciones, y finalmente puede disolver las partes metálicas.

La oxidación es un tipo de desgaste que aparece como descascaramiento o desmoronamientos de las superficies metálicas. Esto sucede cuando el metal sin protección

se expone a una combinación de calor, aire y humedad. En ejemplo de la oxidación es la herrumbe.

El choque térmico es un problema que provoca fracturas o peladuras, y es originado por un calentamiento y enfriamiento rápido. Aunque exactamente no es un problema de desgaste, es un problema de deterioro y por ello se trata.

Muchos de estos tipos de desgaste se combinan de factores que provocan el problema del desgaste para determinar mejor el tipo de material de revestimiento duro que se ha de aplicar. Esto se hace estudiando la parte desgastada, el trabajo que ejecuta, cómo se acopla a las demás partes del equipo y el ambiente a que se expone.

### **1.3.-TRATAMIENTOS TERMICOS EN LA SOLDADURA**

Un tratamiento térmico es un proceso mediante el cual una pieza es sometida a uno o varios ciclos de calentamiento y enfriamiento para variar alguna o algunas de sus propiedades en la forma deseada. Entre las propiedades que se pueden modificar mediante un tratamiento térmico están: resistencia mecánica, dureza, tenacidad, ductilidad, resistencia a la corrosión, estabilidad dimensional, esfuerzos residuales, microestructura, etc.

Las variables fundamentales a controlar durante un tratamiento térmico son :

- a) La temperatura de tratamiento
- b) El tiempo que se mantiene la pieza a la temperatura de tratamiento
- c) La velocidad de calentamiento
- d) La velocidad de enfriamiento

*Diagramas de fase:* Las aleaciones o sistemas metálicos pueden cambiar de fase en función de la temperatura, así como también en función de la composición, o sea dependiendo de la combinación entre los diferentes elementos que se pueden asociar. Un diagrama de fase recoge estos cambios de fase en función de la temperatura y la composición. Dicho en otras palabras, representa un “mapa” que indica las fases que tienen un sistema metálico en función de la temperatura y la composición. En un diagrama de fase se puede ubicar cual es la condición de una aleación específica (una composición determinada) a una dada

temperatura. De esta manera si uno desea producir una condición específica en esa aleación, deberá calentar de acuerdo a lo que indica el diagrama. Los tratamientos térmicos exigen un calentamiento y un enfriamiento determinado. Durante el calentamiento se debe obtener una o varias fases específicas en el material. El diagrama de fase nos indicará el intervalo de temperatura donde lo mismo es posible; además de las fases presentes en el material.

### **1.3.1.- Calentamiento y Medición de Temperaturas**

La aplicación de calor en una soldadura puede realizarse calentando la pieza soldada completamente en un horno, o mediante un calentamiento localizado de la soldadura. Este último método es el que normalmente se utiliza en la soldadura en campo, y se puede realizar con la aplicación de calentamiento por inducción, por resistencia, con llama, a través de reacciones exotérmicas, por radiación infrarroja a cualquier otro método conveniente.

Durante el calentamiento localizado de una soldadura debe tenerse en cuenta lo siguiente:

1. El ancho de la banda debe ser adecuado. En las soldaduras de tuberías, con el objeto de evitar gradientes de temperaturas excesivas entre la superficie exterior e interior del tubo, el ancho de la banda calentada debe ser por lo menos 5 veces el espesor del material. Cuando se realizan soldaduras de acuerdo a un código, el ancho de la banda calentada debe ser superior o igual al mínimo especificado.
2. Las temperaturas deben ser comprobadas mediante termopares, o con marcadores/ pinturas indicadoras de temperatura.
3. En el caso de aplicación de precalentamiento con llama, la temperatura debe medirse en la superficie opuesta a la que se aplica calor. Si ésta no es accesible, la temperatura puede medirse en la superficie calentada; pero antes de realizar la medición, se debe remover la fuente de calor, y esperar aproximadamente un minuto por cada 25 mm de espesor del material.

### **1.3.2.- Pre calentamiento y temperatura entre pases**

La aplicación de calor antes, entre pases, y/o después de producir una unión soldada puede ser una parte importante de un procedimiento de soldadura.

#### Finalidad :

En las piezas a soldar, tanto los espesores como la geometría de la junta juegan un papel importante en la velocidad de enfriamiento del metal aportado y de la ZAT (zona afectada térmicamente), a causa de las pérdidas de calor por conducción que crecen a medida que aumentan el espesor de la chapa y el número de vías disipantes de calor.

Por efecto de la velocidad de enfriamiento pueden originarse en el acero estructuras metalúrgicas duras, y en caso extremo, provoca una transformación directa de austenita a martensita.

Si calentamos el material previamente al soldeo disminuimos el desnivel térmico desde la temperatura de fusión del acero desplazando la curva de enfriamiento hacia la derecha del diagrama TTT (temperatura - tiempo - transformación). De este modo se favorecen las transformaciones metalúrgicas a estructuras más blandas que resultan menos frágiles y propensas a fisuraciones.

Las favorables consecuencias del pre calentamiento son :

1. Reduce las tensiones en la ZAT
2. Facilita la difusión del hidrógeno
3. Disminuye el riesgo de formación de poros

#### Temperatura de pre calentamiento :

Se llama así a la temperatura que debe alcanzar el metal base inmediatamente antes de que comience el proceso de soldeo y que normalmente debe mantenerse entre las diversas pasadas en caso de soldadura de pasadas múltiples. Se aplica localmente por resistencia eléctrica o llama de gas.

Es aconsejable extenderlo sobre una zona superior a cuatro veces el espesor de la pieza y a ambos lados del cordón, con un mínimo de 75 mm a cada lado del eje de la soldadura. Cuando el espesor supere 25 mm es suficiente la aplicación de calor a una banda de 100 mm a cada lado.

Si el precalentamiento se lleva a cabo con llama, está debe repartirse adecuadamente de modo que no permanezca fija en ningún punto de la superficie calentada.

La temperatura se debe medir, siempre que sea posible, en la cara opuesta a la que se está aplicando la fuente de calor, por medio de termopares o lápices termoindicadores.

La temperatura de precalentamiento a aplicar en la soldadura de cada acero será especificada al estudiar la soldabilidad de las diferentes familias que vamos a considerar.

#### Aplicaciones :

*Procedimiento de soldadura:* al iniciar la fabricación de una construcción soldada es preciso disponer de las suficientes garantías sobre sí soldando con el procedimiento y la técnica seleccionados, se va a lograr la continuidad metálica de la unión en el sentido indicado en el término soldabilidad.

Con el objeto de avalar estas garantías, es necesario realizar previamente la cualificación del procedimiento que se va a emplear, así como la homologación de la mano de obra que va a ejecutar el mismo.

- Cualificación: consta de las siguientes fases:
  - ◆ Preparar la especificación del procedimiento
  - ◆ Soldar una probeta, siguiendo fielmente la especificación
  - ◆ Someter la probeta a los ensayos requeridos por el código de diseño de la construcción soldada y a los adicionales que puedan imponer las condiciones de servicio
- Especificación : en la especificación deberán indicarse claramente todas las variables o parámetros de soldeo. A título orientativo se detallan un listado de variables clasificadas por grupos homogéneos.

- ◆ Metal de base: Calidad, estado, espesor.
  - ◆ Proceso de soldeo: SMAW, SAW, GMAW, etc; clase de electrodo, en proceso GTAW; tipo de transferencia, en proceso GMAW.
  - ◆ Material de aporte: calidad ; tipo de revestimiento de electrodo o clase de flux; diámetro del electrodo, hilo o varilla para cada pasada; clase de gas de protección
  - ◆ Posición de soldeo : 1G, 2G, 3G, etc. ; sentido de avance : (derecha o izquierda. Ascendente o descendente)
  - ◆ Junta : tipo (V, X ,U ,K, etc.); dimensiones ; sistemas de preparación de bordes.
  - ◆ Precalentamiento : fuente : eléctrica, antorcha de propano, etc. ; temperatura a alcanzar ; temperatura entre pasadas.
  - ◆ Tratamiento térmico postsoldadura (PWHT) : velocidad de calentamiento ; temperatura a alcanzar ; tiempo de mantenimiento ; velocidad de enfriamiento.
  - ◆ Características eléctricas : intensidad en cada pasada ; tensión en cada pasada.
  - ◆ Técnica : número de pasadas ; velocidad de soldadura en cada pasada ; forma de la pasada de peinado, método de limpieza entre pasadas ; procedimiento del saneado de la raíz.
- Soldadura : esta fase consiste en soldar una probeta respetando lo indicado en las especificaciones del procedimiento.
  - Ensayos : finalizado el proceso anterior, se realizan los ensayos requeridos. Como mínimo abarcarán : un ensayo de tracción para determinar la carga de rotura o límite elástico y el alargamiento de la unión, además de otro de doblado para observar si se producen fisuras

Un tipo de ensayo frecuente, aunque los códigos no lo soliciten, es un barrido de dureza Vickers con carga de 10 Kg en una sección transversal de la junta soldada. Por exigencias

del servicio que van a prestar las soldaduras, se pueden llevar a cabo también diferentes pruebas tales como : resiliencia, de mecánica de fractura, de corrosión, etc.

La razón principal para el precalentamiento y la aplicación de calor entre pases, es el de reducir la velocidad de enfriamiento del depósito de soldadura, y de la zona afectada por el calor. Mediante esto se logra:

1. Reducir la tendencia a la formación de microestructuras duras y frágiles
2. Reducir la distorsión y esfuerzos residuales
3. Evitar el agrietamiento en frío o fragilización por hidrógeno de la unión soldada
4. Facilitar la soldadura de materiales de alta conductividad térmica, como el cobre y sus aleaciones.

Otra razón para la aplicación del precalentamiento es la eliminación de la humedad superficial en los materiales que se van a soldar.

La temperatura de precalentamiento depende fundamentalmente de la composición del material, espesor, rigidez de la junta a soldar y proceso de soldadura utilizado.

### **3.1.3.-Tratamientos térmicos de los aceros**

El tratamiento térmico es una operación que abarca el calentamiento de un metal sólido hasta una temperatura definida, mantenimiento a dicha temperatura de acuerdo a las dimensiones, tipo de acero o de tratamiento, seguido de un enfriamiento adecuado para obtener ciertas propiedades físicas las cuales están asociadas con los cambios en la naturaleza, forma, tamaño y distribución de los microconstituyentes.

Entre los tratamientos térmicos más importantes sin cambios en la composición química se encuentran: Normalizado, Recocido, Temple y Revenido.

El normalizado y el Recocido se realizan para obtener estructuras ferríticas, cementita y perlíticas de acuerdo al contenido de carbono del acero ; el temple se realiza cuando se desea obtener una estructura martensítica o bainítica y el revenido es el tratamiento que debe aplicarse a los aceros que han sido templados.

Existen diferentes tipos de tratamientos térmicos dependiendo del ajuste de las variables fundamentales indicadas anteriormente, no es el objetivo de esta sección analizar en detalle los diferentes tipos de tratamientos térmicos ; sin embargo en forma concisa, a continuación se describen los más importantes :

### **1.3.4.- Tratamientos térmicos posteriores a la soldadura**

Algunas de las razones para realizar tratamientos térmicos posteriores a la soldadura son las siguientes :

1. Reducir los esfuerzos residuales producidos por la soldadura (tratamiento de alivio de tensiones)
2. Reducir la dureza y aumentar la tenacidad del depósito de soldadura y de la zona afectada por el calor
3. Obtener estabilidad dimensional
4. Mejorar la resistencia a la corrosión

5. Incrementar la resistencia mecánica del depósito de soldadura y de la zona afectada por el calor (tratamiento térmico de envejecimiento) en aleaciones no férricas, tales como algunos aluminios y aleaciones de níquel.

### **1.3.5.- Normalizado**

Es un tratamiento térmico mediante el cual un acero o fundición se calienta hasta una temperatura adecuada, generalmente entre 850 y 950°C por un tiempo determinado; y luego se deja enfriar al aire. Entre los propósitos de este tratamiento están: modificar las propiedades mecánicas (resistencia, dureza, tenacidad), mejorar la maquinabilidad, refinar el grano, y homogeneizar la microestructura del material.

### **1.3.6.- Recocido**

Este es un tratamiento para el que no es fácil dar una exacta definición. Dada la variedad de tipos de recocido y de diferentes propósitos por los que se efectúan. La literatura común sobre tratamientos térmicos establece en general que el recocido es un proceso que consta de una austenización total, con un posterior enfriamiento en el horno o en un contenedor térmico, es decir, es un tratamiento térmico que consiste en calentar la pieza a una temperatura adecuada (la cual depende de la aleación utilizada), seguido por un enfriamiento a una velocidad controlada. Este tratamiento se aplica para producir ablandamiento.

Para los aceros al carbono, el recocido se realiza generalmente en un rango de temperatura comprendido entre 800 y 900°C, y el enfriamiento se realiza al horno a una tasa de 28°C/h aproximadamente.

Este tipo de tratamiento térmico no se aplica frecuentemente en soldaduras debido a la alta distorsión que se puede obtener en el componente o equipo por altas temperaturas involucradas en dicho tratamiento.

El propósito del tratamiento de recocido es reducir la dureza del acero o producir una estructura que facilite la realización de operaciones de manufactura subsiguientes. Los aceros son recocidos para mejorar las propiedades mecánicas o eléctricas o para promover

estabilidad dimensional. A la hora de escoger el tratamiento de recocido que procederá una adecuada combinación de tales propiedades al costo mínimo posible, se deberá buscar un compromiso entre estos factores. El concepto de recocido es bastante amplio para un tratamiento, por lo que se le clasifica de acuerdo al rango de temperatura en : recocido de austenización completa, recocido intercrítico y recocido subcrítico. Las temperaturas críticas son aquellas temperaturas por encima o por debajo de las cuales la austenita se forma o se transforma respectivamente. Para el caso de los aceros hipoeutectoides tales temperaturas están descritas por líneas que delimitan la zona de  $(\alpha)$  y  $(\alpha + \gamma)$  y la zona de  $(\alpha + \gamma)$  y  $(\alpha + \text{Fe}_3\text{C})$  y son designadas de manera abreviada como  $A_1$  y  $A_{31}$  respectivamente. Para los aceros hipereutectoides estas líneas se delimitan con  $(\gamma)$  y  $(\gamma + \text{Fe}_3\text{C})$  y la zona  $(\gamma + \text{Fe}_3\text{C})$  y  $(\alpha + \text{Fe}_3\text{C})$ , que son designadas como  $A_{cm}$  y  $A_3$ .

#### Recocido de austenización completa o de regeneración :

Este tratamiento se realiza calentando el acero por encima de  $A_{c3}$  para los aceros hipoeutectoides , seguido de un enfriamiento lento en el horno a través del rango de temperaturas críticas. Para los aceros hipereutectoides está por encima de  $A_{c1}$ . La razón para calentar en la zona entre  $A_{c1}$  y  $A_{cm}$  es aglomerar o esferodizar la austenita. Si se calentara en la zona austenítica a estos aceros, durante el enfriamiento lento se formará en los límites de grano de la austenita una malla continua de cementita que provee un camino para la fractura frágil del acero.

No solo es importante el rango de temperatura de calentamiento, sino también la velocidad de enfriamiento. La velocidad lenta de enfriamiento dentro del horno asegura que la austenita se transforma primero en ferrita proeutectoide y después en perlita a temperaturas cercanas a las de equilibrio. Por lo tanto la ferrita será equiaxial y relativamente gruesa y la perlita tendrá un espaciamiento interlaminar gruesa. Estas características microestructural corresponde a menor dureza, resistencia y mayor ductilidad (principal objetivo del recocido completo). Una vez que ha ocurrido la transformación de estructura, puede aumentarse la velocidad de enfriamiento y así mejorar la productividad.

*Recocido de homogenización :* este es un tipo de tratamiento que se realiza normalmente en las primeras etapas de procesamiento de los aceros previo al laminado o a la forja. Estas operaciones son realizadas en el mismo rango de temperatura. Este tratamiento es realizado

a altas temperaturas en el campo austenítico acelerando la reducción de las segregaciones o gradientes de concentración química que son producidos durante la solidificación del lingote, este es un proceso controlado por difusión. Además es posible disolver al máximo segundas fases como por ejemplo los carburos. La uniformidad resultante u homogeneidad de la austenita resultante mejora no solamente los procesos de manufactura sino que también la respuesta del material a recocidos o endurecimientos posteriores.

#### Recocidos intercríticos :

##### *Esferodización o globulización :*

La condición más dúctil y suave está asociada con la microestructura que consiste de partículas esféricas de carburo dispersas en una matriz ferrítica. La buena ductilidad de las microestructuras esferodizadas es extremadamente importante para los aceros de bajo y mediano carbono que son trabajados en frío y es muy importante también para los aceros de alto carbono que deben ser mecanizados fuertemente antes del endurecimiento. La figura 6.b muestra la correlación entre la práctica de recocido en un acero con el acabado superficial de la herramienta de corte utilizada para mecanizarlo. Las microestructuras esferodizadas son las más estables conseguidas en los aceros y se formarán a temperaturas lo suficientemente alta y tiempos largos de mantenimiento que permiten por medio de difusión el desarrollo de partículas de carburo esféricas.

Existen varios tratamientos térmicos que permiten obtener esta estructura. La esferodización más lenta está asociada con la perlita laminar gruesa. Serán necesarias muchos cientos de horas para lograr que las microestructuras perlíticas se puedan esferodizar. El proceso más rápido se consigue partiendo de la bainita y aun más rápido si la microestructura inicial es martensita). También es frecuente para aceros de herramienta altamente aleados que son autoendurecibles (por enfriamiento al aire). Para conseguir las velocidades más rápidas debe partirse de una estructura total o parcial de austenita y luego se mantiene justamente por debajo de  $Ac_1$ . Es importante limitar la temperatura de austenización para mantener la heterogeneidad en la austenita ya que las partículas de carburos no disueltas son las que promueven la transformación de la austenita a microestructuras esferoidales. La austenita libre de carburos no disueltos (la que proviene del normalizado y del recocido de austenización completa) promueve la formación de

estructuras perlíticas. Las microestructuras esferoidales son estables porque la ferrita está generalmente libre de deformación y porque la forma esférica de las partículas de cementita es una de las que tiene mínima área interfacial por unidad de volumen de partícula. Las partículas laminares de cementita (presente en la perlita), tienen un área interfacial muy grande por unidad de volumen y por consiguiente una alta energía interfacial. Para reducir la energía interfacial la cementita laminar se rompe en pequeñas partículas que eventualmente asume forma esférica. Una vez que las laminas se rompen, las pequeñas partículas esféricas se disuelven a expensas de las partículas grandes, bajando la energía interfacial.

La velocidad de crecimiento de las partículas esferodizadas está directamente relacionada con la difusión de carbono en la ferrita y disminuye a medida que el tamaño promedio de las partículas en una microestructura esferodizada aumenta. Los elementos de aleación bajan la velocidad de difusión del carbono en la ferrita y por consiguiente el proceso de esferodización. También si están presentes, los elementos fuertemente formadores de carburos tendrían que difundir para que crezcan los carburos, por lo que se reduciría la velocidad de esferodización.

Los aceros pueden ser esferodizados por los siguientes métodos:

1. Mantenimiento prolongado a una temperatura justamente por debajo de  $A_c1$
2. Calentando y enfriando alternativamente entre temperaturas por encima de  $A_c1$  y por debajo de  $A_r1$
3. Calentando a una temperatura por encima de  $A_c1$  y enfriando a una velocidad muy lenta en el horno o manteniéndola a una temperatura justamente por debajo de  $A_r1$ .
4. Enfriando a una velocidad adecuada desde la temperatura mínima a la cual se disuelven los carburos, previniendo la formación de la malla de carburos y luego recalentándola utilizando el proceso 1 o 2 (esto es aplicable a los aceros hipoeutectoides conteniendo una malla de carburos).

Las velocidades de enfriamiento para estos métodos dependen en cierta forma de la microestructura previa, siendo la más rápida la correspondiente a las estructuras templadas

en donde la fase carburo es fina y dispersa. El trabajo en frío previo también incrementa la velocidad de la reacción de esferodización en este tratamiento térmico.

Debe existir un estricto control de la temperatura en el horno cuando se escogen temperaturas muy cercanas a las temperaturas críticas, sino es posible controlar este parámetro estrictamente es preferible trabajar a temperaturas intermedias con tiempos más largos. Esto se debe básicamente a que la temperatura y el tiempo al ser los factores que influyen en la austenización, afectan por consiguiente, en el número de carburos sin disolver que serán los que inicien la nucleación y la coalescencia de las partículas esferoidales.

#### Recocidos subcríticos :

*Alivio de tensiones* : Un gran número de procesos mecánicos y térmicos producen esfuerzos residuales que pudieran afectar negativamente en el comportamiento de partes y piezas de acero. Estos esfuerzos pueden producir distorsión, agrietamiento durante el conformado o los tratamientos térmicos o fallas a esfuerzos por debajo de los de diseño durante servicio. Una fuente de esfuerzos residuales es el enfriamiento de secciones gruesas después de la austenización. El mecanizado y el trabajo en frío también pueden producir esfuerzos residuales debido a la diferencia en la cantidad de deformación entre la superficie y el interior de la pieza. La soldadura también produce esfuerzos residuales de tracción. Cuando el metal solidifica y se contrae, es restringida por el metal base adyacente. Los esfuerzos residuales son reducidos o eliminados por tratamientos subcríticos realizados a temperaturas similares o por debajo a las utilizadas en el recocido de recristalización. El calentamiento y el enfriamiento deben llevarse a cabo lentamente sobre todo en secciones gruesas piezas largas soldadas para evitar introducir nuevos esfuerzos residuales térmicos y un posible agrietamiento durante el proceso de alivio. El objetivo del alivio de tensiones no es producir mayores cambios en las propiedades mecánicas. Mas bien el proceso es acompañado por mecanismos de recuperación que preceden a la recristalización, una situación que es ayudada por la diferencia en la cinética entre los dos mecanismos. La recuperación comienza casi inmediatamente en el calentamiento y hasta alcanzar la temperatura. La velocidad de recuperación es muy rápida al principio y disminuye a medida que transcurre el tiempo. Por otro lado la recristalización requiere un periodo de

incubación y comienza muy lentamente. Por lo tanto es posible aliviar esfuerzos residuales sin cambiar significativamente las propiedades mecánicas.

*Recocido de recristalización* : este es un tratamiento subcrítico que se le aplica a los aceros trabajados en frío con la finalidad de restaurar la ductilidad y en muchos casos para seguirlos deformando.

Debido a que el tratamiento es subcrítico, no ocurre transformación de fase durante los cambios microestructurales que ocurren durante este tratamiento. La estructura previa al trabajo en frío generalmente, en los aceros de bajo y mediano carbono, consta de una estructura esferoidal o de una gran cantidad de granos equiaxiales, libre de deformación, de ferrita con pequeñas cantidades de perlita, ambas estructuras extremadamente dúctiles. Durante el trabajo en frío los granos se alargan en el sentido del conformado introduciéndose en el material una gran cantidad de defectos. Por medio del calentamiento, la ferrita con una gran cantidad de energía de deformación acumulada, se recupera, este es un mecanismo por medio del cual algunas de las imperfecciones cristalinas se eliminan o se reacomodan en nuevas configuraciones y eventualmente se produce la recristalización donde nuevos granos equiaxiales, libre de deformación, se nuclean y crecen en la ferrita deformada. El tiempo de recristalización considerado como adecuado se encuentra entre ½ a 1 hora de mantenimiento a la temperatura fijada. Si el proceso de recristalización es continuo el tiempo se reduce considerablemente.

Aparte de la temperatura y del tiempo de recristalización, los otros factores que afectan el proceso de recristalización son : tamaño de grano previo, la cantidad de deformación acumulada y la composición.

### **1.3.7.- Templado**

Consiste en el enfriamiento violento de un acero a partir de temperaturas de austenización. Este enfriamiento se realiza generalmente por inmersión de la pieza en agua, aceite, baños de sales; y en algunos casos, mediante agitación en aire. Mediante este tratamiento se endurece al material a través de la obtención de la microestructura martensítica. Este tratamiento térmico generalmente va seguido de otro tratamiento denominado revenido, el

cual se realiza con el objeto de mejorar las propiedades mecánicas del material; especialmente la tenacidad y la ductilidad.

Este es un tratamiento térmico de los más importantes y de los más aplicados, siendo su objetivo básico endurecer al acero y en algunos casos aumentar su resistencia, en una medida que dependerá de la capacidad del acero para responder al tratamiento.

El endurecimiento se produce por la aparición de una estructura típica de los aceros templados, denominados martensita.

Para efectuar el tratamiento, el acero es calentado hasta ser austenizado, totalmente en el caso de los hipoeutectoides y parcialmente en el caso de los hipereutectoides.

Luego se procede a un enfriamiento a la velocidad adecuada para así obtener la estructura martensítica responsable del endurecimiento.

La velocidad de enfriamiento necesaria debe ser aquella que supere la indicada por la tangente a la "rodilla" del diagrama de enfriamiento continuo, que es denominada "velocidad crítica".

En todo caso, para temprar totalmente al acero debe evitarse que se forme cualquier producto de altas temperaturas, tal como la ferrita o la cementita.

Las condiciones de temple serán función del tipo de acero y de los resultados que se esperen obtener. Para discutir lo mismo es necesario conocer el efecto de una serie de variables, así como definir la capacidad del acero para ser templado, que se mide a través de la templabilidad.

#### *Microestructura del temple*

Los aceros hipoeutectoides templados podrán mostrar una microestructura constituida por ferrita y martensita, hasta martensita únicamente; mientras que los hipereutectoides siempre tendrán al menos cementita y martensita. Esto último en razón del calentamiento que se efectúa.

En ambos casos, dependiendo de distintas variables, podrán existir otras microestructuras, como la bainita e incluso hasta perlita. En todo caso, la microestructura presentada vendrá

dada en función de la composición del acero y de las variables del temple, como la velocidad de enfriamiento.

#### *Variables del temple*

A continuación se analizara brevemente el efecto de las distintas variables que afectan al tratamiento térmico de temple:

#### *La composición*

Determina los resultados que se pueden obtener por medio del tratamiento, así como las condiciones bajo las que se tiene que efectuar. Igualmente, de la composición dependerá la respuesta del acero al temple a lo largo de su sección transversal, así como también determinará su capacidad en cuanto a tenacidad por ejemplo.

#### *Temperatura de austenización*

Depende del tipo de acero que se va a templar. En el caso de los aceros hipereutectoides esta unos 30°C por encima de la temperatura  $A_{c31}$ . Si el acero es calentado a una temperatura muy elevada, se puede favorecer la presencia de una estructura martensítica de tipo acicular, pero el grano crecería de manera perjudicial, además de lo elevado del choque térmico y del riesgo de descarburización.

#### *Medio de temple*

Es el que suministra la velocidad de enfriamiento necesaria para obtener los resultados previstos. El medio de enfriamiento debe tener capacidad para proporcionar una velocidad mayor o igual que la velocidad crítica de temple del correspondiente acero y su escogencia dependerá asimismo de los resultados deseados.

### **1.3.8.- Revenido**

Es un tratamiento térmico que se aplica luego del templado o normalizado de un acero con el objeto de reducir su dureza, e incrementar su ductilidad y tenacidad.

Las temperaturas requeridas para realizar el revenido son inferiores a las del recocido, normalizado y temple; y su valor, al igual que el tiempo de tratamiento, dependerá de los niveles de durezas deseados.

Es el tratamiento térmico subcrítico que se le aplica a los aceros después del temple para aumentar la tenacidad disminuyendo simultáneamente la dureza. El tratamiento consiste en un calentamiento hasta una cierta temperatura que puede variar entre 160°C a 650°C dependiendo de las propiedades finales deseadas, mantenimiento a esa temperatura, seguido de un enfriamiento que dependerá de la composición química y de la configuración externa de la pieza.

Para entender mejor el mecanismo del proceso de revenido veamos las tres etapas principales por las que pasa un acero al carbono templado cuando es sometido aun calentamiento.

1. 80-160°C. Ocurre la precipitación de un carburo denominado carburo  $\epsilon$  rico en carbono. Esto es producto de la disminución del carbono de la martensita hasta aproximadamente 0,25%.
2. 230-280°C La austenita retenida se descompone en un producto de ferrita y cementita.
3. 160-400°C Formación de cementita y ferrita a partir del carburo de  $\epsilon$  y la martensita de bajo carbono.
4. 400-700°C Crecimiento y esferodización de la cementita.

Los intervalos de temperaturas pueden variar dependiendo de la velocidad de calentamiento y se pueden superponer dependiendo de los tiempos de revenido. Para los aceros aleados, el endurecimiento secundario se considera la cuarta etapa del revenido. También recientemente se ha observado la segregación de átomos de carbono en las dislocaciones y en otros límites durante el temple y/o el mantenimiento a temperatura ambiente, por lo que el agrupamiento de átomos de carbono en la martensita después del temple precede a la formación de carburos.

El carburo de transición que se forma en la primera etapa del temple fue primeramente identificado como una estructura hexagonal y fue designada como carburo de  $\epsilon$ . Más recientemente, Hirotsu y Nagakura mostraron que este carburo de transición tiene una estructura ortorrómbica isomorfa con carburos de metales de transición del tipo  $M_2C$ . El carburo de transición con esta última estructura, fue designado como carburo  $\eta$  ( $\eta$ ). La estructura de los carburos  $\epsilon$  y  $\eta$  son muy similares por la posición de los puntos en la

difracción de electrones. Ambos carburos, épsilon  $\text{Fe}_{2,4}\text{C}$  y eta  $\text{Fe}_2\text{C}$  tienen un contenido de carbono superior que el de la cementita  $\text{Fe}_3\text{C}$  que se forma a más altas temperaturas.

La transformación de la austenita retenida durante el revenido ocurre solamente después que el carburo de transición está bien establecido y se completa aproximadamente a la temperatura de  $300^\circ\text{C}$ .

La tercera etapa del revenido consiste en la formación de la ferrita y la cementita como lo indica el diagrama Fe-C. Sin embargo, hay evidencia, especialmente en aceros de alto contenido de carbono, que antes de la formación de la cementita, se forma carburo chi ( $\chi$ ) o el carburo theta ( $\theta$ ). El carburo chi tiene una estructura monoclinica y la composición es  $\text{Fe}_5\text{C}_2$ . Sin embargo, a pesar de las diferencias entre los dos carburos, las estructuras relativamente complejas de los dos son similares, por lo que se dificulta separarlas por técnicas de rayos X o difracción electrónica. Por lo tanto, en vista de la dificultad experimental en separar la presencia del carburo chi de la cementita, no ha sido posible definir la temperatura y las composiciones de los aceros en las cuales se forma este carburo. Básicamente en los aceros al carbono podría esperarse la formación de tres tipos de carburos : aquellos que se nuclean y crecen dentro de las placas de martensita (aceros con alto % de carbono), carburos largos y aplanados que se forman entre las intercaras de las placas de martensita (quizás como resultado de la transformación de la austenita retenida en la segunda etapa del revenido) y una tercera morfología de carburo chi o cementita en el revenido de aceros de alto carbono que consiste en arreglos paralelos de carburo en las maclas de transformación que a veces están presentes en la martensita de alto carbono. Los carburos que se forman dentro de las placas son más gruesos que los de transición y eventualmente se esferodizarán si el revenido es realizado a altas temperaturas.

Otros cambios en la estructura y distribución de los carburos ocurren en los aceros aleados que retardan el ablandamiento y/o producen endurecimiento secundario.

La reducción en la tenacidad que ocurre durante el revenido a ciertas temperaturas se define como fragilidad. Debido en parte a la composición del acero, esta fragilidad aparece a diferentes temperaturas, por lo tanto, se pueden establecer cuatro rangos de temperaturas:

1. Fragilidad entre 270-350°C : este rango es característico de muchos aceros sin alea y de bajo carbono así como aceros de herramienta y de construcción. El rango de temperatura coincide con el rango en el cual la austenita retenida se transforma en bainita y es altamente probable que algún mecanismo relacionado con esta transformación sea el responsable de la pérdida de tenacidad. El fósforo y el nitrógeno son elementos que producen la fragilidad en este rango de temperaturas.
2. Fragilidad entre 400-550°C : Característico de los aceros aleados de construcción y depende tanto de la temperatura como del tiempo de revenido. El grado de fragilidad depende de la velocidad de enfriamiento. Aún si el acero es revenido por encima de la temperatura de fragilización, el enfriamiento lento a través del rango crítico puede dar como resultado una disminución en la resistencia al impacto. Por esta razón, las secciones gruesas de los aceros tratables térmicamente, son particularmente susceptibles a este tipo de fragilidad, sin embargo, es fácil evitarlo enfriando en agua o en aceite desde la temperatura de revenido. Los elementos que tienden a promover este tipo de fragilidad, el más significativo es el fósforo cuando está presente en cantidades de más de 0,015%. A este nivel de fósforo, el cromo y el manganeso tienen una influencia negativa también, lo cual es intensificado si ambos elementos aparecen juntos en cantidades mayores que 1% de cada uno. Sí el nitrógeno también está presente la susceptibilidad a la fragilidad se incrementa más (el nitrógeno por sí solo no tiene efecto negativo). La presencia de As se ha encontrado en algunos casos que tiene efecto perjudicial. La susceptibilidad a la fragilidad puede ser reducida aleando el acero con el molibdeno en cantidades entre 0,15 a 0,5%.
3. Fragilidad a 475°C : Este tipo de fragilidad viene acompañada por un incremento en la dureza y se consigue en los aceros al cromo ferríticos y semi-ferríticos (contenido de cromo alrededor del 13%). Esta fragilidad se observa cuando se mantiene el acero en el rango de temperaturas entre 400-550°C, pero es más notable a 475°C. Hay muchas teorías acerca de las causas de esta fragilidad que desaparece calentando a temperaturas por encima de 600°C. El aumento de la

dureza se dice que es debido a la precipitación de un compuesto complejo rico en cromo. Esto a su vez disminuye la resistencia a la corrosión.

4. Fragilidad a 500-570°C : en los aceros de alta aleación tales como aceros para trabajo en caliente y los aceros rápidos, precipitan en este rango de temperaturas carburos finamente dispersos que junto con la martensita formada durante el enfriamiento, aumentan la dureza y disminuyen la resistencia al impacto.

#### *Relación entre los parámetros del revenido y la dureza*

Las principales variables del proceso de revenido son :

Composición química del acero, temperatura, tiempo y velocidad de enfriamiento.

El efecto de la composición química del acero puede ser separado en contenido de carbono y elementos de aleación. Discutiremos el efecto de estas variables en las propiedades mecánicas y en los cambios microestructurales que se desarrollan durante el revenido.

La martensita debe su fragilidad a muchos factores que pueden incluir la distorsión de la red debido a átomos de carbono atrapados en los lugares octaédricos, a la segregación de átomos de impurezas en los límites de grano de la austenita, a la formación de carburos durante el temple y a los esfuerzos residuales producto del temple. La función del revenido, como dijimos anteriormente, es reducir la dureza y aumentar la tenacidad. Las propiedades y la microestructuras varían dependiendo de la temperatura principalmente de revenido, desde la martensita revenida hasta la cementita globular. Es el balance entre la dureza y la tenacidad requerida en servicio lo que determina las condiciones del revenido para una determinada aplicación.

Las variables que se deben controlar en el proceso de revenido son :

- Composición química % de carbono y % de elementos de aleación
- Temperatura
- Tiempo
- Velocidad de enfriamiento

y las propiedades que controlamos generalmente con estas variables son :

- Tenacidad
- Dureza
- Resistencia a la tracción
- Límite elástico
- Ductilidad.

Generalmente la dureza y la tenacidad son las propiedades más importantes en el tratamiento térmico de los aceros templados y revenidos. Sin embargo, también son importantes otras propiedades como la resistencia a la tracción, el límite elástico y la ductilidad al momento de diseñar el tratamiento térmico para algunas aplicaciones . Tanto el límite elástico como la resistencia a la tracción disminuye continuamente y el alargamiento y la reducción de área aumenta con el incremento de la temperatura de revenido. Dos aspectos en el comportamiento de las propiedades mecánicas se observan en los aceros al carbono revenidos. Uno de ellos es que la ductilidad no disminuye en el rango de temperaturas donde se observa la fragilidad por martensita revenida. Esto ocurre cuando los resultados son obtenidos del ensayo de tracción, el cual se realiza a una baja velocidad de deformación y con probetas de sección circular y sin entallas, se observa fragilidad en un cierto rango de temperaturas de revenido.

### **1.3.9.- Alivio de Tensiones**

Consiste en el calentamiento uniforme de una estructura o componente a una temperatura apropiada, mantener esta temperatura por un tiempo determinado, y realizar un enfriamiento uniforme y controlado. Para los aceros al carbono y de baja aleación la temperatura de tratamiento está generalmente entre 450 y 650°C dependiendo del material, y se mantiene por un tiempo mínimo de 1 hora por cada 25 mm de espesor del material. Las velocidades de calentamiento y enfriamiento deben ser menores de 222°C por hora, y el gradiente térmico a través del espesor no debe superar 83°C.

El objetivo de este tratamiento es reducir o eliminar las tensiones residuales que se producen en una estructura como consecuencia de los procesos utilizados en su manufactura<sup>17</sup>.

## **1.4.- RECUBRIMIENTOS DUROS O HARDFACING**

### **1.4.1.- Definición y descripción general**

Los recubrimientos duros consisten en la aplicación de una capa de un revestimiento duro y resistente al desgaste sobre la superficie de un componente por soldadura, termorociado o algún otro proceso relacionado, para reducir el desgaste o pérdida de material por abrasión, impacto, erosión, soldadura localizada (galling) y cavitación. La estipulación de que la superficie se va a endurecer por soldadura, o algún otro proceso relacionado excluye la aplicación de cualquier otro tipo de proceso de endurecimiento, tal como un tratamiento térmico, nitruración, etc.,. Sobre el material a trabajar. Igualmente si la capa de recubrimiento se realiza con el propósito principal de reducir el desgaste, se deben excluir, lógicamente, el uso de materiales usados como por ejemplo para prevenir la corrosión.

Los recubrimientos duros aplicados para disminuir el desgaste pueden variar ampliamente, pudiéndose usar desde las condiciones de servicio más severas de abrasión, tales como trituración y pulverización de rocas, hasta aplicaciones para disminuir el desgaste metal-metal, tal como del desgaste en válvulas donde unas pocas milésimas de mm, son intolerables.

La abrasión es la razón de la existencia de los recargues duros en la industria y la construcción. La abrasión, impacto y algunas veces la corrosión, causan daños y se necesitan materiales que protejan los equipos y alarguen la vida útil. La selección de estos materiales depende de las condiciones y causas de uso. Luego de evaluar las condiciones, se debe escoger el electrodo adecuado para el caso. La dureza es usualmente una cualidad reduciendo los esfuerzos bajo abrasión. Este puede ser disminuido usando carburos de tungsteno, vanadio- tungsteno, carbono-cromo, o combinaciones de estas aleaciones. Grupos de aleaciones de aceros austeníticos, martensíticos son usados para agregar dureza a la parte en uso. Al mejorar una propiedad se perjudica otra, como la resistencia ocurre a expensas de la dureza. Cuando existen altos esfuerzos y choques masivos la pieza tiende a

fragilizarse y fracturar. En este caso el acero al manganeso es preferido como recubrimiento duro sobre el material base.

Existen aplicaciones en donde los recubrimientos duros también se usan para controlar combinaciones de desgaste y corrosión, como las que se encuentran en los sellos para lodo, cuchillas para el procesamiento industrial de alimentos, bombas que transportan líquidos corrosivos, etc., en donde la mayoría de los casos las partes son construidas de acero al carbono o acero inoxidable, materiales que por sí mismos no proporcionan una resistencia deseable al desgaste. Los recubrimientos son aplicados a las áreas de desgaste críticas de los equipos originales o durante la recuperación de las áreas desgastadas.

En los procesos de recubrimientos se busca incrementar el tiempo de servicio de un componente debido principalmente a que las condiciones que causan el desgaste son muy variadas y complejas. Una simple correlación entre las propiedades de los revestimientos y las condiciones de servicio es muy difícil de establecer, pero el mejor aprovechamiento de las propiedades de estas aleaciones para recubrimientos solo se logra con un cuidadoso análisis de las condiciones de servicio, ya que la escogencia al azar de alguna aleación por su reputación o por un análisis superfluo no es aceptable desde un punto de vista ingenieril.

Las principales ventajas del uso de una aleación para recubrimientos duros son:

- 1) Resistencia al desgaste o corrosión exactamente donde es necesaria
- 2) Aplicación inmediata
- 3) Uso económico de costosas aleaciones
- 4) Proporciona una capa superficial dura resistente al desgaste sobre un metal base tenaz que soporta las cargas

### 1.4.2.- Propiedades de los materiales para recubrimientos duros

Las principales propiedades que poseen los materiales para revestimientos duros son:

#### *Dureza*

- Macro dureza
- Micro dureza
- Dureza en caliente
- Resistencia al fenómeno de creep

#### *Resistencia a la abrasión:*

- Bajo esfuerzo bajos
- Bajo esfuerzos altos
- Bajo altos esfuerzos e impacto

#### *Resistencia al impacto*

- Resistencia a la deformación plástica bajo el impacto de cargas cíclicas
- Resistencia al agrietamiento bajo impacto

#### *Resistencia al calor*

- Resistencia a el ablandamiento con el tiempo bajo una temperatura determinada
- Resistencia a los esfuerzos en caliente
- Resistencia al creep
- Resistencia a la oxidación o corrosión por gases calientes
- Resistencia a la fatiga térmica

#### *Resistencia a la corrosión*

#### *Resistencia al desgaste metal-metal*

- Coeficientes de fricción

- Soldadura localizada
- Capas superficiales (óxidos)
- Lubricidad
- Plasticidad

*Resistencia al desgaste erosivo*

- Para partículas que impactan en ángulos grandes
- Para partículas que impactan en ángulos bajos.
- Bajo partículas en suspensión dentro de un líquido
- Bajo condiciones de cavitación

Los materiales duros suelen ser aplicados según las condiciones de servicio para las cuales esta sometido el componente de trabajo.

**1.4.3.- Factores de Uso**

Los recubrimientos duros necesitan la ayuda de la inspección para evitar y combatir los cinco defectos más comunes del uso: abrasión, impacto, adhesión, alta temperatura y corrosión.

Una comprensión de los efectos de los diferentes tipos de uso en base a la utilización del recargue duro limita la aplicación a casos específicos. Actualmente es muy fácil seleccionar el recargue duro basándose en la selección de un solo tipo de uso. Aunque, un metal particular es usado con combinación de dos o mas tipos de uso, la selección del mismo no siempre es fácil. La decisión central para la escogencia, se basa en factores primarios con algunos secundarios.

*Uso Abrasivo*

El uso abrasivo , por compresión entre 55 y 60% de las piezas en la industrias, ocurre cuando el material es frotado constantemente con otro material.

Las piezas típicas que sufren este tipo de abrasión corresponden a componentes de excavaciones, barredoras, trituradoras, palas mecánicas, etc.

Entre los aceros utilizados para este tipo de desgaste se encuentran las aleaciones con alto contenido de carburos y aceros austeníticos con manganeso.

#### *Uso de impacto*

El uso por impacto ocurre cuando momentáneamente, en un extremo de la pieza es aplicado un esfuerzo compresivo entre la pieza y el componente. Resultando una deformación por exceso de esfuerzo, el cual sobrepasa el límite elástico del material. Muchos metales se tornan frágiles y tienden a agrietarse. Esto puede ocurrir por un solo impacto o varios.

Las piezas típicas que entran dentro de esta categoría son las cajas, martillos, barras de impacto.

Los aceros austeníticos al manganeso (11 a 20% Mn) son los mejores, porque ofrecen una alta resistencia al impacto durante el trabajo y presentan buenas características de dureza. Las aleaciones martensíticas presentan una resistencia moderada al impacto.

#### *Uso adhesivo (metal con metal)*

El 50 % de todos los usos corresponden a contactos metal con metal, resultado de una mala lubricación que ocasiona fricción, con la eventual pérdida de capas de metal en áreas localizadas, visibles a través de un microscopio. Como los metales presentan superficies que se deslizan unas sobre otras, las áreas expuestas y fragmentos continúan el mismo camino. La continua remoción de metal durante el trabajo acelera la pérdida del mismo.

Componentes típicos sujetos a este tipo de uso incluyen rollos, carros de transporte, piezas que trabajan con lubricación.

Los recargues duros utilizados para estos casos están compuestos por martensita. Otras aleaciones incluyen aceros austeníticos al manganeso y cobalto. Es importante resaltar que este tipo de desgaste varía de aplicación en aplicación y que para cada caso se presentan variables a tomar en cuenta.

### *Uso a Alta temperaturas*

El deterioro ocurre cuando la superficie del acero es expuesto a altas temperaturas por periodos de tiempo largo. Los efectos de la temperatura en la microestructura en general tienden a reducir la durabilidad. La resistencia en uso de estas aleaciones disminuye a mayor temperatura al ocurrir inadvertidamente un recocido.

La fatiga por temperatura, puede referirse también a grietas por calor, resultado del repetitivo calentamiento y enfriamiento del mismo. La respectiva expansión y contracción causa ciclos térmicos que eventualmente exceden la capacidad del metal a recuperarse, causando grietas y fallas en el material.

Los componentes típicos usados en este fenómeno, equipos de sinterización, etc.

Aceros martensíticos con un contenido del 5 al 12% de cromo producen excelentes desempeño de trabajo al combatir la fatiga térmica. Muchos carburos de cromo tienen propiedades estables hasta los 1200°F. Pero se recomienda no exceder ni acercarse mucho a dicha temperatura.

### *Uso corrosivo*

Los metales ferrosos están sujetos a diferentes formas de corrosión. Los metales reducen su superficie al oxidarse en contacto con el medio ambiente que los rodea. La corrosión es usualmente secundaria como factor de uso cuando se selecciona la aleación para el recubrimiento.

### *Superficie final*

Las aleaciones de recargues duro presentan un rango de maquinabilidad desde fácil hasta difícil. Por lo tanto es importante conocer a priori la selección de la aleación y el método de soldadura. Es el depósito maquinable, en que grado, se necesita corte con llama, debe ser tratado térmicamente, es aceptable?.

Algunas aleaciones duras de carburos son sensitivas al agrietamiento por esfuerzos o después de depositarse la soldadura y enfriarse. Existen grietas presentes en el material, que son características de la aleación, y que a bajos esfuerzos y controladas no afectan el uso de dicho material. Usualmente un bajo contenido en el porcentaje de carbono, genera un alivio a que ocurran grietas de este tipo. El bajo porcentaje de carbono en la aleación, es

sinónimo de baja resistencia a la abrasión. Algunas de las aplicaciones de este tipo de materiales se encuentra en la industria de la comida, piezas que deben preservar un grado de aceptabilidad a las grietas por resistencia a la abrasión en uso <sup>(18)</sup>.

Las aleaciones para desgaste metal-metal suelen ser base hierro y martensíticas con solo enfriarse al aire libre que aplicando con cuidado pueden ser usadas sin agrietamientos sobre partes mecánicas. Las aplicaciones típicas son sobre los carros inferiores de los tractores o palas mecánicas y rodamientos de grúas.

Son diseñadas para formar martensita durante el enfriamiento normal al aire del depósito, produciendo depósitos de entre 45 y 60 HRc, haciendo que este tipo de revestimiento se les denomine autoendurecibles. Los contenidos de carbono llegan hasta 0,7% y otros elementos como Molibdeno, tungsteno, níquel y cromo (hasta 12%) son agregados para aumentar la templabilidad, resistencia y la promoción de la formación de martensita y elementos como el manganeso y silicio son agregados para adicionar soldabilidad.

Las aleaciones más usadas para este tipo de condiciones contienen carburos como por ejemplo, los de tungsteno, cromo molibdeno o vanadio en una matriz de cobalto, las aleaciones que contienen fases, aceros para herramientas u las aleaciones de aceros al manganeso.

Las más comunes aplicaciones de este tipo de revestimientos son rodamientos metal-metal, sin lubricación de las partes metálicas involucradas, tales como componentes de tractores, ruedas y rieles de trenes. La resistencia al impacto es inferior con respecto a los revestimientos perlíticos o austeníticos, pero existe una compensación con el incremento de la dureza y la resistencia al desgaste abrasivo.

#### **1.4.4.- Selección de la aleación de revestimiento duro**

No hay método estándar de clasificación y especificación de los distintos electrodos de revestimiento duro. La AWS ha emitido dos especificaciones, la A5.13 “Specifications for surfacing weld rods and electrodes” y la A5.21, “Specifications for composite surfacing weld rods and electrodes”. Hay cierto traslape entre estas dos especificaciones y con la A5.6 y la A5.7 “Copper and Copper alloy welding electrodes and rods”. Muchos de los electrodos de revestimiento duro que se pueden conseguir comercialmente no están amparados por esas especificaciones. Los proveedores de metal de aporte proporcionan datos que establecen las clases de servicio y han clasificado sus productos dentro de ellas. Los proveedores también suministran información completa para usar sus productos para distintas aplicaciones y para diversas industrias, tales como canteras, acerías, fundiciones, etc. Esta información es muy valiosa y se debe consultar.

Un buen sistema de clasificación ha sido establecido por el American society for metals committee on hardfacing. Estos datos se encuentran en Metals Handbook, sección 3, “Hardfacing by arc welding”. Este sistema tiene cinco grupos principales clasificados de acuerdo con el contenido de aleación, las subdivisiones basadas en los elementos principales de aleación. Esos datos los ha tomado y simplificado Spencer, quien agregó las especificaciones AWS cuando se pueden aplicar. La mayoría de esas aleaciones se obtienen como varillas macizas de aporte en longitudes derechas o en bobinas, o en electrodos cubiertos. Algunos de los materiales están disponibles en polvo para aplicaciones especiales.

El grupo 2 contiene aceros de mayor aleación. El grupo 2A tiene como principal componente al cromo (Cr), con un contenido total de aleación de 12 a 25%.

Muchas de esas aleaciones también contienen molibdeno. Aquellas que tienen más de 1,75% de carbono son hierros fundidos de aleación media. El grupo 2B tiene molibdeno (Mo) como principal elemento de aleación, pero muchos también contienen cantidades apreciables de cromo. Las aleaciones de revestimiento duros de los grupos 2A y 2B son más resistentes al desgaste, menos fuertes a un choque y son más caras que las del grupo 1.

Los grupos 2A y 2B son bastantes fuertes y su resistencia a la compresión es relativamente alta. Son eficaces para construir partes muy gastadas y se usan para relleno antes de

emplear materiales de mayor aleación para revestimiento. Resisten mucho al impacto y a la abrasión a temperaturas normales.

Se debe establecer un procedimiento de soldadura para el buen recubrimiento o revestimiento. El procedimiento debe relacionarse con la parte en especial que se vaya a revestir. Debe especificar el procedimiento de soldadura, el método de aplicación y las operaciones antes de soldar. El procedimiento de soldadura debe dar las temperaturas de precalentamiento y entre pasos, y cualquier técnica especial que se deba emplear, tal como el patrón del revestimiento, ya sea en cordones o en vaivén, la interfase entre cordones adyacentes, y finalmente, cualquier operación después de la soldadura, como martillado y el método de enfriamiento. Cuando se sigue un procedimiento planeado adecuadamente se podrá predecir la vida de servicio de la parte.

En muchos casos se pueden necesitar dos materiales separados (la aleación de cuerpo, que se usa cuando la parte se debe recuperar o está demasiado gastada, y la aleación del revestimiento duro). En general, no se depositan más de tres capas de recubrimiento duro. Las aleaciones de recubrimiento duro mucho más caras que las de cuerpo. El revestimiento duro se debe reponer cuando se haya desgastado la aleación dura. Cuando el depósito es mayor de tres capas se pueden encontrar otros problemas, como la fractura, que influirán en la vida de servicio del depósito. El otro factor que se debe considerar es la dilución, que tiene lugar entre la aleación de revestimiento duro y la del metal base. Se debe evitar una penetración excesiva y una unión deficiente entre los cordones adyacentes.

Una consideración primordial es la localización de la superficie terminada con respecto a la superficie desgastada. En muchos casos, la primera capa del revestimiento puede tener dilución suficiente del metal base como para que no sea adecuada para el servicio deseado. En este caso, la superficie desgastada debe quitarse más, para que haya espacio suficiente para dos capas del metal de superficie, que darán una mejor vida de servicio. Hay otras situaciones en las que una parte de deba remaquinar después de revestirla. El maquinado de la superficie no debe ser en la interfase entre metal duro de superficie y el metal base. Puede ser necesario un premaquinado. Esto es importante cuando el metal base es de material endurecible.

Son importantes el precalentamiento, la temperatura entre pasos, y el enfriamiento de la parte que se esté revistiendo. Los factores que se aplican a la soldadura del metal base en la fabricación normal, se deben seguir para el revestimiento. Se usa el precalentamiento para reducir al mínimo la distorsión, y para evitar choque térmico y rompimiento superficial. La temperatura de precalentamiento depende del contenido de carbono y de aleación del metal base y de la masa de la parte que se esté revistiendo. Se debe usar un precalentamiento del tipo de inmersión. Si la parte es de forma extremadamente compleja se debe aumentar el precalentamiento. La temperatura de precalentamiento se debe mantener a través de toda la operación de soldadura, y al terminar se deja enfriar lentamente.

Hay que conocer la composición del metal base para lograr temperaturas adecuadas de precalentamiento.

La soldadura se debe ejecutar en la posición plana, si es posible. Si no, debe especificar el electrodo y el procedimiento correctos. Es extremadamente importante el espesor del depósito de revestimiento. Si el depósito es demasiado grueso puede haber problemas. Las aleaciones duras deben tener cuando más dos capas. La primera capa incorporará cierta dilución del metal base, pero la segunda debe dar las propiedades esperadas. Algunos tipos de aleaciones se pueden usar en tres capas. Para cada producto en particular hay que consultar con los datos del fabricante.

La técnica para dar cuerpo debe llegar a 6 mm de la superficie final. Esto permitirá después que se apliquen dos capas del material duro de revestimiento para llevar a la parte a su dimensión final. Se recomienda una técnica de vaivén en lugar de un cordón recto. El espesor de la capa en cada paso no debe ser mayor de 5 mm. Los cordones adyacentes deben quedar muy adentro del cordón anterior para dar una superficie tan pareja como sea posible. Hay controversia en lo que respecta al patrón de las soldaduras que se debe seguir al aplicar los depósitos de revestimiento. En general, la dirección de soldadura no debe ser transversal a la carga en la parte. Esto puede dar lugar a concentraciones de esfuerzos y afectar la vida en servicio. En ciertos tipos de metal se recomienda el martillado, pero esto es según el metal. Se deben seguir las instrucciones del fabricante.

Las aleaciones de recargue duro pueden ser clasificadas en dos grupos, dependiendo de su uso: construcciones altas y aleaciones de recargue duro.

Partes de material gastado pueden ser restauradas como otra pieza original para cualquiera de los dos grupos. Este resultado algunas veces puede ser igual que la misma pieza original.

Para añadir protección al equipo, se aplican recubrimientos duros en las partes más susceptibles de uso. Estos recubrimientos mejoran la resistencia al desgaste del metal, hasta tres veces aumentando la vida de trajo útil.

Los recubrimientos duros pueden ser en base de hierro o no ferrosos. Las aleaciones de base de hierro, son subdivididos a su vez de acuerdo a su fase o microestructura. La resistencia y vida de uso, varia y se consigue en el mercado unos más económicos que otros. Los base hierro se dividen en tres grande grupos, austeniticos, martensiticos y carburos.

Las aleaciones austeniticas, ofrecen una excelente resistencia al impacto, buena resistencia a la abrasión, y una buena recuperación al ser gastada para devolverla a sus dimensiones originales. Una propiedad característica de las aleaciones austeniticas es su buena dilución de carbón y manganeso en los aceros de baja aleación. Estas aleaciones presentan superficies duras, siendo dúctiles en su interior. La dureza de la superficie suele estar dentro de los 50 R<sub>w</sub>C.

Las aleaciones martensiticas presentan buena resistencia, buena resistencia a la abrasión metal - metal, y es usada en construcciones. Estas aleaciones presentan diferencias según la rata de enfriamiento en su dureza, Otro factor que afecta notoriamente el recubrimiento es la composición química.

Los bajo carbono, los bajo aleación, aleaciones martensiticas son utilizados en construcción. Presentan en general alta resistencia a la deformación, resistentes y tienen buena resistencia al uso.

Cuando el contenido de carbono es alto (6 a 12%) son materiales con mejor comportamiento metal - metal.

Los aceros martensiticos con cantidades mayores del 0,25% de carbono y mucho cromo, son resistentes al choque térmico, presentan buena relación metal - metal y un moderado

comportamiento a la corrosión, por lo que su uso se ha hecho extensivo como recargue duro.

Un alto contenido de cromo mejora el compromiso con la abrasión, adhesión y resistencia al impacto. Aunque estas aleaciones son buenas, se prefiere el uso de aceros austeníticos en los campos de trabajo.

Las aleaciones de carbono producen excelentes resultados en resistencia a la abrasión, buena resistencia al calor y una resistencia al impacto baja. Son usados para aplicaciones que requieran alto uso abrasivo. La combinación de carbón con un mínimo de aleación (12%) (primariamente Cromo), formando carburos dispersos en toda la superficie del depósito. Estos carburos dispersos son, los que proporcionan en la matriz una excelente resistencia a la abrasión.

La combinación de resistencia a la abrasión e impacto, se logra con la adición de pequeñas cantidades de carburos (3% de carburos con titanio y columbio), lográndose buenos resultados. Con incrementos en el contenido de carbono se alcanza una buena resistencia a la abrasión pero decrece proporcionalmente la resistencia. El producto superficial con carburo adquiere esfuerzos transversales originando grietas, lo cual es un problema a tomar en cuenta para prevenir fallas. Típicamente al disminuir los carburos disminuyen las grietas.

Un material en buen estado es preferible como base para la aplicación del recargue duro, y debe ser de características similares. Estas aleaciones exhiben buena resistencia a la abrasión a altas temperaturas y son consideradas no maquinables.

Las aleaciones no ferrosas son usadas en aplicaciones que se requieran altas temperaturas. Las base cobalto son más expansivas pero combinadas muestran alta resistencia a la corrosión y resistencia a la abrasión por uso, metal - metal e impacto. Las base níquel están sustituyendo a las de cobalto en costo y usos.

El revestimiento por aleación dura es un método excelente de recuperar partes y evitará pérdidas considerables de tiempo y dinero. Se está haciendo popular con los fabricantes de equipo original para revestir de aleación dura las partes de su nuevo equipo para dar una mejor vida de servicio.<sup>19</sup>

La correcta selección de una aleación de recargue duro es resultado de un estudio de la vida del equipo. Otros factores influyen en la selección y precisión del electrodo. Una alta dureza no es factor predominante en la resistencia al uso.

Las pruebas de dureza, como lo son Rockwell y Brinell, permiten la medición de la dureza en la superficie de la aleación. Muchas aleaciones presentan alta resistencia a la abrasión debido a la presencia de carburos dispersos en toda la matriz. Estas pruebas son posibles en función de los carburos en función del área. Este es otro factor que determina la elección del recargue a utilizar.

La resistencia depende de la combinación de dureza y de la microestructura metalúrgica del recargue duro. La microestructura de la aleación varía de acuerdo a la composición química, los efectos del radio de los carburos en la matriz y el tipo de carburos en la aleación. La aleación con dureza mayor, presenta de forma uniforme los carburos dispersos a lo largo tiene mejor resistencia a la abrasión.

La selección del proceso es fácil si el tiempo dedicado a la definición del servicio, condiciona la soldadura a aplicar. Esto es crucial al seleccionar el método más efectivo y la relación costo eficiencia del recargue duro. Típicamente, esta es la razón o primer factor importante a la hora de seleccionar la aplicación, si el resultado requiere una decisión, se debe responder las siguientes preguntas:

- 1) Cual es el método preferido de soldadura
- 2) Cual es el metal base o parte del equipo a trabajar
- 3) Factores de uso
- 4) Cuales son los requerimientos finales

#### **1.4.5.- Procesos de soldadura de recargues duros**

El más común de los procesos de recargues duros utilizado es el de metal cubierto, flux cored y arco sumergido. Algunos otros procesos como oxifuel y gas tungsteno son usados, pero la baja aplicación limita su uso. A continuación se muestran las ventajas y desventajas de los procesos más utilizados:

Ventajas del proceso

- Disponibilidad relativamente fácil de conseguir las aleaciones
- Gran demanda en aplicaciones de soldadura
- Facilidad de soldabilidad en posiciones convencionales
- Deposición de material elevada
- Requiere poca experiencia del operador.

Desventajas del proceso:

- Requiere múltiples capas
- Rata de deposición lenta

*Metal base*

El conocimiento del metal base es esencial para definir el procedimiento de recargue duro a utilizar, ya que el mismo debe ir de acuerdo a las características del mismo. Principalmente el conocimiento de dos amplias características del material base como lo son: el carbono en aceros de baja aleación y manganeso en los aceros austeníticos.

El carbono y los aceros de baja aleación existen en muchas clases. Variando en función de la cantidad de carbono y elementos aleantes, lo que hace necesario tener precauciones en el uso de la soldadura. Pre calentamiento, post calentamiento, velocidad de enfriamiento y esfuerzos son necesarios controlarlos.

Los aceros austeníticos al manganeso son resistentes, fuertes y dúctiles en su uso, y universalmente se conocen como componente resistente al uso por su resistencia, porque son duros y resisten el impacto. Ellos proporcionan una excelente base para fragilidad, altos carburos que están contenidos en aleaciones. La temperatura proporciona un efecto

negativo al aumentar en los aceros al manganeso austenítico un aumento de la fragilidad. El precalentamiento no debe usarse en metales con temperaturas menores a 10° C.

La temperatura de interfase no debe exceder los 260 °C durante el proceso de soldadura.

Ciertamente el metal base debe prepararse para la aplicación del recubrimiento. Grasa, aceite, impurezas, y otros materiales deben ser removidos a priori antes de la soldadura. Es bueno preparar la superficie antes de practicar el recargue duro para evitar posibles defectos y grietas que ocurren después de la puesta en marcha de la pieza en servicio.

#### **1.4.6.- Recomendaciones para la aplicación de recargues duros**

Se recomienda seguir los siguientes pasos:

- Limpieza : remueva, grasa aceite, polvo y restos de otra soldadura.
- Preparación de la superficie: mal acabado, deformación o superficies duras (áreas) deben ser removidas por maquinado, pulverizado o limpieza con arco de carbón.
- Espesor del deposito: un excesivo deposito de material origina grietas y la pérdida de la pieza o puesta fuera de servicio. Un uso apropiado de estos materiales mejora las propiedades de aplicación.
- Precalentamiento y temperaturas de interfase: Algunas aleaciones contienen pequeñas partículas de carbón y es necesario precalentar para poder realizar un recubrimiento adecuado. También es necesario un enfriamiento lento. Para mas información se debe consultar los manuales especializados.
- Distorsión : El calor de la soldadura causa distorsión , formación de áreas de tratamiento inefectivo. Usando los métodos adecuados de soldadura, se minimizan los riesgos y consecuencias.
- Procedimiento de soldadura: Cada electrodo se debe utilizar bajo los parámetros de trabajo expuestos por el fabricante.

## **1.5.- ESPECIFICACIONES DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA**

### **1.5.1.- Preparación de la soldadura**

Los tratamientos a las superficies mejoran propiedades como resistencia a la corrosión, impacto y abrasión. Aunque, no siempre estos tratamientos ofrecen las mejores condiciones para cada caso, inclusive algunos tratamientos mal aplicados, ocasionan que el material presente menor vida útil. Tomando en consideración los tratamientos a la pieza, ciertos factores deben ser considerados:

- Metal Base: Afecta la elección y concentración de materiales a utilizar.
- Tipo de uso: Se toma en consideración la aplicación final del recargue duro.
- Proceso de soldadura: Dependiendo del tamaño y número de piezas, se debe escoger el equipo y metodología adecuado para realizar el recargue.

Depende de estos tres factores la correcta selección del producto.

### **1.5.2.- Soldadura al arco protegida sobre superficies tratadas**

El método SMAW proporciona el equipo y previsiones de máxima flexibilidad para soldaduras remotas en posiciones difíciles. Usando otros procesos las operaciones pueden ser muy difíciles, por lo que este proceso es el ideal para procesos específicos.

Si un electrodo es designado para ser usado con corriente directa positiva (DCEP) o corriente directa negativa (DCEN), la selección de DCEN es usualmente la que produce menor dilución. La operación DCEN no siempre es buena como DCEP, depende de él electrodo. Aunque la industria recomiende considerar la polaridad.

### **1.5.3.- Técnica de Soldadura**

La altura del deposito recomendada es  $1/16$  a  $1/4$  de pulgada. (1,5 a 6 mm). El ancho recomendado es de  $3/4$  a  $1 1/4$  de pulgada (20 a 30 mm). Cuando el segundo deposito es ancho, si es sobrecapa se recomienda de  $1/4$  a  $1/3$  del ancho del primer cordón. Esto garantiza una homogeneización de la superficie con el material depositado. Agregar mas

capas de soldadura incorpora mas defectos que beneficios (se recomienda hasta un máximo de tres capas).

La oscilación, y los grandes cordones, reducen la dilución, agregar cordones aumentan la dilución. Una alta oscilación significa una baja dilución. La mejor dilución ocurre con cordones estrechos y de pasada lenta.

La posición del electrodo influye a su vez, en un ángulo entre 75 y 90 grados sobre la superficie, ofrece las mejores ventajas y es el método más utilizado.

#### **1.5.4.- Sugerencias de Pre calentamiento**

El pre calentamiento no es necesario para todos los metales pero es útil en las aleaciones de acero. Cuando se pre calienta (entre 260-371°C), se favorece la dilución de carburos de manganeso, nunca se debe pre calentar a temperaturas mayores de 260°C, ya que transforma las fases presentes, cambiando las propiedades del material. El pre calentamiento y temperaturas de interpasos deben ser controlados para no cambiar el tamaño del grano y reducir la resistencia del deposito.

#### **1.5.5.- Selección del electrodo para el trabajo**

La American Welding Society's ANSI/AWS A5.13-80R, *specifications for solid surfacing welding rods and electrodes*, contiene la clasificación de 18 electrodos, incluyendo hierro, níquel, cobalto y ciertos tipos de cobre. Una adición de nueve clasificaciones en base a hierro en su composición. Existen ocho clasificaciones para los electrodos de carburos de tungsteno en ANSI/AWS A5.21-80R, *specification for composite surfacing welding rods and electrodes*. Muchas industrias del ramo tienen sus clasificaciones particulares. <sup>(20)</sup>

### **1.5.6.- Ensayo de Dureza**

#### *Descripción :*

La prueba de dureza mide la resistencia de un material a ser penetrado. El penetrador es generalmente una esfera, pirámide o cono, hecho de un material mucho más duro que el que se ensaya, por ejemplo: acero endurecido, carburo de tungsteno o diamante. En la mayoría de las pruebas, la carga se aplica al presionar lentamente el penetrador perpendicularmente contra la superficie ensayada por un período determinado. De los resultados, se puede calcular un valor de dureza conociendo la carga aplicada y las dimensiones de la impresión. Estas pruebas no deben hacerse cerca del borde de la muestra o cerca de otra penetración ya existente. La distancia mínima para efectuar una nueva toma de dureza, es de tres veces el diámetro de la impresión anterior.

Este ensayo no es necesariamente destructivo, ya que en muchos casos la huella dejada en el material no afecta la integridad del componente. Adicionalmente existen equipos portátiles que permiten realizar el ensayo en campo, sin necesidad de tener que remover una sección de la pieza como muestra.

Existen varios métodos para realizar este ensayo, los cuales utilizan diferentes penetraciones y cargas, tales como:

- a) Ensayo Brinell (Dureza Brinell - HB)
- b) Ensayo Vickers (Dureza Vickers HV)
- c) Ensayo Rockwell (Dureza Rockwell HR)

Para algunos materiales, tales como aceros al carbono, los valores de dureza pueden ser relacionados con la resistencia máxima a la tracción, por lo cual es un valor muy importante.

#### *Variables importantes del ensayo*

A continuación se indican las variables que un inspector debe verificar en este ensayo :

- Calibración del equipo
- Carga utilizada

- Tipo de penetrador
- Preparación de la superficie a ensayar
- Posicionamiento de la muestra
- Número y distribución de tomas de dureza.

#### *Resultados del ensayo*

El valor obtenido de este ensayo da indicaciones de las propiedades metalúrgicas y mecánicas del material. Dependiendo de la aleación, la dureza puede tener valores máximos y/o mínimos permisibles, de acuerdo a los códigos a especificaciones.

### **1.5.7.- Ensayo Metalografico**

#### *Descripción*

Consiste en determinar con la ayuda del microscopio las características estructurales de un metal o una aleación. Mediante este ensayo se pueden determinar el tamaño de grano: así como el tamaño, forma y distribución de varias fases e inclusiones que tienen gran efecto sobre las propiedades mecánicas del metal.

La superficie de la muestra que se requiere ensayar, se desbasta y pule mediante abrasivos y/o reacción electroquímica, hasta obtener un acabado de espejo. Luego se ataca químicamente en forma selectiva, con el propósito de crear contraste entre los distintos granos y/o fases que forman la microestructura del material. Finalmente la muestra se observa en el microscopio, generalmente a aumentos entre 100 y 400X.

Adicionalmente, existe una prueba simple denominada macroataque, en la cual se observa visualmente una superficie que ha sido desbastada y atacada químicamente. Este ensayo permite determinar por diferencia de coloración, variaciones significativas en la microestructura de diferentes zonas, tales como ubicación de soldaduras, tratamientos térmicos superficiales, etc.

### *Resultado del ensayo*

Los ensayos metalográficos no son a menudo requeridos en especificaciones de soldadura, sin embargo, son utilizados para determinar :

- a) La forma, distribución y dimensiones de inclusiones no metálicas en soldadura
- b) El número de pases de soldadura
- c) La estructura metalúrgica del depósito de soldadura y de la zona afectada por el calor
- d) La calidad de una unión soldada: penetración, dimensiones, etc.
- e) Causas de falla de uniones soldadas en servicio (análisis de fallas)

### **1.5.8.-Observación Metalografica de la Soldadura**

La figura 3 muestra una macrografía típica de una soldadura de un acero donde el corte transversal ha sido convenientemente pulido y atacado, el resultado es mostrado con un aumento de 4X. Según los textos clásicos en la macrografía de una soldadura es posible observar: 1.- Inclusiones no metálica, 2.- número de pasadas, 3.- estructuras de granos, 4.- extensión y estructura de la zona afectada por el calor (ZAC), 5.- defectos macroscópicos. Este tipo de macrografía es sencillo de obtener y las técnicas de ataque son standard. Sin embargo, una metalografía de una soldadura puede brindar mucha más información útil si se recurre a reactivos especiales, ampliándose de ese modo, en forma insospechada, la comprensión de los fenómenos asociados con la tecnología de la soldadura.

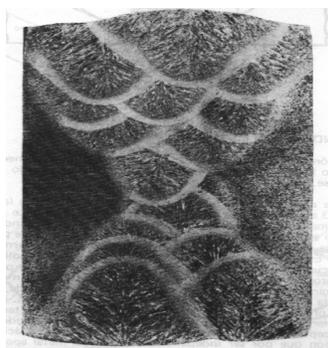


Fig 3 Macroataque de una soldadura

El esquema de la figura 4, muestra la zona de un cordón de soldadura, de acuerdo con la terminología propuesta por la Escuela de SAVAGE :

- 1) Zona totalmente fundida
- 2) Zona fundida mezclada
- 3) Zona fundida no mezclada
- 4) Zona parcialmente fundida
- 5) Zona afectada por el calor



Fig 4. Zonas de un cordón de soldadura

El estudio de la metalurgia del metal de soldadura generalmente se restringe a la zona totalmente fundida, sin distinguir entre las regiones mezcladas y no mezcladas y excluyendo a la zona parcialmente fundida. Se discutirán brevemente estas dos zonas para mostrar su importancia tecnológica. <sup>(21)</sup>

#### ZONA FUNDIDA NO MEZCLADA

Es la región que corresponde al metal base fundido, perteneciente a la capa laminar que no llegó a mezclarse con el baño metálico, formado por los metales de aporte y base.

Esta zona aparece aun existiendo una fuerte agitación en la pileta líquida. La figura 4 esquematiza la presencia de esta zona. El avance del baño de fusión provoca una erosión en el metal base que origina zonas fundidas no mezcladas. En el curso de este proceso el metal base fundido se desliza dentro de la capa límite siguiendo la forma del frente de solidificación. Estas proyecciones de metal base fundido y solidificado tienen gran importancia por su relación con algunos problemas que se presentan en soldadura de aceros templados y revenidos de alta resistencia. En estos materiales se pueden originar

microfisuras en la zona fundida no mezclada, que están relacionadas con la microsegregación resultante de la solidificación. Estas microfisuras se pueden propagar como consecuencia del campo local de tensiones asistidas por la presencia de hidrógeno. En aceros inoxidable la zona fundida no mezclada puede ser susceptible de una corrosión localizada en medios ácidos por poseer una composición que por ser independiente de la del metal aportado es similar a la del metal base mientras que su estructura es la de solidificación. Finalmente, en el caso de los plaquados de aceros ferríticos por medio de depósitos de soldadura de aceros inoxidables austeníticos la zona fundida no mezclada puede resultar martensítica. Esta estructura, de baja ductilidad en la línea de fusión, puede producir fallas en los ensayos de plegado realizados durante la calificación de los procedimientos de soldadura.<sup>(22)</sup>

#### ZONA PARCIALMENTE FUNDIDA

La definición de la zona afectada por el calor (ZAC) se refiere a aquella porción del metal base que no ha sido fundida, pero cuyas propiedades mecánicas o microestructura han sido alteradas por el calor durante la soldadura. Esta definición es adecuada cuando se utiliza un microscopio de bajo poder, con más aumentos es posible observar en la región vecina a la línea de fusión una zona fundida parcialmente. Se puede considerar que la ZAC es la región comprendida entre el borde de la zona totalmente fundida y un punto donde no hay cambios microestructurales detectables como producto de los ciclos térmicos asociados con la soldadura. De este modo, la porción de metal parcialmente fundida visible, por medio de técnicas especiales, en la vecindad de la línea de fusión puede ser considerada como parte de la ZAC.

Es posible considerar dos mecanismos operativos como orígenes de la zona parcialmente fundida :

- 1) La zona parcialmente fundida donde se destaca que es probable que se funda localmente el metal base, debido a que no es homogéneo químicamente.
- 2) Un mecanismo más complejo que involucra condiciones fuera del equilibrio fue denominado licuación Constitucional. Se basa en que tanto durante el calentamiento como el enfriamiento de la ZAC los cortos tiempos asociados con la soldadura no permiten que opere completamente la difusión. De este modo es

posible que determinadas partículas, presentes en el metal base, sean rodeadas por una película líquida aun a temperaturas significativamente menores que las de equilibrio.

Como consecuencia de la existencia de la zona parcialmente fundida, es posible que formen microfisuras que pueden ser causa de defectos serios. <sup>(23)</sup>

# Capítulo II

---

## PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

## 2.- PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El procedimiento experimental realizado en esta investigación se describe de acuerdo al diagrama de flujo indicado en la figura 5 donde se detallan las diferentes etapas del mismo y ensayos ejecutados.

### 2.1.- CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

#### 2.1.1.- Material Base

Se utilizaron planchas de acero 1020, de dimensiones 150 x 100 x 20 mm (Largo, ancho, alto) Ver figura 6. Este material se caracterizo desde el punto de vista químico.

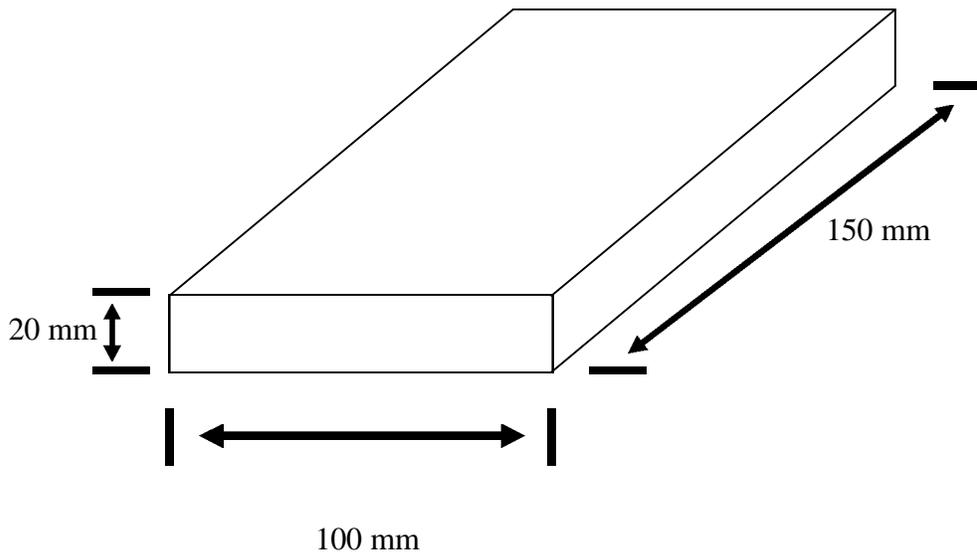


Fig.6 Dimensiones de las planchas para material base

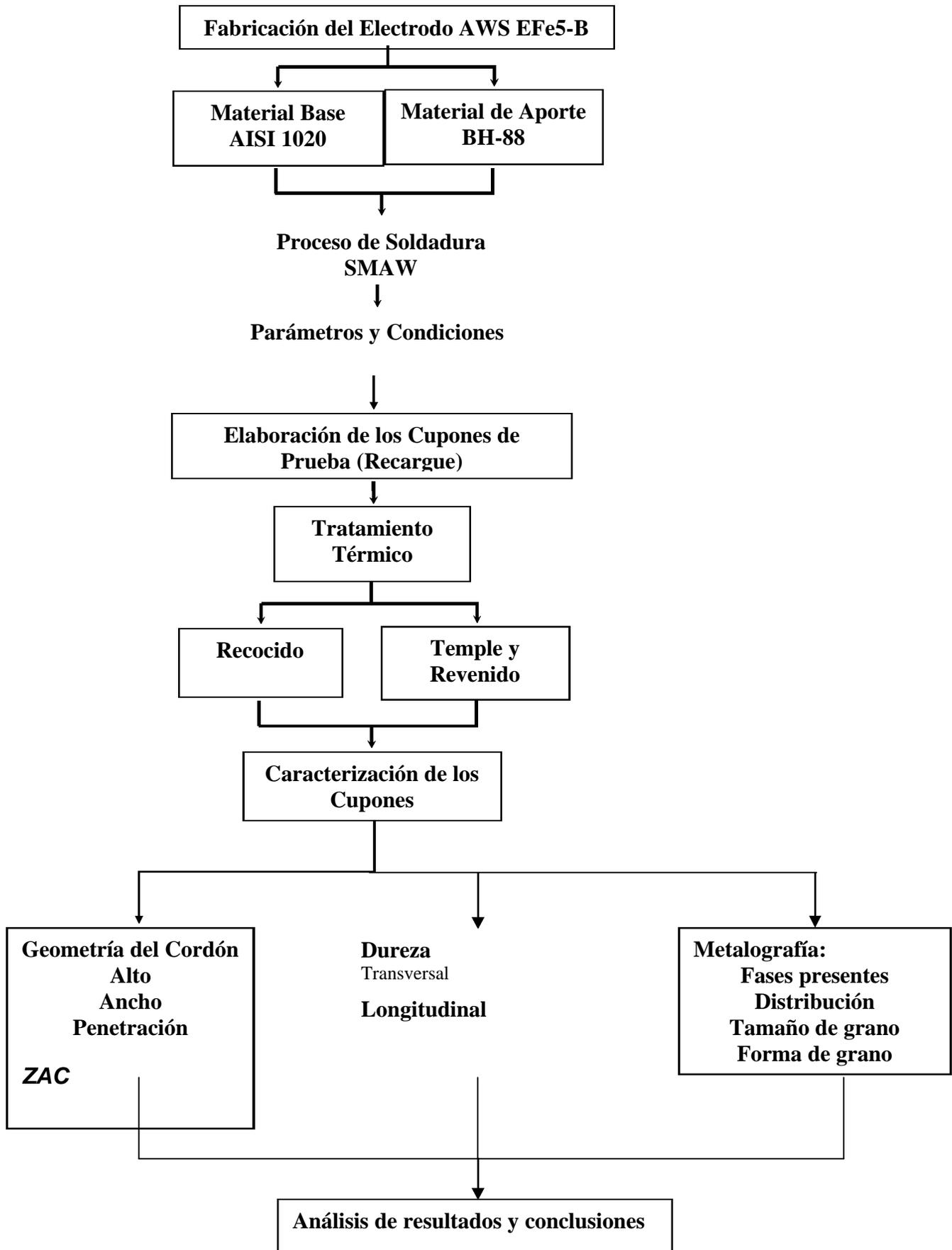


Fig. 5 Esquema del procedimiento Experimental

### **2.1.1.1.- Análisis Químico**

Para la determinación de la composición química se empleó el método de espectrofotometría de emisión de plasma de argón a fin de determinar el contenido de carbono, silicio, manganeso y azufre. Este análisis se realizó mediante la obtención de 4 grs de viruta de la plancha de acero a partir de perforaciones de la misma usando un taladro de banco. La mecha del mismo fue previamente limpiada con acetona para evitar la contaminación de las mismas.

### **2.1.2.- Material de Aporte**

El material de aporte empleado fue un electrodo recubierto de 2,5 mm de diámetro, de clasificación AWS/ASME: SFA-5.13 / E Fe5-B; denominado AGA BH-88, para revestimientos duros utilizados en condiciones de severos desgastes combinados con golpes, para recuperación de partes de máquinas y herramientas sometidas a fricción severa con o sin roce de metal-metal. En cuanto al análisis químico del material de aporte, se reporta el especificado por el fabricante directamente al depósito (ver tabla 2).

## **2.2.- CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA PARA COMPOSICIÓN QUÍMICA**

Se prepararon piezas de acero 1010, limpiando su superficie y rectificándolas con el uso de un cepillo industrial y un esmeril respectivamente para ser utilizadas como material base con las siguientes medidas 10 x 4,7 x 2,1 cm (largo x ancho x alto). Se procedió a precalentar las piezas a 100°C; de igual forma se precalentaron los electrodos a una temperatura de 200°C por ½ hora para eliminar la humedad. El material de aporte fue depositado bajo los parámetros estipulados en la sección 3.4 de la norma AWS A5.13-80R (es decir, obtención de probetas de ensayo para análisis químico con las siguientes especificaciones: 4,4 x 3,8 x 1,9 cm (largo x ancho x alto); ver figura 7, corriente continua de polo positivo (CC+), amperaje de 75 Amp y voltaje oscilante entre 20-24 Voltios). Se procedió a realizar una nueva limpieza del depósito con cepillo de alambre y esmeril, con el objeto de eliminar posibles salpicaduras y la presencia de escoria en el cordón.

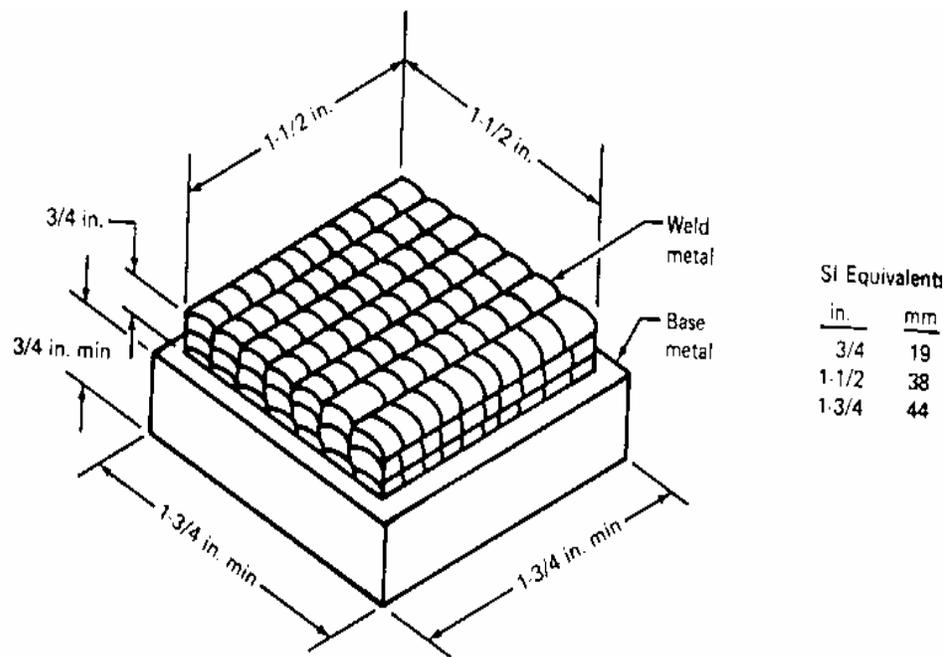


Figura 7. Medidas de la probeta para análisis químico

Se llevaron dichas probetas al taladro industrial, y con una Broca Joran para aceros extra duros de 7/16, se tomaron muestras (virutas) para realizar los ensayos correspondientes: 1 gr. Para carbono y azufre y 1,20 grs. Para la disolución en el plasma (ver fig. 8). El material obtenido (virutas) fue tratado de la siguiente forma:

\* Disolución del material en ácidos según la norma del manual de métodos para disolución de muestras N° MD003 con método **Fusión de carbonato de sodio**. Para obtener el contenido de Cr con una muestra de 0.0250 grs.

\* Disolución de material en ácidos según la norma del manual de métodos para disolución de muestras N° MD008 con método **Disolución de muestras de acero al carbono y ferroaleaciones**. Para obtener Mn, Si, W y V. con una muestra de 0.5 grs.

\* Medición por técnica de plasma de análisis químico de metales según norma ASTM SECCIÓN 3 VOLUMEN 3.05 "Metals test methods analytical procedures" sección E 1024

\* Medición de la cantidad de carbono y azufre con el equipo LECO según la norma del manual de métodos de ensayo N° ME005, ASTM E-350, con método **Determinación de carbono y azufre**.

Finalmente se procede a evaluar los resultados obtenidos con la tabla N°2 de la norma ANSI/AWS A5.13-80R



Fig 8. Equipo de espectrofotometria de emisión de plasma de argón tipo ARL 3410 ICP

## **2.3.- PREPARACION DEL PROCESO DE SOLDADURA**

### **2.3.1.- Diseño y preparación de la mesa de trabajo**

Se acondiciono una mesa de trabajo para la soldadura de recubrimiento de tal manera que funcionara como soporte de la pieza de trabajo (ver figura 9), con el objeto de obtener parámetros similares de deposición en cada una de las probetas.



Fig.10 Mesa de trabajo y rectificador utilizados

### **2.3.2.- Fuente de energía eléctrica**

Para realizar los depósitos de soldadura se utilizó un rectificador HOBART MEGA-ARC 400, En la figura 10 se muestra la fuente eléctrica. Este rectificador se acondicionó para operar en los siguientes rangos:

- corriente continua con polo positivo (CC+)
- Amperaje constante de 75 Amp
- Voltaje oscilante entre 20 y 24 voltios.

## **2.4.- ELABORACION DEL RECARGUE**

### **2.4.1.- Preparación del material base**

Antes de depositar los cordones de soldadura, la superficie del material base, es decir, las planchas de acero 1010, se limpiaron cuidadosamente mediante cepillo metálico y fueron rectificadas, para garantizar que la superficie fuese limpia y no se formarían planos; luego finalmente se utilizó acetona industrial a fin de eliminar posibles residuos de grasa, aceite o cualquier otro tipo de contaminante presentes en la superficie.

### **2.4.2.- Preparación de los electrodos de recargue**

Los electrodos de recargue fueron elaborados en la planta piloto de la planta, siguiendo las normas de dicha empresa para la selección y aceptación del alambre que compone el alma y la selección y preparación de los materiales que constituyen el fundente, mediante un proceso de extrusión se elaboraron los electrodos, se hornearon a una temperatura y tiempo establecidos para finalmente obtener los electrodos de trabajo, con las especificaciones establecidas por las normas internacionales de dichos electrodos, es decir, un diámetro de 2,5 mm y un largo de 350 mm.

### **2.4.3.- Pre calentamiento de las piezas de trabajo**

Se procedió a precalentar las piezas del material base acero 1010, a 100°C con la ayuda de una llama de gas de acetileno y con la ayuda de tizas termosensibles se llevó el control de la temperatura. De igual forma se procedió a precalentar los electrodos en un horno a 200°C por ½ hora para eliminar todo rastro de humedad.

#### 2.4.4.- Elaboración del recargue

El proceso de recargue se llevó a cabo depositando cordones individuales de un solo pase, sobre el material base, uno al lado del anterior con una distancia entre cordón de aproximadamente (y como mínimo) 1,5 cm (ver figuras 10); la temperatura antes y entre pases fue controlada para no afectar el nuevo cordón a realizar; y fueron realizados en una sola dirección, de izquierda a derecha, tomando en cuenta la completa remoción de la escoria en el cordón previamente depositado, mediante el uso de un cepillo de alambre y un pequeño martillo, en total se colocaron seis cordones por plancha. Para un total de dos planchas con seis cordones cada una.

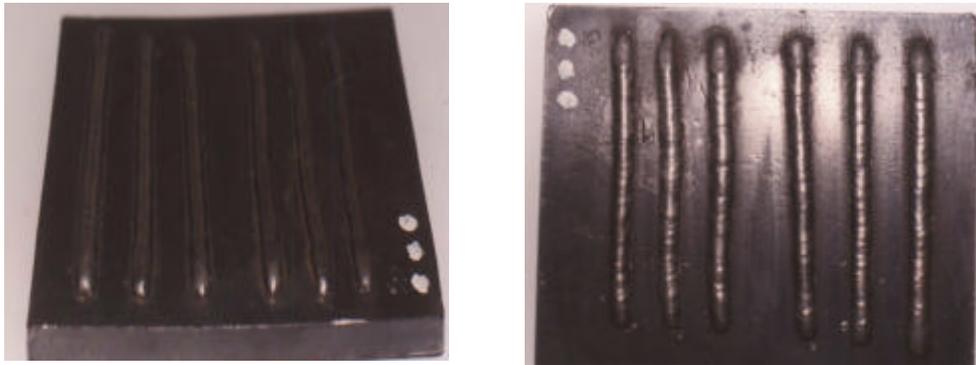


Figura 10 Planchas con cordones de un pase

Dos nuevas planchas, con seis cordones de pases dobles y dos más con seis cordones de pases triples, completaron el número total de planchas de muestras para los ensayos.

A su vez cada plancha se dividió en tres probetas transversales (ver figura 11).



Figura 11. Corte en probetas para la realización de los cupones

En general se obtuvieron 2 probetas con seis cordones simples, 2 probetas con dos cordones dobles y dos probetas con cordones triples para evaluar los tratamientos térmicos, correspondientes a probetas sin tratamiento, con recocido y con temple/revenido.

La posición de soldadura fue 1G (plana horizontal), el ángulo de trabajo del electrodo respecto al plano de soldadura fue aproximadamente  $80^\circ$  y la distancia de este con la placa fue aproximadamente de 5 mm. En la figura 12 se muestra como se realizó el proceso descrito anteriormente.

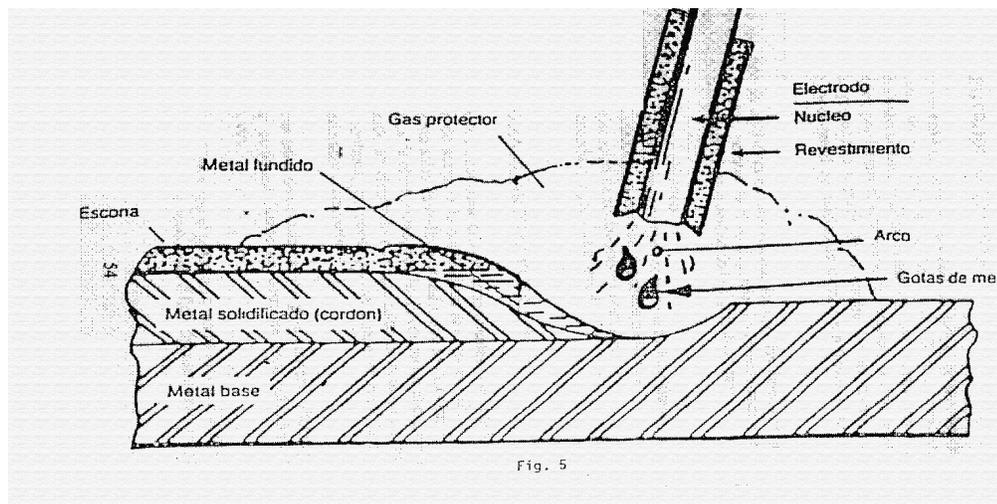


Fig. 12 Esquema del proceso SMAW de soldadura aplicado

#### 2.4.5.- Rendimiento

El rendimiento de deposición es un parámetro que permite normalizar el ensayo y conocer si el proceso realizado se mantiene bajo las normas estipuladas, una forma de obtener este parámetro es mediante el cálculo numérico de la cantidad de material depositado versus el número de pases realizados. Este parámetro se obtiene de la siguiente forma; se pesa inicialmente la plancha de material base sin ningún cordón, luego de realizar el cordón (ya limpiado) se procede nuevamente al pesaje del mismo y se realiza la resta; obteniéndose la cantidad de material suministrado por dicho electrodo, en sucesivos pases hasta completar los seis, se obtiene la cantidad de material depositado en toda la plancha, y un promedio general para cada plancha elaborada.

## **2.5.- Ensayos**

Las evaluaciones destructivas y no destructivas realizadas a los cupones de prueba definitivos se aplicaron en función de los ensayos exigidos por la norma ANSI/AWS A5.13-801R. Y otros ensayos que fueron convenientes para una completa caracterización del material.

### **2.5.1.- Caracterización de los depósitos según la sección A.2 de la norma A5.13-801R**

La sección A.2 de la norma A5.13-801R. Establece una serie de evaluaciones obligatorias sobre el cupón de pruebas de recargue los cuales son especificados a continuación:

- Análisis químico
- Inspección visual
- Tratamientos Térmicos (recocido y temple/revenido)
- Evaluación microestructural
- Dureza (longitudinal y transversal)

A continuación se detalla la forma en que se realizaron los mismos.

#### **2.5.1.1.- Análisis químico**

Realizado de igual forma que la sección 2.2

#### **2.5.1.2.- Inspección Visual**

La inspección visual se llevó a cabo con el objeto de determinar la posible presencia de escoria adherida, salpicaduras, porosidades y grietas, tanto en el cordón como en el material base, así como para establecer la geometría del cordón.

#### **2.5.1.3.- Tratamientos Térmicos**

Los tratamientos térmicos permiten transformar la microestructura presente en el material y cambiar propiedades de dichos materiales para su uso y beneficio; se trabajo bajo la norma ANSI/AWS A5.13-80R. Sección A2.12.

A continuación se indica la manera en que se realizaron los ensayos.

Luego de realizar los cupones (tanto los de uno, dos y tres pases respectivamente), de limpiarlos y cortarlos transversalmente, se separaron en tres renglones, un primer renglón o probetas muestra, sin tratamiento térmico, un segundo lote con recocido y un tercer con temple/revenido.

#### **2.5.1.3.1.- Probetas sin tratamiento Térmico**

Luego de obtener los seis cupones (dos con un solo pase, dos con doble pase y dos con triple pase), se tomaron uno de cada uno como muestras testigos, a las cuales se les llamo probetas sin tratamiento térmico.

#### **2.5.1.3.2.- Probetas Recocidas**

Luego de obtener los seis cupones (dos con un solo pase, dos con doble pase y dos con triple pase), se tomaron uno de cada uno y se procedió a realizar el tratamiento térmico de recocido recomendado por la norma ANSI/AWS A5.13-80R en el appendix A2.12. Primero un pre-calentamiento a 500°C por dos horas en un horno NABER (fig. 13), para luego realizar un recocido suave a 830°C por cinco (5) horas.

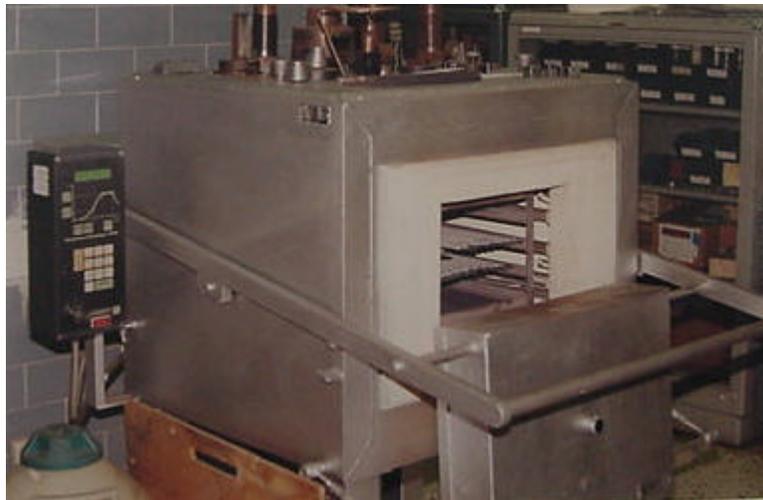


Fig. 13 Horno Naber

### **2.5.1.3.3.- Probetas Templadas y revenidas**

Luego de obtener los seis cupones (dos con un solo pase, dos con doble pase y dos con triple pase), se tomaron uno de cada uno y se procedió a realizar el tratamiento térmico de recocido recomendado por la norma ANSI/AWS A5.13-80R en el appendix A2.12. Primero un calentamiento hasta alcanzar los 1200°C por dos horas en un horno NABER, para luego realizar un temple en aceite y llevarlas a temperatura ambiente. Se procedió a realizar un revenido para aliviar tensiones, el cual consistió en llevar las probetas dentro de un horno a una temperatura oscilante entre 530 – 540°C por una hora.

### **2.5.1.4.- Evaluación microestructural**

Para la evaluación metalográfica se cortaron los cupones de prueba en forma individual, es decir, se separaron en forma individual cada cordón; con el objeto de evaluar la superficie perpendicular a la dirección de deposición. Las probetas obtenidas fueron en total 108, separándose algunas para su análisis microestructural. Dichas probetas (representativas de los tratamientos térmicos y del número de pases) fueron debastadas con la secuencia de lijas 80, 120, 200, 500 y 800. La secuencia de pulido fue: lona-alumina 1 $\mu$ , paño verde-alumina 0,3  $\mu$  y paño rojo-alumina 0,05  $\mu$ . Las probetas ya pulidas fueron atacadas con una mezcla al 3% de picral y una relación 1:1 en Ácido Clorhídrico, luego fueron observadas y fotografiadas a un aumento de 50X y 200X.

Las fases presentes fueron identificadas con la ayuda del Metal Handbook de metalografía. El tamaño de grano fue establecido utilizando la norma Venezolana COVENIN 2169-84. “Determinación del tamaño de grano en aceros”; usando el método de Heyn para el cálculo de G.

### **2.5.1.5.- Dureza**

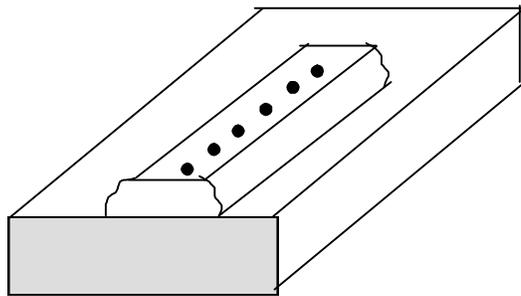
Para la medición de la dureza se trabajó con la norma ASTM NORMA E18 – 89a; y las mediciones fueron realizadas con un durómetro universal marca Wilson Rockwell Tester (Fig 14), usando una carga de 100 Kgf en la escala Rockwell B para el material base y 310 Kgf en la escala Rockwell C para el material de aporte, con un indentador con punta de diamante.



Fig. 14 Durómetro

La dureza realizada a las probetas fue realizada en dos formas:

- a) Dureza Longitudinal: luego de realizado el cordón se rectificó la parte superior del mismo, para obtener una superficie plana como lo exige la norma y poder realizar dureza Rockwell C a lo largo del cordón, para cada una de las probetas (sin tratamiento (con uno, dos y tres pases) con tratamiento (Recocido y temple/revenido) (con uno, dos y tres pases). Se realizaron un total de 7 mediciones para cada caso posible por cordón con una separación entre lectura y lectura de un milímetro, además se promediaron dichos valores, eliminando la lectura mayor y menor respectivamente y se les calculó la desviación estándar. En la figura 15 se representa la localización de las mediciones.



• **Mediciones de dureza**

Fig. 15 Esquema de las mediciones de dureza longitudinal

- b) Dureza Transversal: luego de realizado los diferentes cordones se hizo un corte transversal a las probetas y se evaluó la dureza a lo largo en forma descendente, como puede observarse en la figura 16. para obtener un perfil de dureza. Se tomaron entre 9 y 10 mediciones, para cada caso promediando los valores y agregando la desviación estándar correspondiente.



Fig 16 Mediciones a realizar transversalmente

#### **2.5.1.6.- Evaluaciones Adicionales**

##### **2.5.1.6.1.- Evaluación Macroestructural**

Luego de realizar el ataque químico a las probetas para ver su microestructura se procedió a realizar una sesión de macrofotografías para poder observar la geometría del cordón y poder evaluar la altura, penetración, zona afectada por el calor y el ancho de cada cordón en cada una de las probetas analizadas.

##### **2.5.1.6.2.- Difracción de rayos X**

La difracción de rayos X fue el método seleccionado para evaluar y conocer los carburos presentes en los cordones realizados, primero se selecciono y prepararon muestras de los cordones a utilizar como probetas con las siguientes medidas 15x10x 2 mm (largo x ancho x alto). Luego de colocar las probetas en el equipo de difracción marca Phillips para difracción de rayos X ; O-70 con goniometro modelo 1050, display Phillips 1390 y Graficador Phillips 8203. Se obtuvieron los difractogramas correspondientes, con lo cual, en forma directa se obtuvieron las intensidades y ángulos dobles. Con el uso de la Ley de Bragg de las distancias interplanares y la obtención de la intensidad relativa se obtuvo la data, que por el método de Fick, basado en la búsqueda y comparación de fichas se hallaron algunos de los carburos presentes en las muestras.

# Capítulo III

---

**RESULTADOS EXPERIMENTALES Y ANÁLISIS**

### 3.- RESULTADOS EXPERIMENTALES Y ANÁLISIS

#### 3.1.- Caracterización de los materiales

##### 3.1.1.- Material base

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos del análisis químico realizado al metal base y su composición nominal según la norma ASTM

Tabla 1. Composición del material base

	%C	%Mn	%S	%P	%Si
Material Base	0,15	0,8	0,005	0,002	0,20
Nominal 1010	0,10	0,8-1,2	-	-	0,15-0,4

En este análisis realizado al material base se puede observar que la composición del mismo se encuentra dentro de los valores nominales especificados para este tipo de acero por las normas respectivas; esto garantiza que se trabajo con el material especificado.

##### 3.1.1.2.- Metalografía

La figura 17 muestra la microestructura del metal base, en ella se aprecia la microestructura típica de un acero de bajo carbono en donde la fase más clara representa la ferrita y la fase más oscura es la perlita. La distribución y tamaño de los granos dentro del material se observa homogéneamente dentro del material base.

La importancia de conocer el estado inicial del material base mediante una micrografía radica en la necesidad de observar el cambio de estructura durante la deposición de los cordones del revestimiento aplicado y los tratamientos térmicos aplicados, con respecto a la condición inicial del mismo, ya que los cordones y dichos tratamientos someten al material base a diferentes condiciones de calentamiento y enfriamiento que producen variaciones dentro del mismo en función del calor aportado.

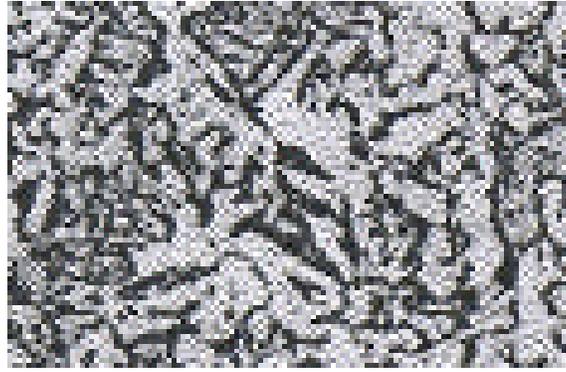


Fig.17 Microestructura del material base

### 3.1.2.- Material de Aporte

En la figura 18 se muestra una probeta utilizada para análisis químico del material de aporte.



Fig. 18. Probeta para evaluar el material de aporte

En la tabla 2. se reporta el análisis químico nominal del material de aporte según lo especificado por el fabricante.

Tabla 2. Análisis químico del material de aporte

	%C	%Mn	%W	%Cr	%V	%Si	%Mo	%Fe
AGA	0,5-0,9	0,6	1,0-2,5	3,0-5,0	0,8-1,3	0,8	5,0-9,5	Resto
BH-88								

Debido a la gran variedad de productos para recargues duros que poseen una extensa variedad de composiciones químicas que conllevan a una igualmente extensa variedad de propiedades y características, este tipo de electrodo se rige por la norma AWS/ASME: SFA-5.13 / E Fe5-B. Adicionalmente la certificación de este tipo de producto, realizado por la empresa coincide con la norma y se encuentra estandarizado.

### 3.2.- Rendimiento de los electrodos

Luego de realizar los depósitos correspondientes se obtuvo la siguiente data:

Tabla 3. Rendimiento del deposito\*

Plancha	N°	P. I	P+1	P+2	P+3	P+4	P+5	P+6	P 1	P 2	P 3	Depositado
1	1	1888	1899	1911	1921	1928	1936	1945	57.09			57.09
2	1	1891	1902	1915	1924	1932	1941	1949	57.7			57.7
4	2	1794	1803	1812	1818	1827	1832	1838	43.92	45.74		89.66
5	2	1747	1757	1766	1774	1782	1787	1796	48.63	44.83		93.46
3	3	1868	1878	1885	1892	1898	1905	1913	44.12	48.66	49.01	141.79
6	3	1825	1834	1842	1849	1855	1861	1869	43.68	49.34	49.61	142.63

\* Todos los pesos están representados en gramos

Donde:

**N°** = Número de cordones realizados por plancha

**P.I** = Peso inicial de la plancha sin cordones

**P + 1** = Peso de la plancha mas el peso de un cordón realizado

**P + n** = Peso de la plancha mas el peso de n cordones realizados

**P 1** = Peso final del material depositado con un solo cordón

**P 2** = Peso final del material depositado con dos cordones sobrepuestos

**P 3** = Peso final del material depositado con tres cordones sobrepuestos

Se observa que las planchas A y B, correspondientes a cordones de un solo pase, muestran una cantidad de material depositado muy similar, al igual que las probetas C y F correspondientes a las planchas con tres pases sobrepuestos, lo que garantiza que la velocidad de deposición utilizada por el soldador y los parámetros utilizados se corresponden y tienen similitud para garantizar la veracidad de los ensayos. Las planchas D

y E, correspondientes a cordones de dos pases sobrepuestos, presenta una variación en el peso final de material depositado, pero la misma es de poca diferencia y se encuentra dentro del margen de trabajo solicitado.

Basado en lo expuesto anteriormente se obtiene la figura 19.

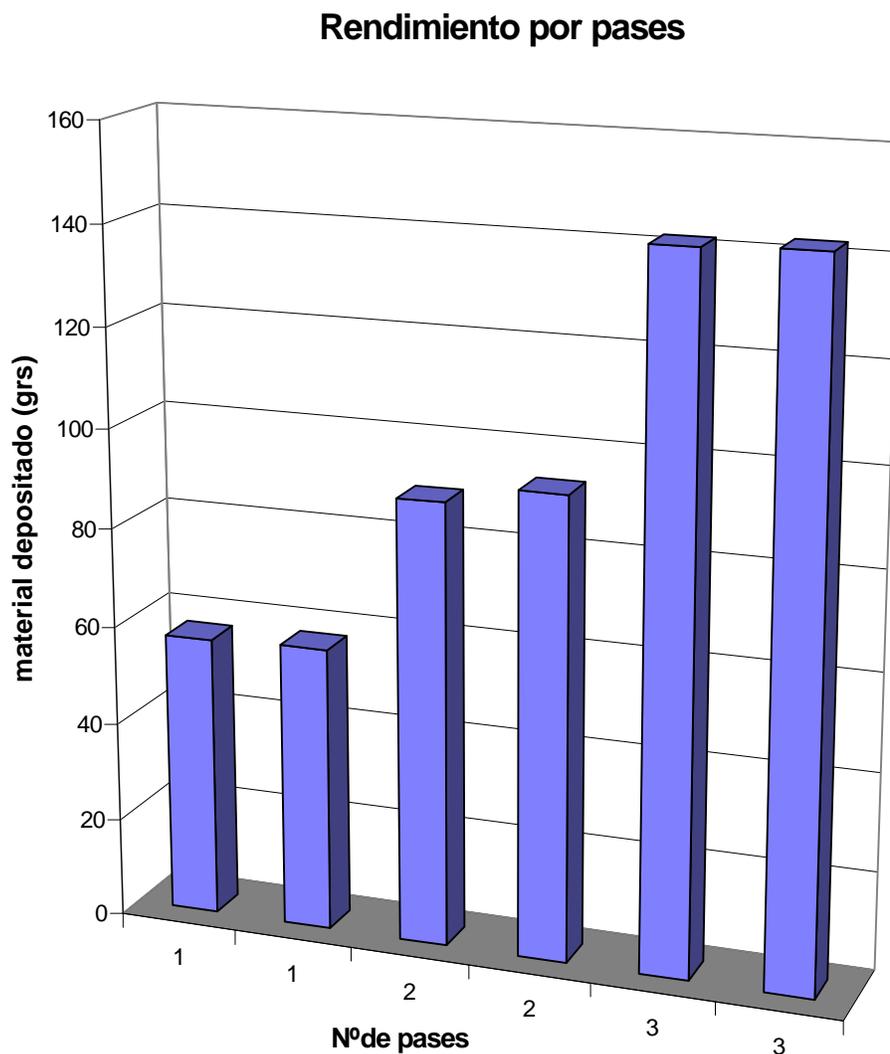


Figura 19. Rendimiento por pases realizados

### 3.3.- Tratamientos térmicos

Para realizar los tratamientos térmicos se procedió a clasificar las probetas de la siguiente forma:

Plancha 1



Seccionada en tres partes

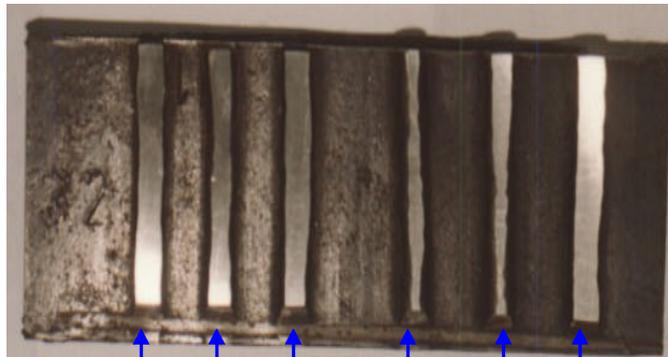


1.1

1.2

1.3

Y clasificada finalmente:



1	1	1	1	1	1
2	2	2	2	2	2
1	2	3	4	5	6

En la tabla siguiente se muestra el resultado para clasificar todas las probetas utilizadas:

Tabla 4. Probetas utilizadas en los diferentes Tratamientos Térmicos

	Sin tratamiento	Recocido	Temple
<b>1 pase</b>	1.1/1.2	1.3/2.2	2.1/2.3
<b>2 pases</b>	4.1/4.2	4.3/5.1	5.2/5.3
<b>3 pases</b>	3.1/3.3	3.2/6.1	6.2/6.3

### 3.4.- DUREZA

#### 3.4.1.- Dureza Longitudinal

La evaluación de la dureza se realizó en dos ensayos diferentes, para la dureza longitudinal, solo se reportan los valores en el material de aporte a nivel superficial y se obtuvieron los siguientes resultados que se muestran en las siguiente tablas:

##### 3.4.1.1.- Probetas sin Tratamiento Térmico

###### 3.4.1.1.1.- Cordones de 1 Pase

Dureza expresada en Rocwell C

Tabla 5. Dureza transversal en cordones sin tratamiento térmico con un pase

Probeta	Dureza	Promedio	Desviación
1.1.1	55-51-55-54-54-56-52	54	0,21
1.1.2	54-54-53-54-54-54-53	54	0,01
1.1.3	54-59-59-60-60-61-60	60	4,16
1.1.4	60-57-57-57-58-57-55	57	1,22
1.1.5	55-56-54-55-57-57-57	56	0,12
1.1.6	55-57-56-56-55-57-58	56	0,27
1.2.1	53-55-55-56-55-52-55	55	0,34
1.2.2	50-52-49-55-56-55-51	53	1,10
1.2.3	56-58-56-57-56-57-59	57	0,16
1.2.4	56-59-58-57-58-56-56	57	0,21
1.2.5	56-57-56-58-55-56-56	56	0,01
1.2.6	51-51-57-58-57-56-59	56	2,29
<b>Promedio General</b>		<b>55.91 ± 1</b>	

Se puede observar que los cordones evaluados presentan variaciones en cada una de las mediciones a lo largo del ensayo, pero las mismas son de poca diferencia. Las durezas reportadas en todos los ensayos consecuentes son el promedio de dichas mediciones.

### 3.4.1.1.2.- Cordones de 2 pases sobrepuestos

Dureza Expresada en Rocwell C

Tabla 6. Dureza en cordones sin tratamiento térmico con un pase doble

Probeta	Dureza	Promedio	Desviación
4.1.1	47-54-56-54-55-55-55	55	7.51
4.1.2	51-54-51-53-54-56-54	53	0.87
4.1.3	52-51-55-55-49-52-55	53	0.08
4.1.4	53-52-52-56-56-57-50	54	0.08
4.1.5	52-53-56-52-55-63-52	54	1.22
4.1.6	52-53-55-51-54-53-54	53	0.21
4.2.1	48-55-55-54-47-54-52	52	2.86
4.2.2	50-57-59-53-54-54-58	55	4.16
4.2.3	48-57-54-55-57-58-58	56	8.84
4.2.4	55-58-58-52-58-58-58	57	0.48
4.2.5	53-58-58-58-58-56-56	58	2.29
4.2.6	55-56-57-52-56-57-58	56	0.12
	<b>Promedio General</b>	<b>54.66 ± 2</b>	

### 3.4.1.1.3.- Cordones de 3 pases sobrepuestos

Dureza Expresada en Rocwell C

Tabla 9. Dureza en cordones sin tratamiento térmico con un pase triple

Probeta	Dureza	Promedio	Desviación
3.1.1	48-54-53-53-50-55-53	53	3.06
3.1.2	47-56-50-50-55-55-56	53	5.44
3.1.3	48-50-47-45-54-55-54	50	0.98
3.1.4	54-50-53-56-51-57-51	53	0.12
3.1.5	52-55-52-50-49-51-53	52	0.01
3.1.6	53-52-55-50-55-56-50	53	-
3.3.1	51-53-53-54-54-54-54	54	0.87
3.3.2	55-54-54-53-54-52-55	54	0.21
3.3.2	53-53-53-54-54-54-53	53	0.03
3.3.4	50-54-48-54-55-54-54	53	1.22
3.3.5	52-48-55-55-48-54-50	52	0.01
3.3.6	51-54-54-54-53-54-50	53	0.57
	<b>Promedio General</b>	<b>52.75 ± 1</b>	

### 3.4.1.4.- Promedio de dureza en las probetas sin tratamiento térmico

Tabla 10. Dureza en cordones sin tratamiento térmico

<b>Probeta</b>	<b>Dureza</b>	<b>Desviación (<math>\pm</math>)</b>
1 Pase	55.91	1
2 Pases	54.66	2
3 Pases	52.75	1

En las probetas ensayadas sin tratamientos térmicos podemos observar que la dureza en términos generales no sufre variaciones amplias, pero se delimita un decrecimiento en el valor de las mismas a medida que aumenta el número de pases. A partir de los valores reportados, se puede afirmar que la dureza del depósito se encuentra dentro de los parámetros establecidos por el fabricante (entre 50-60 HRc); por lo tanto, los cordones desde el punto de vista de la dureza, califican según la norma. Como se puede observar en la figura 20.

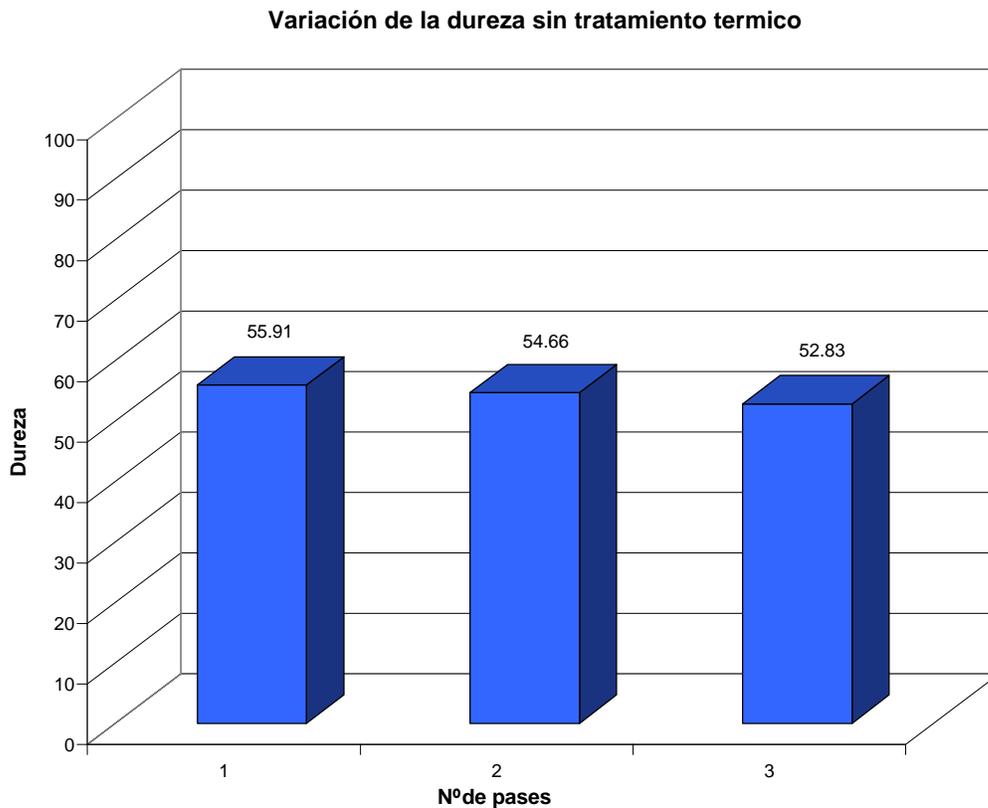


Fig 20. Variación de la dureza en probetas sin tratamiento térmico

### 3.4.1.2.- Probetas con Tratamiento Térmico de recocido

(Precalentamiento por 2 horas a 500°C y Recocido a 830°C por 5 horas)

#### 3.4.1.2.1 Cordones de 1 Pase.- (Dureza expresada en Rocwell C)

Tabla 9. Dureza en cordones con tratamiento térmico de recocido con un pase

Probeta	Dureza	Promedio	Desviación
1.3.1	24-31-26-31-31-30-30	29	4.16
1.3.2	30-33-23-31-30-32-31	30	-
1.3.3	30-29-31-26-28-30-30	29	0.12
1.3.4	30-35-34-35-34-35-35	34	2.66
1.3.5	32-32-33-34-32-31-33	32	0.03
1.3.6	32-31-35-34-28-29-27	31	0.21
2.2.1	26-30-30-30-29-28-28	29	1.22
2.2.2	27-34-32-32-30-32-33	31	3.26
2.2.3	25-28-25-28-28-29-28	27	0.87
2.2.4	28-31-28-31-30-28-30	29	0.34
2.2.5	24-31-28-31-32-30-27	29	4.16
2.2.6	27-31-31-31-29-30-30	30	1.36
<b>Promedio General</b>		<b>30 ± 2</b>	

### 3.4.1.2.2.- Cordones de 2 pases sobrepuestos

Dureza Expresada en Rocwell C

Tabla 10. Dureza en cordones con tratamiento térmico de recocido con un pase doble

Probeta	Dureza	Promedio	Desviación
4.3.1	32-33-32-33-33-33-31	32	0.03
4.3.2	24-32-32-34-32-31-33	31	8.50
4.3.3	27-33-34-33-33-32-33	32	4.40
4.3.4	30-32-33-32-33-33-33	32	0.87
4.3.5	28-33-33-33-33-34-34	33	3.48
4.3.6	30-31-33-32-33-33-33	32	0.76
5.1.1	33-33-33-32-30-33-34	33	0.03
5.1.2	32-33-34-34-33-34-35	34	0.41
5.1.3	29-34-35-35-35-35-35	34	4.16
5.1.4	30-33-35-33-31-33-35	33	1.36
5.1.5	32-32-35-33-33-33-34	33	0.21
5.1.6	30-34-34-34-34-34-32	33	1.64
<b>Promedio General</b>		<b>32.66 ±2</b>	

### 3.4.1.2.3.- Cordones de 3 pases sobrepuestos

Dureza Expresada en Rocwell C

Tabla 11. Dureza en cordones con tratamiento térmico de recocido con un pase triple

Probeta	Dureza	Promedio	Desviación
3.2.1	32-32-30-31-32-32-34	32	0.001
3.2.2	24-34-33-32-32-34-35	33	0.05
3.2.3	30-33-28-30-34-35-31	32	0.41
3.2.4	31-35-35-34-34-34-35	34	1.5
3.2.5	30-33-33-35-34-33-34	33	1.64
3.2.6	34-34-34-35-34-34-33	34	-
6.1.1	26-32-33-29-32-32-32	31	3.93
6.1.2	31-32-33-34-33-34-34	33	0.66
6.1.3	29-32-34-31-34-34-30	32	1.5
6.1.4	29-33-33-34-31-34-31	32	1.64
6.1.5	28-33-33-33-34-33-32	32	3.06
6.1.6	29-32-23-27-34-32-33	30	0.16
<b>Promedio General</b>		<b>32.33 ± 1</b>	

### 3.4.1.2.4.- Promedio de dureza en las probetas con tratamiento térmico de recocido

Tabla 12. Dureza en cordones con tratamiento térmico de recocido

Probeta	Dureza	Desviación
1 Pase	30	2
2 Pases	32.66	2
3 Pases	32.33	1

En las probetas ensayadas con tratamiento térmico de recocido podemos observar que la dureza en términos generales no sufre variaciones amplias, existe una pequeña oscilación de los valores como se puede observar en la figura 21.

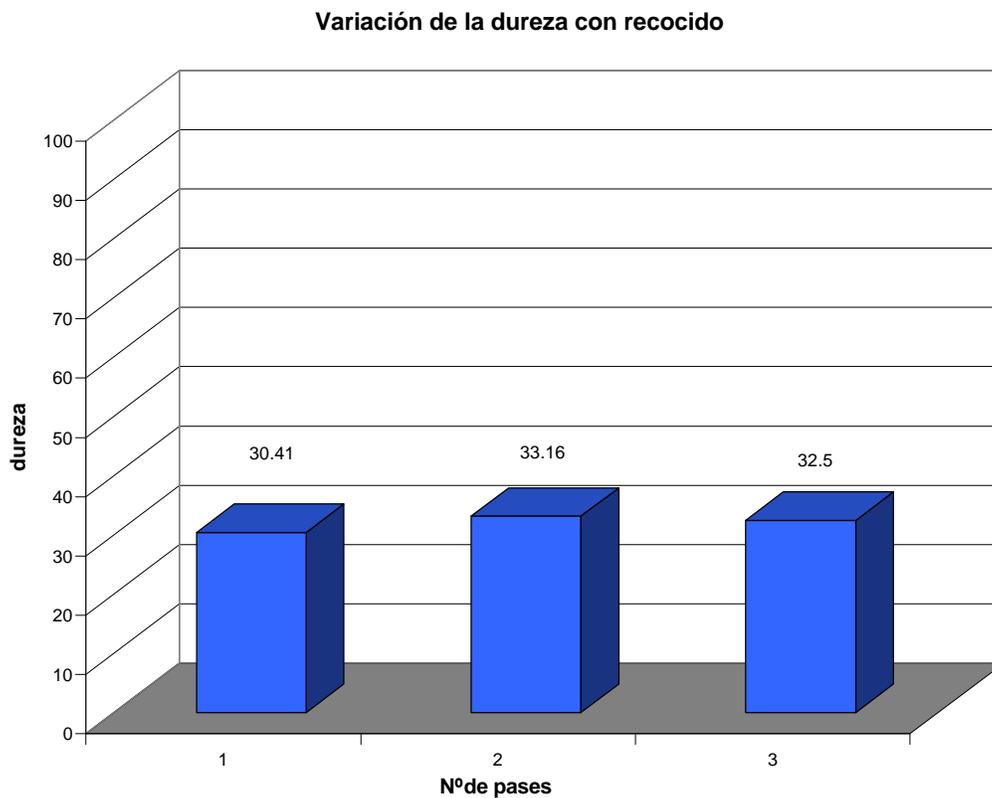


Fig. 21 Variación de la dureza en función del tratamiento térmico de recocido

### 3.4.1.3.- Probetas con Tratamiento Térmico de Temple y Revenido

(Temple por 2 horas entre 1200-1300°C y Revenido entre 540-530°C por 1 hora)

#### 3.4.1.3.1 Cordones de 1 Pase.-

Dureza expresada en Rocwell C

Tabla 13. Dureza en cordones con tratamiento térmico de temple y revenido con un pase

Probeta	Dureza	Promedio	Desviación
2.1.1	23-19-25-26-29-21-22	24	0.05
2.1.2	17-10-18-18-22-22-19	18	0.16
2.1.3	21-23-22-20-17-17-16	19	0.41
2.1.4	21-15-17-21-17-19-20	19	0.98
2.1.5	14-15-16-17-19-16-17	16	0.87
2.1.6	15-16-16-18-15-13-16	16	0.05
2.3.1	15-18-20-19-18-13-13	17	0.41
2.3.2	19-23-27-23-20-21-19	22	1.22
2.3.3	28-22-24-16-18-20-15	20	9.55
2.3.4	30-30-25-25-26-23-24	26	2.47
2.3.5	23-28-19-25-22-25-23	24	0.05
2.3.6	22-23-14-20-23-14-16	19	1.64
<b>Promedio General</b>		<b>20 ± 1</b>	

#### 3.4.1.3.2.- Cordones de 2 pases sobrepuestos

Dureza Expresada en Rocwell C

Tabla 14. Dureza en cordones con tratamiento térmico de temple y revenido con un pase doble

Probeta	Dureza	Promedio	Desviación
5.2.1	33-27-28-27-23-31-29	28	0.08
5.2.2	30-31-35-37-31-28-36	33	1.10
5.2.3	21-27-20-25-22-26-23	23	0.98
5.2.4	24-25-25-25-23-26-25	25	0.08
5.2.5	30-23-23-35-32-32-34	30	0.003
5.2.6	24-24-24-25-24-21-25	24	0.003
5.3.1	29-31-39-33-35-39-32	34	4.16
5.3.2	26-35-32-42-34-29-38	32	6.58
5.3.3	20-19-23-14-21-23-24	21	0.05
5.3.4	13-14-17-20-17-18-17	17	2.12
5.3.5	22-24-28-24-25-31-29	26	2.86
5.3.6	34-39-31-37-28-30-41	34	0.01
<b>Promedio General</b>		<b>27,25 ± 2</b>	

### 3.4.1.3.3.-Cordones de 3 pases sobrepuestos

Dureza Expresada en Rocwell C

Tabla 15. Dureza en cordones con tratamiento térmico de temple y revenido con un pase triple

Probeta	Dureza	Promedio	Desviación
6.2.1	16-13-18-18-18-19-19	17	0,27
6.2.2	17-17-13-20-21-21-24	19	0,66
6.2.3	27-19-13-24-21-25-18	21	1,5
6.2.4	17-17-22-22-26-24-20	21	2,86
6.2.5	13-15-16-14-18-22-14	16	1,5
6.2.6	16-25-19-24-24-20-22	21	4,91
6.3.1	37-35-35-42-40-40-42	39	0,48
6.3.2	43-40-40-46-42-42-48	43	-
6.3.3	30-35-44-39-38-30-32	35	4,91
6.3.4	22-23-27-31-30-16-28	25	1,79
6.3.5	29-31-32-31-33-27-34	31	0,66
6.3.6	24-24-27-30-31-31-28	28	2,47
<b>Promedio General</b>		<b>26,33 ± 2</b>	

### 3.4.1.3.4.- Promedio de dureza en las probetas con tratamiento térmico de Temple-Revenido

Tabla 16. Dureza en cordones con tratamiento térmico de temple y revenido

Probeta	Dureza	Desviación (±)
1 Pase	20.00	1
2 Pases	27.25	2
3 Pases	26.33	2

En las probetas ensayadas con tratamientos térmicos de temple - revenido podemos observar que la dureza en términos generales sufre variaciones notorias, la probeta de un solo pase presenta una dureza menor que la correspondiente a dos y tres pases, mientras que las probetas de 2 y 3 pases prácticamente presentan una dureza similar, esto es debido a la dilución de carburos por el calor aportado durante el proceso de soldadura y el tratamiento térmico realizado. Como se puede observar en la figura 22.

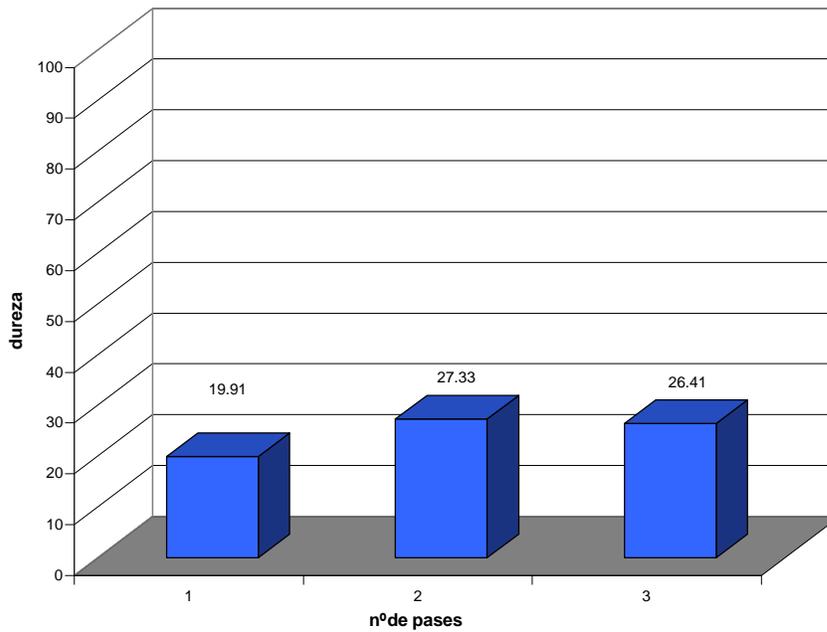


Fig 22. Variación de la dureza en probetas con tratamiento térmico de temple-revenido

#### 3.4.1.4.- Comparación de la dureza en probetas, en función de los tratamientos térmicos

A continuación se muestran los resultados obtenidos en función de la dureza mostrada por cada tratamiento térmico y la variación de la misma en las probetas.

Tabla 17. Variación de dureza en función del tratamiento térmico y número de pases

Probeta	Sin Tratamiento	Recocido	Temple-Revenido
1 Pase	55.91	30.41	19.91
2 Pases	54.66	33.16	27.33
3 Pases	52.83	32.50	26.41

Para las probetas en general, se observa una variación pronunciada en los resultados obtenidos, se puede observar que la mayor dureza, independientemente del número de pases realizados, corresponde en todos los casos a las probetas que no presentaron ningún tratamiento térmico, de igual forma, se observa que la dureza fue disminuyendo al aplicarle los tratamientos térmicos de recocido y temple – revenido respectivamente.

En las siguientes gráficas (23,24 y 25) se puede observar dichas variaciones:

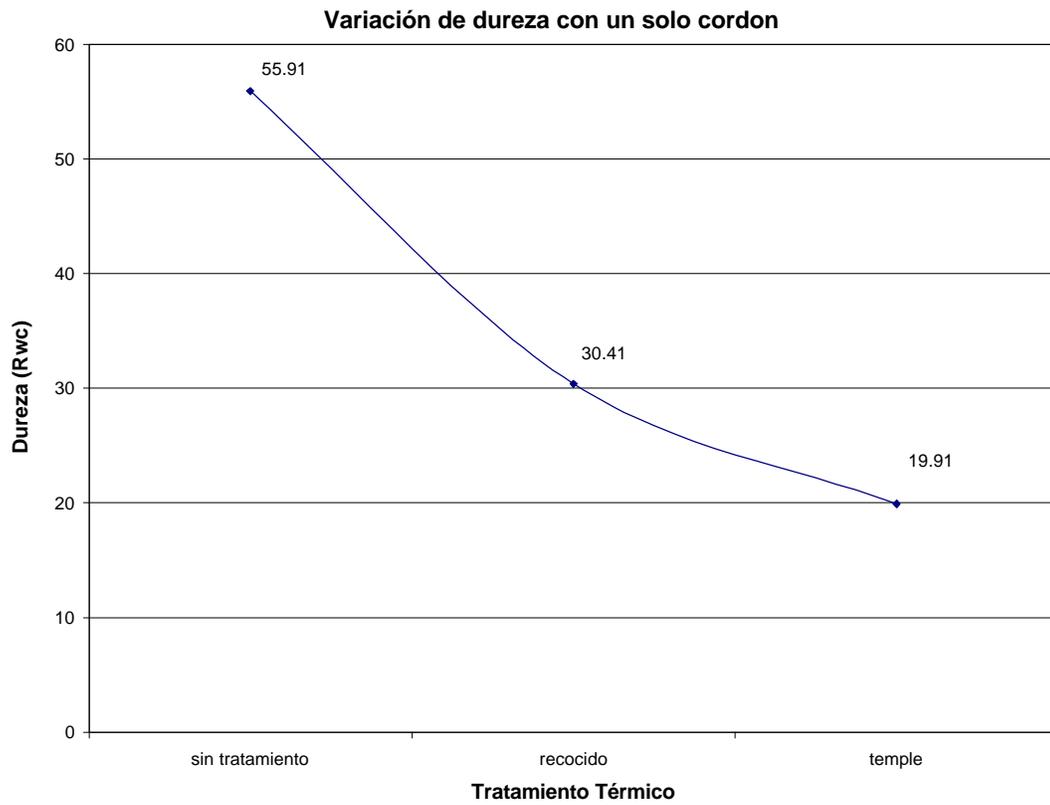


Fig. 23 Variación de la dureza en cordones de un solo pase

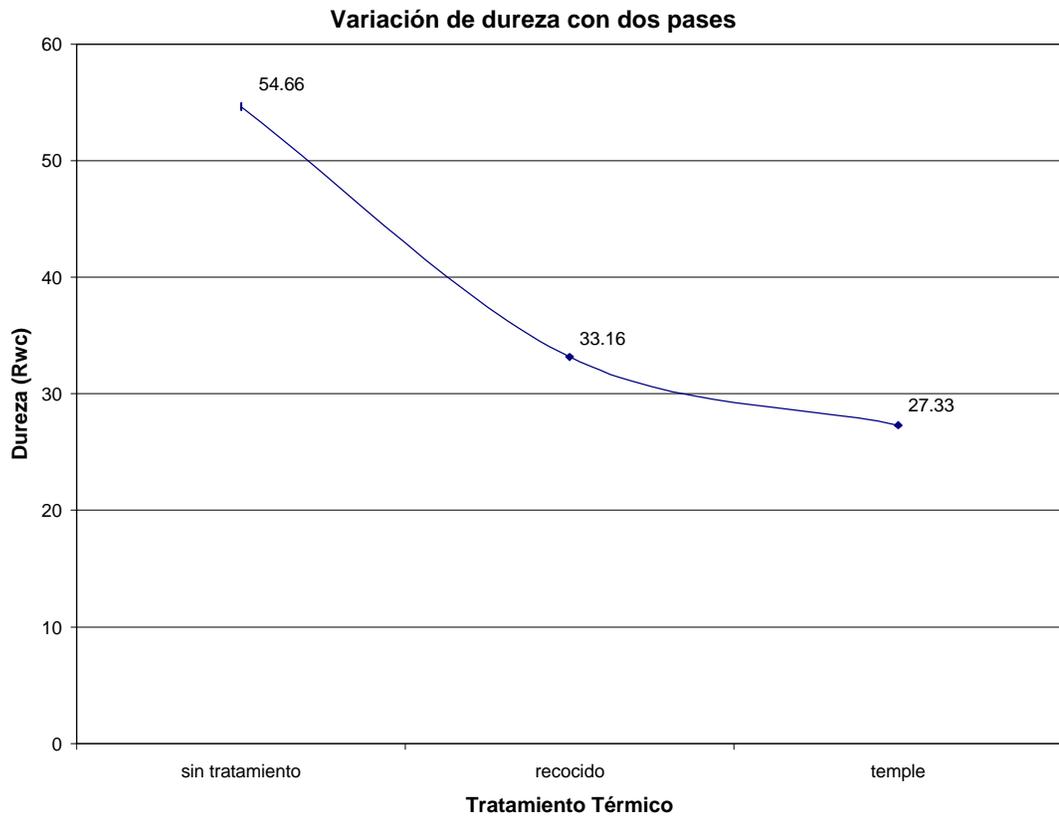


Fig.24 Variación de la dureza en cordones de pase doble

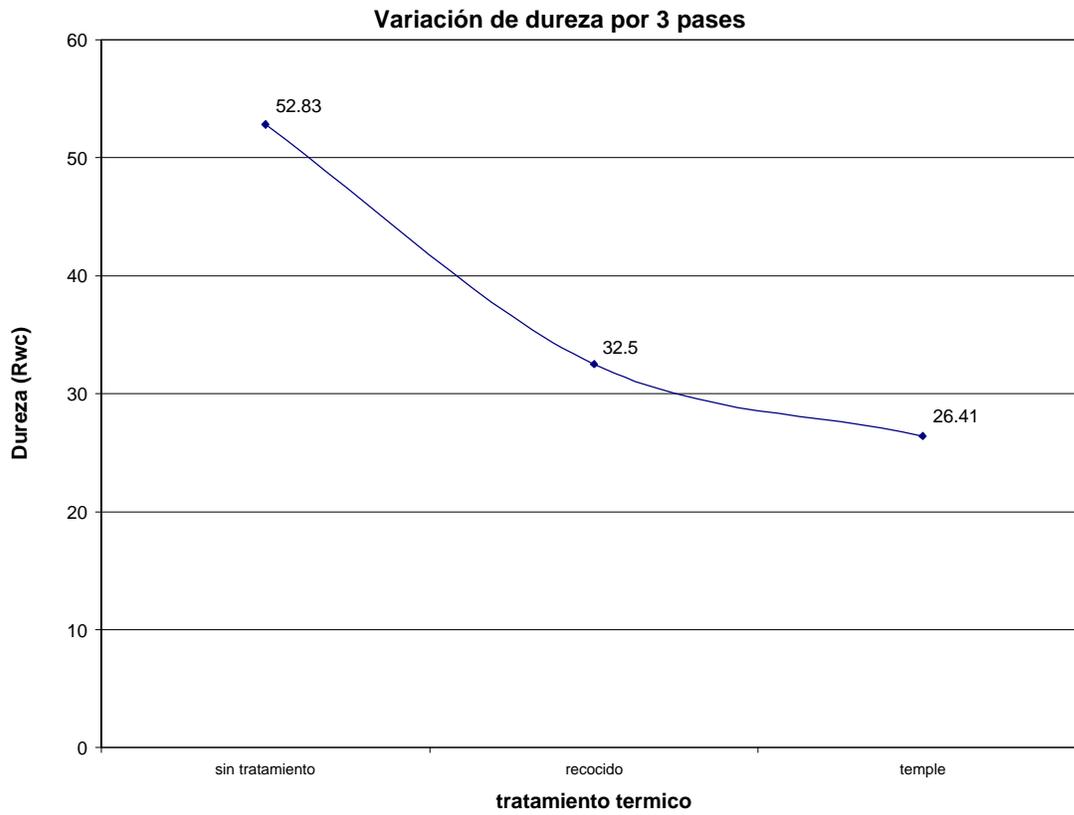


Fig.25 Variación de la dureza en cordones de pase triple

### 3.4.2.- DUREZA TRANSVERSAL

La dureza transversal, se realizo en orden descendente, es decir de la parte superior del cordón hacia el material base y los valores se reportaron en las escalas correspondientes a cada perfil de dureza, es decir, la dureza del cordón se expreso en escala Rocwell C, debido a la alta dureza del mismo, y la dureza del material base fue expresada en la escala Rocwell B.

#### 3.4.2.1.- Dureza transversal en las probetas sin tratamiento térmico

Las mediciones de dureza se reportan en las siguientes tablas, donde se pueden observar adicionalmente la escala de dureza HRc con la cual podemos comparar la similitud de los valores especificados por el fabricante, entre 50 y 65 HRc. Estas mediciones se obtienen de los ensayos y se esquematiza en la misma posición de cada medición en las siguientes figuras.

Tabla 18. Dureza transversal en probetas sin tratamiento térmico con un pase

<b>Probeta 1.1.1 1 pase</b>		
Medición	HRc	HRb
1	55	-
2	53	-
3	50	-
4	49	-
5	49	-
6	-	85
7	-	76
8	-	71
9	-	67
10	-	67

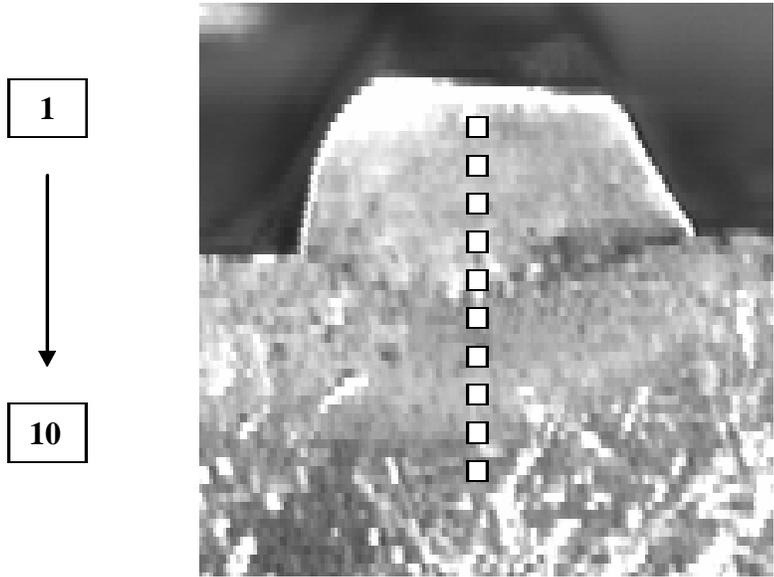


Fig. 26 Mediciones de dureza en la sección transversal de la probeta 1.1.1.

A medida que nos acercamos al material base, la dureza disminuye, debido al aumento de la dilución de los carburos aportados por el electrodo. Ya dentro del material base, se reportan valores de dureza característicos de un acero de bajo carbono. Estos valores se incrementan mientras más cercano al cordón se encuentre, gracias al efecto del calor que produce una dilución de material en el proceso de soldadura.

A partir de los valores reportados, se puede afirmar que la dureza del depósito se encuentra dentro de los parámetros establecidos por el fabricante (entre 50 y 60 HRc); por lo tanto, el cordón desde el punto de vista de la dureza, califica según la norma.

Tabla 19. Dureza transversal en probetas sin tratamiento térmico con dos pases

Probeta 4.1.1 2 pases		
Medición	HRc	HRb
1	54	-
2	52	-
3	51	-
4	49	-
5	-	89
6	-	76
7	-	72
8	-	70
9	-	69

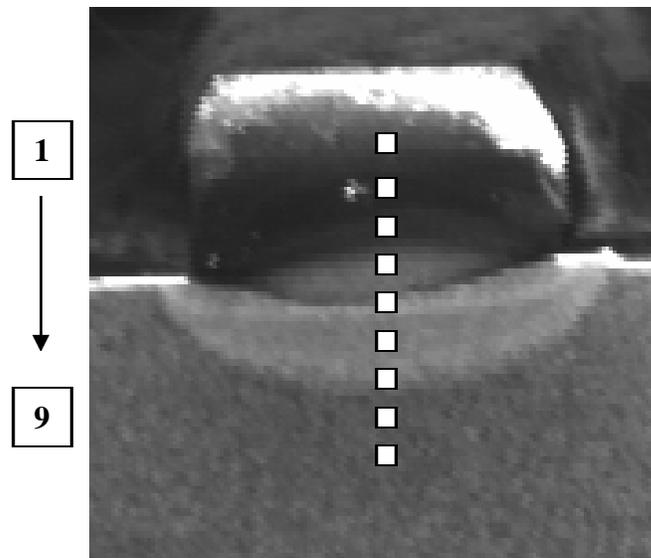


Fig. 27. Mediciones de dureza en la sección transversal de la probeta 4.1.1.

A medida que nos acercamos al material base, la dureza disminuye, debido al aumento de la dilución de los carburos aportados por el electrodo. Ya dentro del material base, se reportan valores de dureza característicos de un acero de bajo carbono. Estos valores se incrementan mientras más cercano al cordón se encuentre, gracias al efecto del calor que produce una dilución de material en el proceso de soldadura.

A partir de los valores reportados, se puede afirmar que la dureza del depósito se encuentra dentro de los parámetros establecidos por el fabricante (entre 50 y 60 HRc); por lo tanto, el cordón desde el punto de vista de la dureza, califica según la norma.

Tabla 20. Dureza transversal en probetas sin tratamiento térmico con tres pases

Probeta 3.1.1 3 pases		
Medición	HRc	HRb
1	52	-
2	51	-
3	49	-
4	49	-
5	47	-
6	-	90
7	-	79
8	-	75
9	-	71
10	-	66

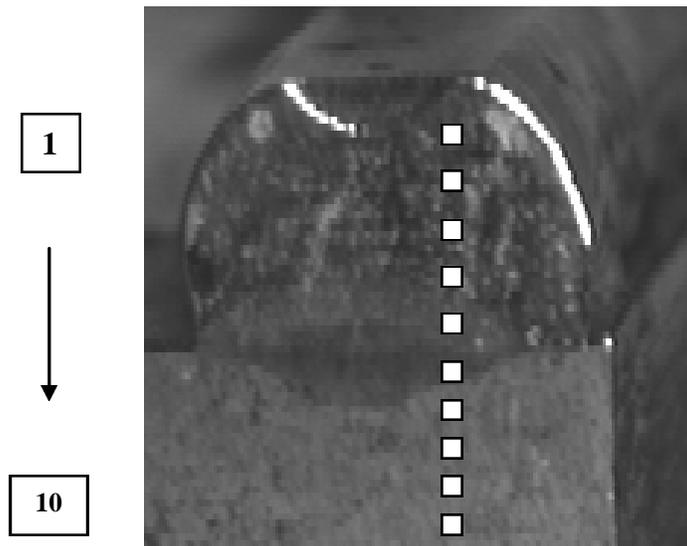


Fig. 28. Mediciones de dureza en la sección transversal de la probeta 3.1.1.

A medida que nos acercamos al material base, la dureza disminuye, debido al aumento de la dilución de los carburos aportados por el electrodo. Ya dentro del material base, se reportan valores de dureza característicos de un acero de bajo carbono. Estos valores se incrementan mientras más cercano al cordón se encuentre, gracias al efecto del calor que produce una dilución de material en el proceso de soldadura.

A partir de los valores reportados, se puede afirmar que la dureza del depósito se encuentra dentro de los parámetros establecidos por el fabricante (entre 50 y 60 HRc); por lo tanto, el cordón desde el punto de vista de la dureza, califica según la norma.

### 3.4.2.2.- Dureza transversal en las probetas con tratamiento térmico de Recocido

Las mediciones de dureza se reportan en las tablas 21-23, donde se pueden observar adicionalmente la escala de dureza HRc con la cual podemos comparar los valores especificados por el fabricante, los cuales se encuentran entre 50 y 65 HRc. Estas mediciones producen las gráficas de las figuras 29- 31 y además se esquematiza en la misma posición de cada medición.

Tabla 23. Dureza transversal en probetas con tratamiento térmico de recocido con un pase

Probeta 2.2.1 1 pase		
Medición	HRc	HRb
1	27	-
2	25	-
3	24	-
4	23	-
5	-	78
6	-	72
7	-	70
8	-	69
9	-	69

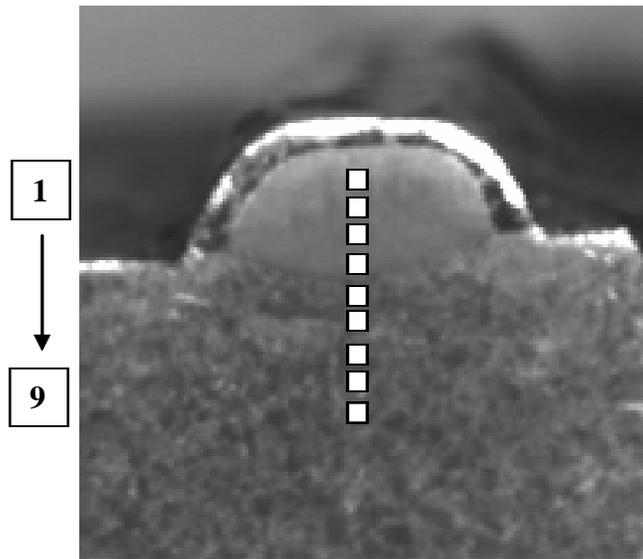


Fig. 29 Mediciones de dureza en la sección transversal de la probeta 2.2.1

A medida que nos acercamos al material base, la dureza disminuye, debido al aumento de la dilución de los carburos aportados por el electrodo. Ya dentro del material base, se reportan valores de dureza característicos de un acero de bajo carbono con recocido. Estos valores se incrementan mientras más cercano al cordón se encuentre, gracias al efecto del calor que produce una dilución de material en el proceso de soldadura.

A partir de los valores reportados, se puede afirmar que la dureza del depósito disminuye considerablemente de los parámetros establecidos por el fabricante (entre 50 y 60 HRc); por lo tanto, el cordón se vuelve mas maquinable.

Tabla 22. Dureza transversal en probetas con tratamiento térmico de recocido con dos pases

Probeta 4.3.1 2 pases		
Medición	HRc	HRb
1	31	-
2	29	-
3	27	-
4	25	-
5	-	80
6	-	72
7	-	72
8	-	68
9	-	64

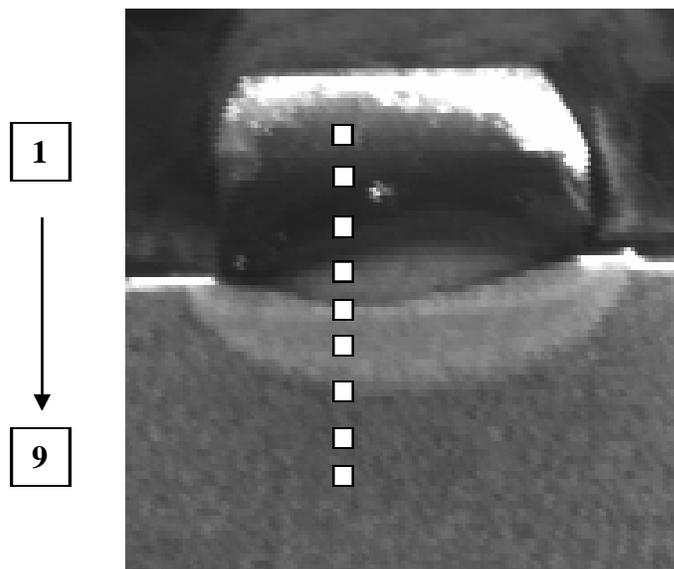


Fig. 30. Mediciones de dureza en la sección transversal de la probeta 4.3.1

A medida que nos acercamos al material base, la dureza disminuye, debido al aumento de la dilución de los carburos aportados por el electrodo. Ya dentro del material base, se reportan valores de dureza característicos de un acero de bajo carbono con recocido. Estos valores se incrementan mientras más cercano al cordón se encuentre, gracias al efecto del calor que produce una dilución de material en el proceso de soldadura.

A partir de los valores reportados, se puede afirmar que la dureza del depósito disminuye considerablemente de los parámetros establecidos por el fabricante (entre 50 y 60 HRc); por lo tanto, el cordón se vuelve mas maquinable.

Tabla 23. Dureza transversal en probetas con tratamiento térmico de recocido con tres pases

Probeta 3.2.1 3 pases		
Medición	HRc	HRb
1	30	-
2	29	-
3	28	-
4	28	-
5	-	75
6	-	67
7	-	66
8	-	66
9	-	65

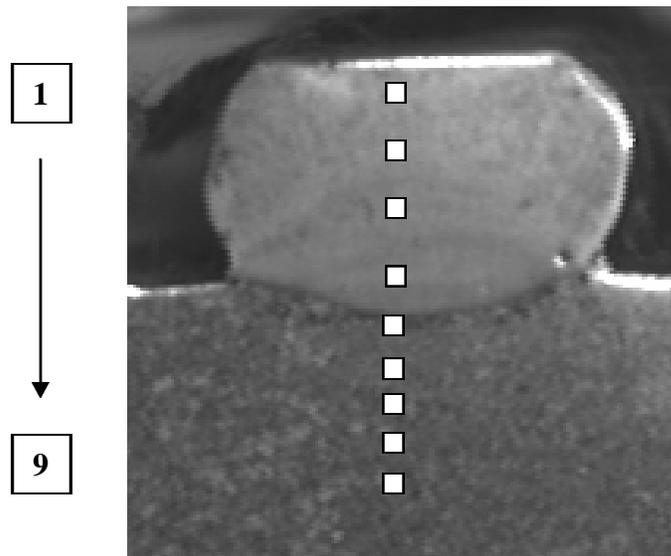


Fig. 31. Mediciones de dureza en la sección transversal de la probeta 3.2.1

A medida que nos acercamos al material base, la dureza disminuye, debido al aumento de la dilución de los carburos aportados por el electrodo. Ya dentro del material base, se reportan valores de dureza característicos de un acero de bajo carbono con recocido. Estos valores se incrementan mientras más cercano al cordón se encuentre, gracias al efecto del calor que produce una dilución de material en el proceso de soldadura.

A partir de los valores reportados, se puede afirmar que la dureza del depósito disminuye considerablemente de los parámetros establecidos por el fabricante (entre 50 y 60 HRc); por lo tanto, el cordón se vuelve mas maquinable.

### 3.4.2.3.- Dureza transversal con tratamiento térmico de temple y revenido

Tabla 26. Dureza transversal en probetas con tratamiento térmico de temple y revenido de un pase

<b>Probeta 2.1.1      1 pase</b>		
Medición	HRc	HRb
1	18	-
2	18	-
3	15	-
4	13	-
5	-	89
6	-	88
7	-	87
8	-	86
9	-	85

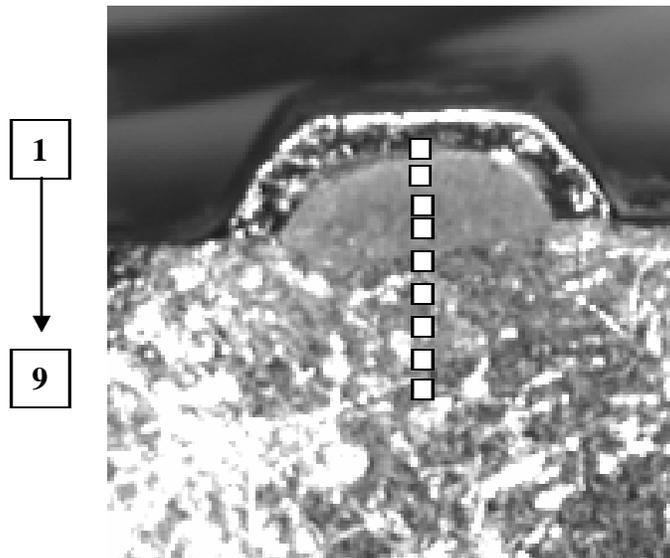


Fig. 32. Mediciones de dureza en la sección transversal de la probeta 2.1.1

A medida que nos acercamos al material base, la dureza disminuye, debido al aumento de la dilución de los carburos aportados por el electrodo. Ya dentro del material base, se reportan valores de dureza característicos de un acero de bajo carbono templado y revenido. Estos valores se incrementan mientras más cercano al cordón se encuentre, gracias al efecto del calor que produce una dilución de material en el proceso de soldadura.

A partir de los valores reportados, se puede afirmar que la dureza del depósito disminuye considerablemente de los parámetros establecidos por el fabricante (entre 50 y 60 HRC); por lo tanto, el cordón se vuelve mas maquinable.

Tabla 25. Dureza transversal en probetas con tratamiento térmico de temple y revenido de dos pases

Probeta 5.2.1 2 pases		
Medición	HRc	HRb
1	25	-
2	24	-
3	21	-
4	17	-
5	14	-
6	-	90
7	-	84
8	-	84
9	-	84
10	-	83

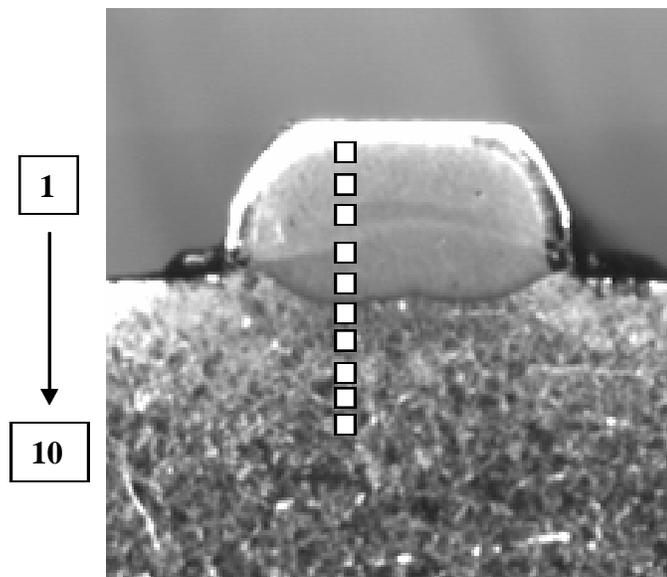


Fig. 33. Mediciones de dureza en la sección transversal de la probeta 5.2.1

A medida que nos acercamos al material base, la dureza disminuye, debido al aumento de la dilución de los carburos aportados por el electrodo. Ya dentro del material base, se reportan valores de dureza característicos de un acero de bajo carbono templado y revenido.

Estos valores se incrementan mientras más cercano al cordón se encuentre, gracias al efecto del calor que produce una dilución de material en el proceso de soldadura.

A partir de los valores reportados, se puede afirmar que la dureza del depósito disminuye considerablemente de los parámetros establecidos por el fabricante (entre 50 y 60 HRc); por lo tanto, el cordón se vuelve mas maquinable.

Tabla 26. Dureza transversal en probetas con tratamiento térmico de temple y revenido de tres pases

Probeta 6.2.1 3 pases		
Medición	HRc	HRb
1	24	-
2	20	-
3	17	-
4	15	-
5	-	89
6	-	82
7	-	81
8	-	80
9	-	73

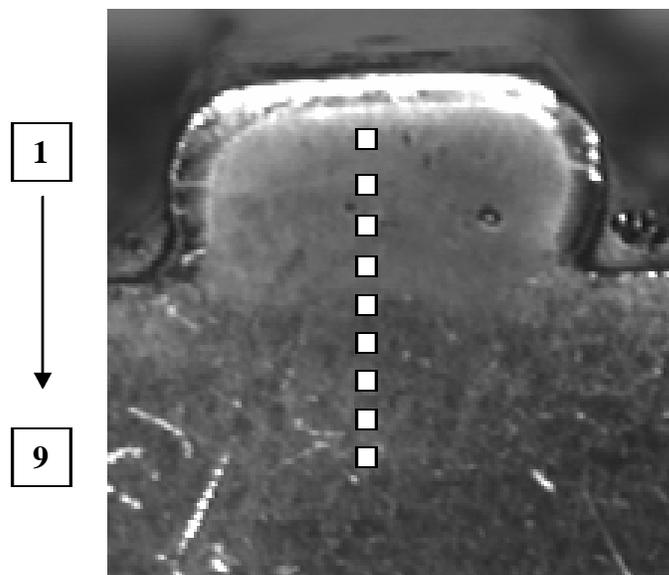


Fig.34. Mediciones de dureza en la sección transversal de la probeta 6.2.1

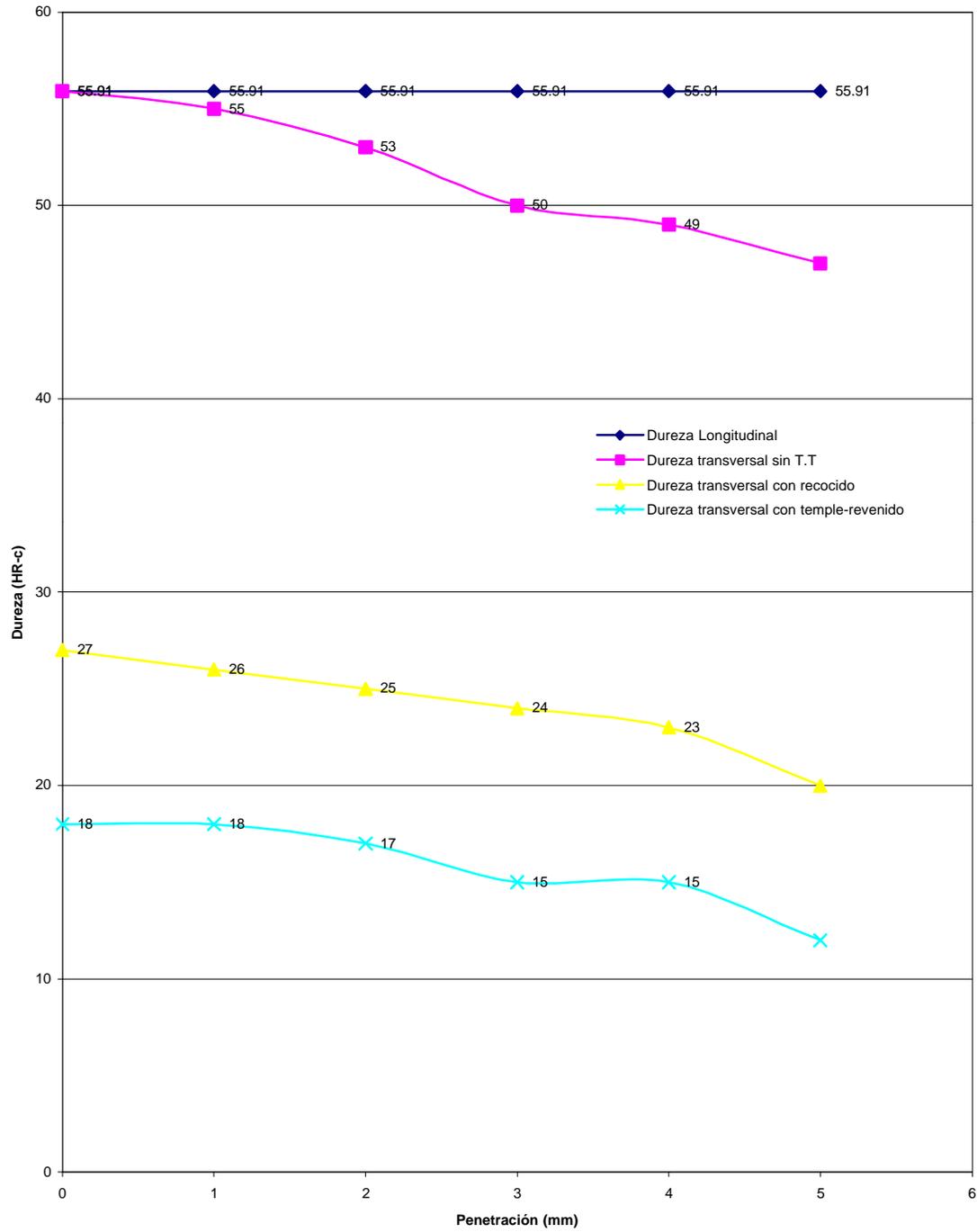
A medida que nos acercamos al material base, la dureza disminuye, debido al aumento de la dilución de los carburos aportados por el electrodo. Ya dentro del material base, se reportan valores de dureza característicos de un acero de bajo carbono templado y revenido. Estos valores se incrementan mientras más cercano al cordón se encuentre, gracias al efecto del calor que produce una dilución de material en el proceso de soldadura.

A partir de los valores reportados, se puede afirmar que la dureza del depósito disminuye considerablemente de los parámetros establecidos por el fabricante (entre 50 y 60 HRc); por lo tanto, el cordón se vuelve mas maquinable.

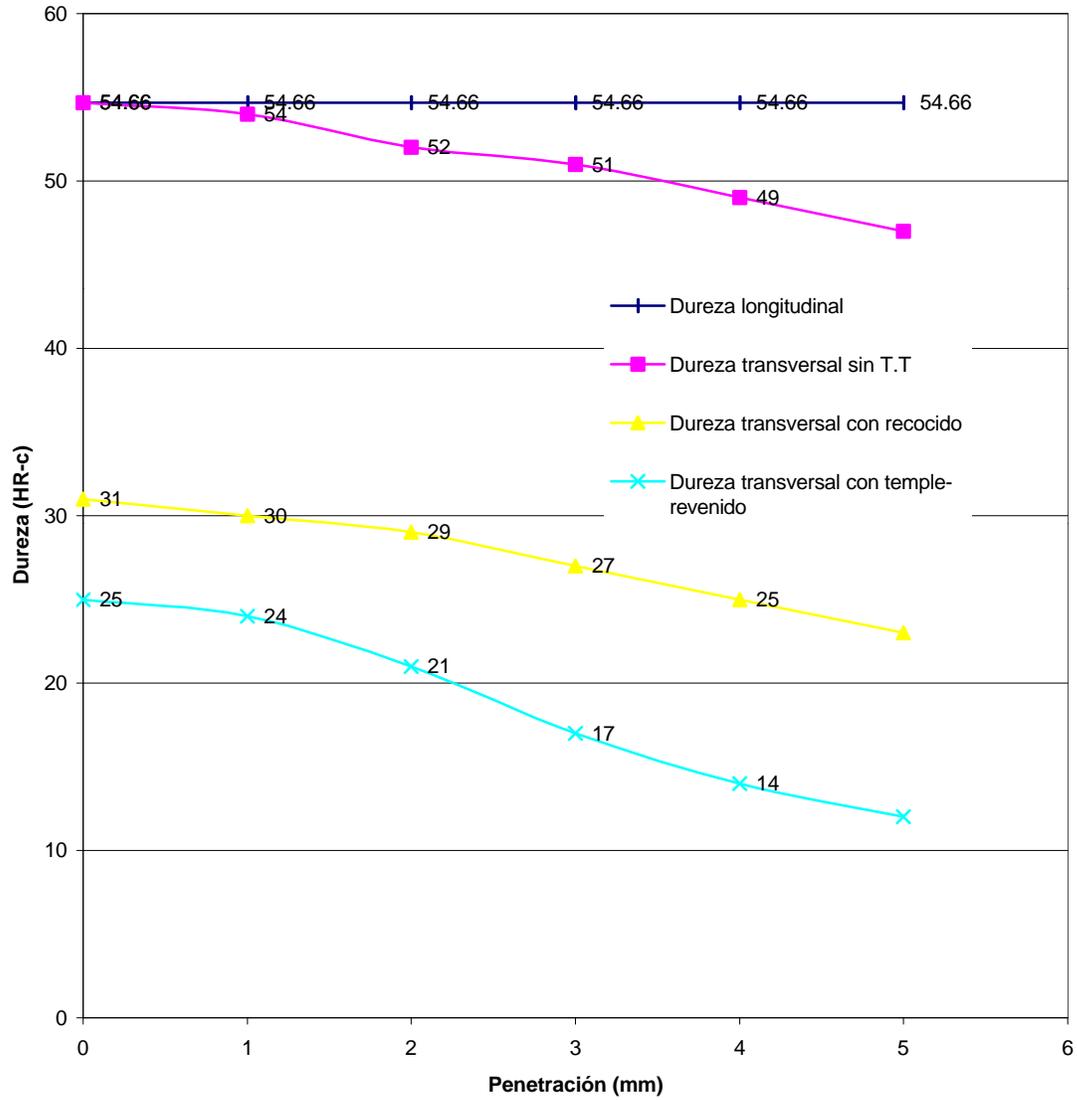
Al igual que el caso de la dureza transversal, la dureza longitudinal presenta una disminución progresiva al aplicárseles los tratamientos térmicos recomendados, Siendo siempre mayor la dureza en las probetas iniciales o sin ningún tratamiento térmico, el caso de recocido presenta una disminución en dichos valores, pero las probetas de temple revenido, la disminución es mucho mayor.

En las siguientes gráficas se hace una comparación de los resultados obtenidos en función de cada uno de los pases realizados, y la ratificación de lo antes expuesto.

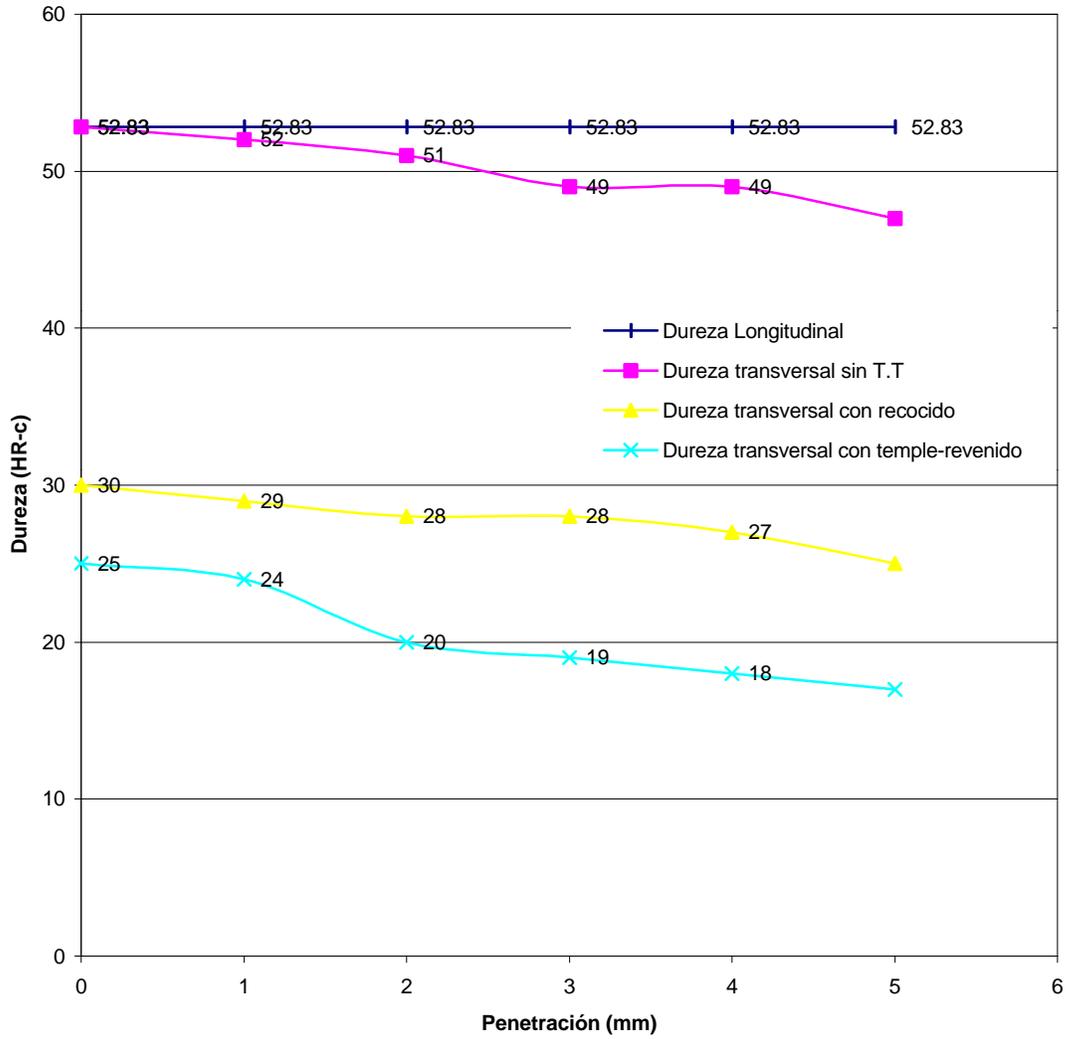
### Dureza Longitudinal y Transversal para un cordón de recargue duro



Dureza Longitudinal y Transversal para un cordón doble en recargue duro



Dureza Longitudinal y Transversal para un cordón triple de recargue duro



### 3.5.- ESTUDIO MACROGRÁFICO

Luego del corte y macroataque de los cordones preseleccionados se procedió a la determinación de la geometría del cordón según el número de pases realizados como se observa en las siguientes tablas.

#### 3.5.1.- Geometría del cordón para 1 pase

Tabla 27. Geometría del cordón con pases sencillos

Probeta	Altura *	Ancho *	Penetración*	ZAC*
114	1.03	3.03	0.43	1.06
115	0.93	3.13	0.66	1.33
213	1.06	2.83	0.3	0.96
212	0.96	3.06	0.33	1.03
<b>Promedio</b>	<b>0,99</b>	<b>3,01</b>	<b>0,43</b>	<b>1,09</b>

\* En centímetros todas las unidades

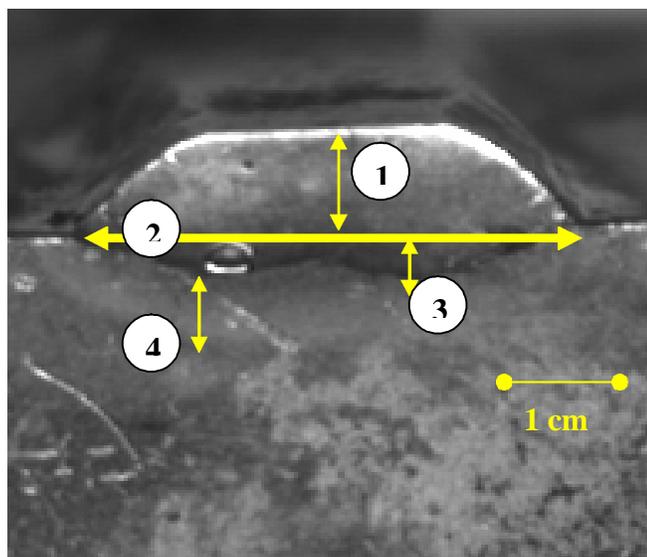


Fig. 33. Geometría en probetas de un solo pase

Donde:

- 1: Altura
- 2: Ancho
- 3: Penetración
- 4: Zona afectada por el calor

### 3.4.3.2.- Geometría del cordón para 2 pases

Tabla 28. Geometría del cordón con pases dobles

Probeta	Altura *	Ancho *	Penetración*	ZAC*
525	1.43	3.03	0.56	1.13
412	1.43	3.93	0.33	1.10
511	1.13	2.83	0.56	1.18
<b>Promedio</b>	<b>1,33</b>	<b>3.26</b>	<b>0,48</b>	<b>1,13</b>

\* En centímetros todas las unidades

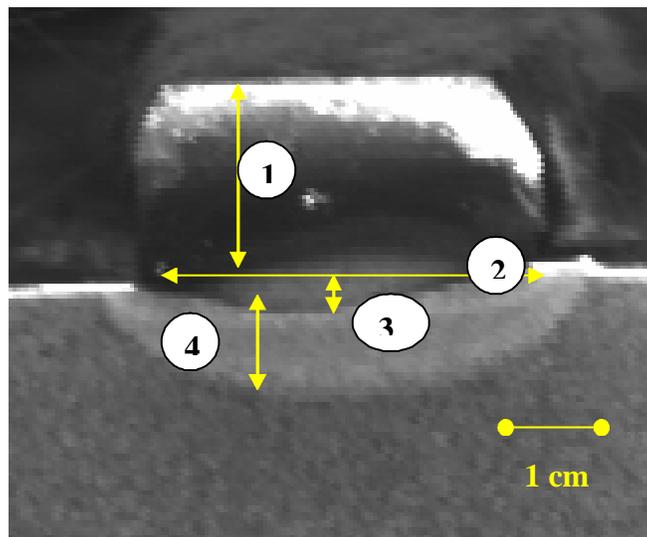


Fig. 35. Geometría en probetas de pase doble

Donde:

- 1: Altura
- 2: Ancho
- 3: Penetración
- 4: Zona afectada por el calor

### 3.4.3.2.-Geometría del cordón para 3 pases

Tabla 29. Geometría del cordón con pases triples

Probeta	Altura *	Ancho *	Penetración*	ZAC*
315	2.23	4.16	0.53	1.43
316	1.86	3.96	0.46	1.0
325	2.03	3.86	0.43	0.93
326	1.33	3.76	0.53	1.16
545	2.23	3.9	0.66	1.46
626	1.9	4.10	0.56	1,5
<b>Promedio</b>	<b>1,93</b>	<b>3,95</b>	<b>0,52</b>	<b>1,24</b>

\* En centímetros todas las unidades

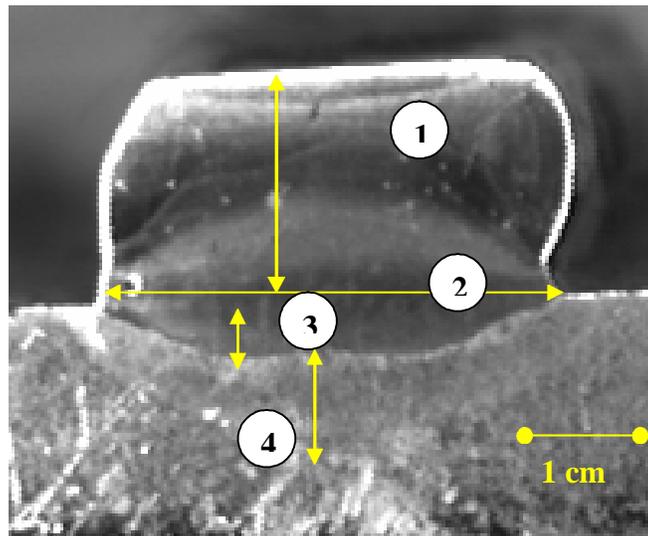


Fig. 36. Geometría en probetas de pase triples

Donde:

- 1: Altura
- 2: Ancho
- 3: Penetración
- 4: Zona afectada por el calor

De los resultados anteriores se concluye:

Tabla 30. Variación de la geometría en función del número de pases realizado

<b>Probeta</b>	<b>Altura *</b>	<b>Ancho *</b>	<b>Penetración*</b>	<b>ZAC*</b>
1 Pase	0,99	3,01	0,43	1,09
2 Pases	1,33	3,26	0,48	1,13
3 Pases	1,93	3,95	0,52	1,24

Los ensayos realizados muestran que los parámetros que definen la geometría del cordón son consecuentes con los ensayos realizados, es decir, todos los factores de medición se incrementan, a medida que aumentan el número de pases realizado.

Los valores obtenidos nos muestra que la altura aumento con el número de pases, pero existe un aumento menor al aplicarle los pases dos y tres; de igual forma el ancho se incremento por el desplazamiento de material al aplicarle el cordón hacia los lados, y dicho desplazamiento fue disminuyendo a medida que aumentaba el número de pases.

La penetración mostró un comportamiento similar a las variables anteriores, al igual que la Zona Afectada por el Calor (ZAC).

El comportamiento del electrodo BH-88 al ser depositado con los parámetros controlados, es similar al de cualquier electrodo convencional de recargue con características semejantes.

### 3.6.- CARACTERIZACION MICROESTRUCTURAL

Las micrografías tomadas según la metodología usada se presentan en las figuras siguientes:

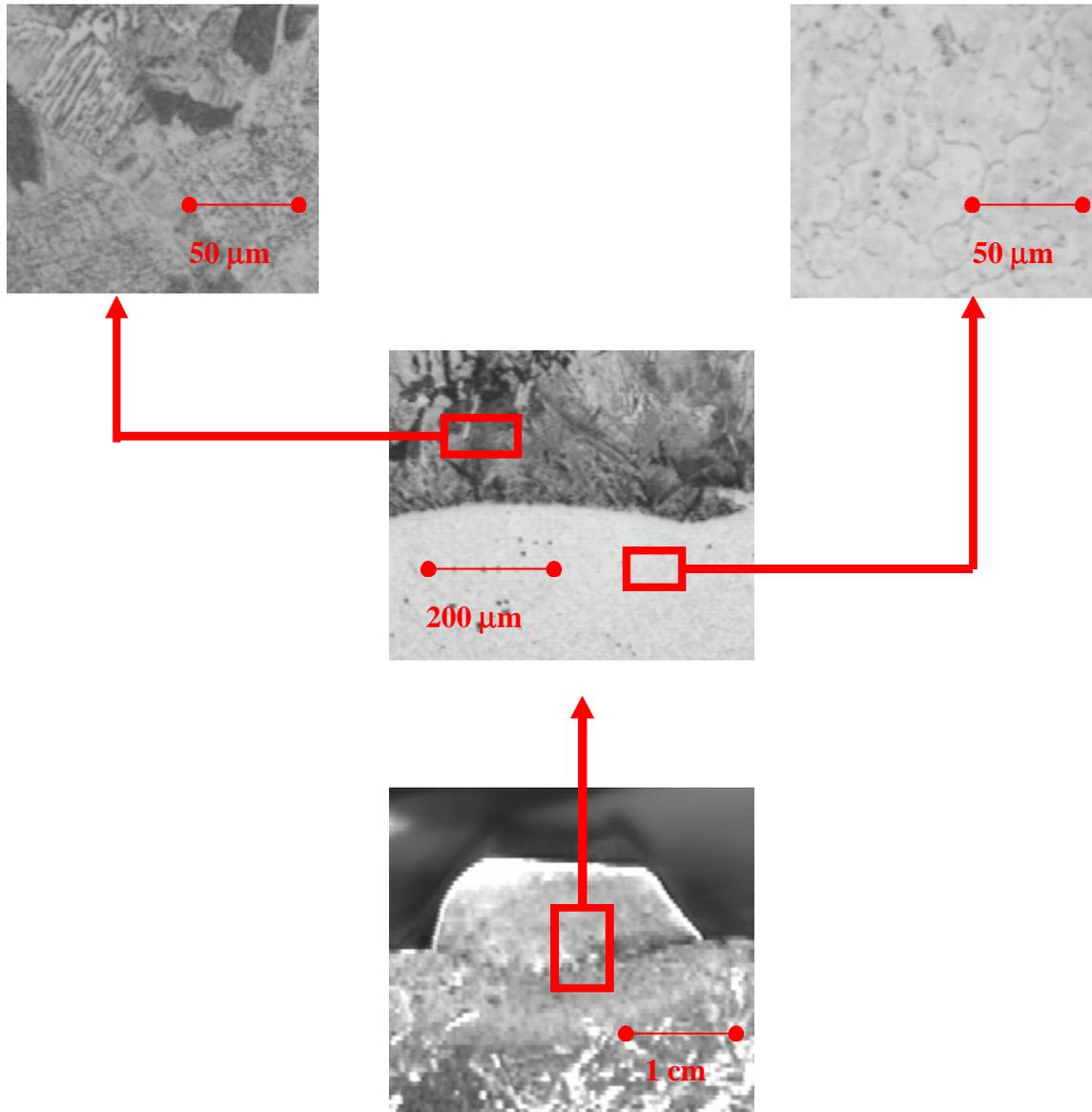


Fig 37. Perfil Microestructural del depósito (interfase con material base) para probetas sin tratamiento térmico con un pase

A través de esta secuencia se presenta la microestructura del recubrimiento obtenido, primero a menor aumento ( $200\mu$ ) y luego observándose algunos detalles del mismo a mayor aumento ( $50\mu$ ).

La trayectoria seguida en forma ascendente comienza con una macrofotografía que muestra el cordón, el material base, la zona afectada por el calor y la sección tomada en la probeta para el análisis siguiente. La segunda foto muestra una micrografía a 200X donde se puede observar la interfaz y la sección tomada para realizar un mayor acercamiento. Se aprecia la zona del material base que no fue afectado térmicamente debido a la presencia de la microestructura original del material base sin tratar.

La fotografía final del lado izquierdo muestra un acercamiento mayor del material base ( $50\mu$ ), se muestra una sección de estructuras del tipo ferrita, perlita, zonas claras y oscuras respectivamente. La austenita presente se muestra en los límites de grano.

La fotografía de la derecha muestra una sección de la probeta correspondiente a una sección del cordón, donde se puede observar la presencia exclusiva de carburos en los límites de grano en una matriz austenítica.

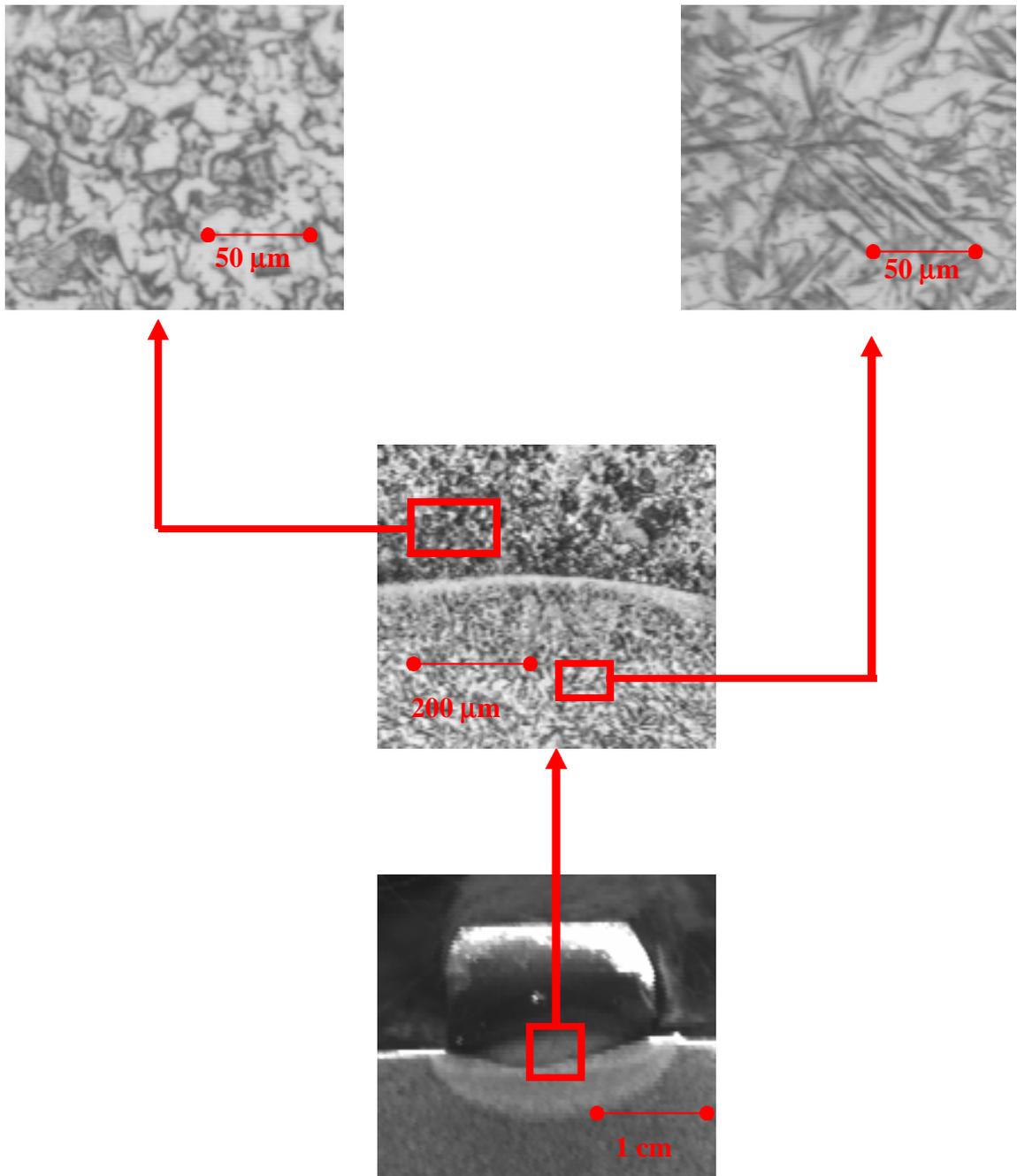


Fig. 38. Perfil Microestructural del depósito (interfase con material base) para probetas sin tratamiento térmico con dos pases

A través de esta secuencia se presenta la microestructura del recubrimiento obtenido, primero a menor aumento ( $200\mu$ ) y luego observándose algunos detalles del mismo a mayor aumento ( $50\mu$ ).

La trayectoria seguida en forma ascendente comienza con una macrofotografía que muestra el cordón, el material base, la zona afectada por el calor y la sección tomada en la probeta para el análisis siguiente. La segunda foto muestra una micrografía a 200X donde se puede observar la interfaz y la sección tomada para realizar un mayor acercamiento. Se aprecia la zona del material base que no fue afectado térmicamente debido a la presencia de la microestructura original del material base sin tratar.

La fotografía final del lado izquierdo muestra un acercamiento mayor del material base ( $50\mu$ ), se muestra una sección de estructuras del tipo ferrita, perlita, zonas claras y oscuras respectivamente. La austenita presente se muestra en forma de granos.

La fotografía de la derecha muestra una sección de la probeta correspondiente a una sección del cordón, donde se puede observar la presencia de martensita en color más oscuro sobre una matriz de austenita retenida (representada por las zonas blancas en la foto).

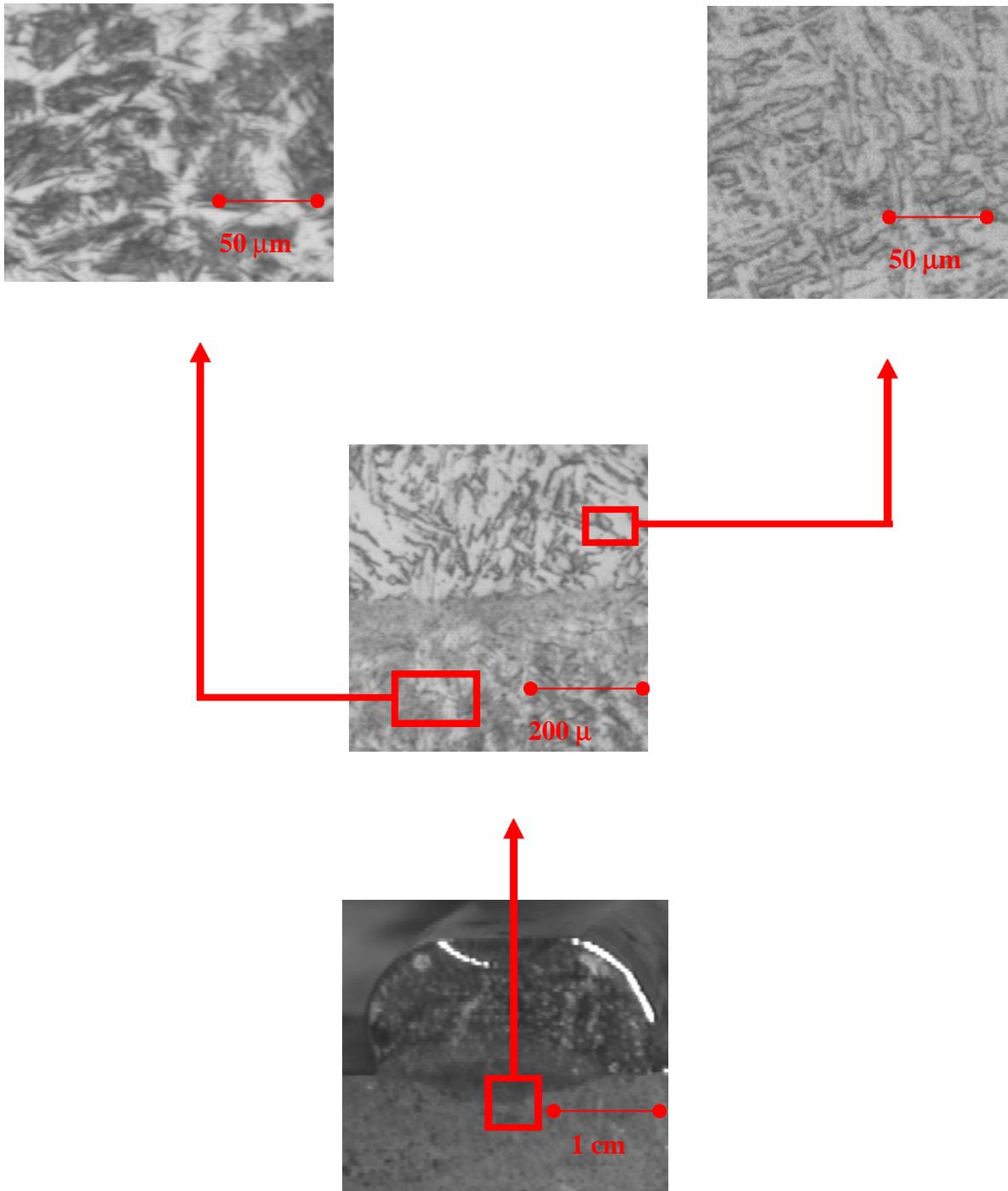


Fig 39. Perfil Microestructural del depósito (interfase con material base) para probetas sin tratamiento térmico con tres pases

A través de esta secuencia se presenta la microestructura del recubrimiento obtenido, primero a menor aumento ( $200\mu$ ) y luego observándose algunos detalles del mismo a mayor aumento ( $50\mu$ ).

La trayectoria seguida en forma ascendente comienza con una macrofotografía que muestra el cordón, el material base, la zona afectada por el calor y la sección tomada en la probeta para el análisis siguiente. La segunda foto muestra una micrografía a 200X donde se puede observar la interfaz y la sección tomada para realizar un mayor acercamiento. Se aprecia la zona del material base que no fue afectado térmicamente debido a la presencia de la microestructura original del material base sin tratar.

La fotografía final del lado derecho muestra un acercamiento mayor del material base ( $50\mu$ ), se muestra una sección de estructuras del tipo Widmannstätten pero refinada y austenita retenida

La fotografía de la izquierda muestra una sección de la probeta correspondiente a una sección del cordón, donde se puede observar la presencia de martensita en color más oscuro sobre una matriz de austenita retenida (representada por las zonas blancas en la foto). Las zonas mucho más oscuras de la foto representan la presencia de martensita pero en forma masiva.

Se puede observar que la microestructura observada en el material de aporte tanto para dos como tres pases corresponde a una estructura de matriz austenítica con la presencia de martensita, y la probeta de un cordón tiene matriz austenítica con presencia de carburos. Pero los resultados mostrados en la dureza nos indica que la dureza de la primera probeta es mayor, lo que no se corresponde con la teoría que explica que las estructuras martensíticas presentan la mayor dureza; lo que nos indica.....

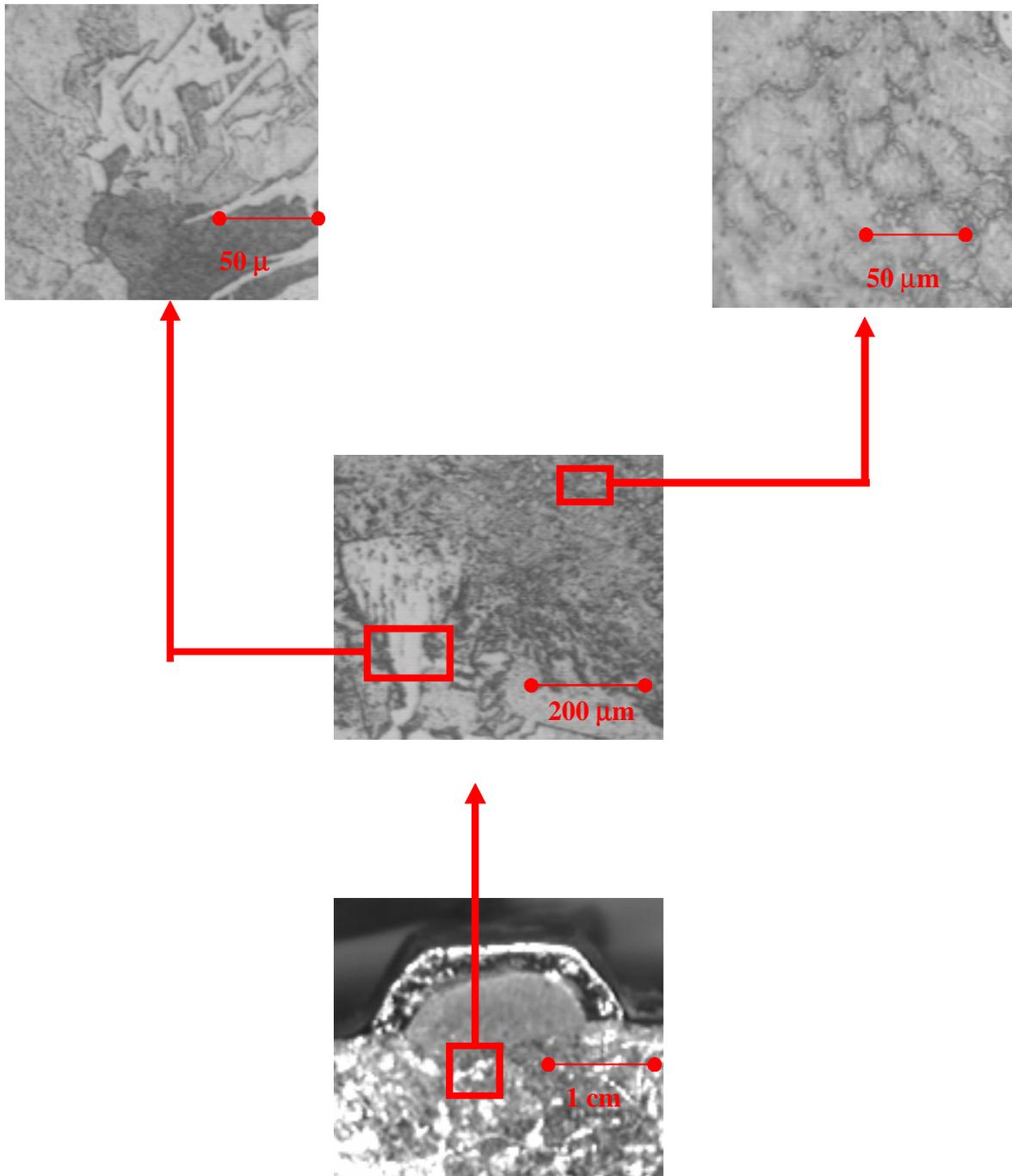


Fig 40. Perfil Microestructural del depósito (interfase con material base) para probetas con tratamiento térmico de recocido con un pase.

A través de esta secuencia se presenta la microestructura del recubrimiento obtenido, primero a menor aumento ( $200\mu$ ) y luego observándose algunos detalles del mismo a mayor aumento ( $50\mu$ ).

La trayectoria seguida en forma ascendente comienza con una macrofotografía que muestra el cordón, el material base, la zona afectada por el calor y la sección tomada en la probeta para el análisis siguiente. La segunda foto muestra una micrografía a 200X donde se puede observar la interfaz y la sección tomada para realizar un mayor acercamiento. Se aprecia la zona del material base afectada térmicamente debido al cambio de la microestructura original del material base.

La fotografía final del lado izquierdo muestra un acercamiento mayor del material base ( $50\mu$ ), se muestra una sección de estructuras del tipo Widmannstätten y granos bien definidos de ferrita.

La fotografía de la derecha muestra una sección de la probeta correspondiente a una sección del cordón, donde se puede observar la presencia exclusiva de carburos en los límites de grano en una matriz austenítica.

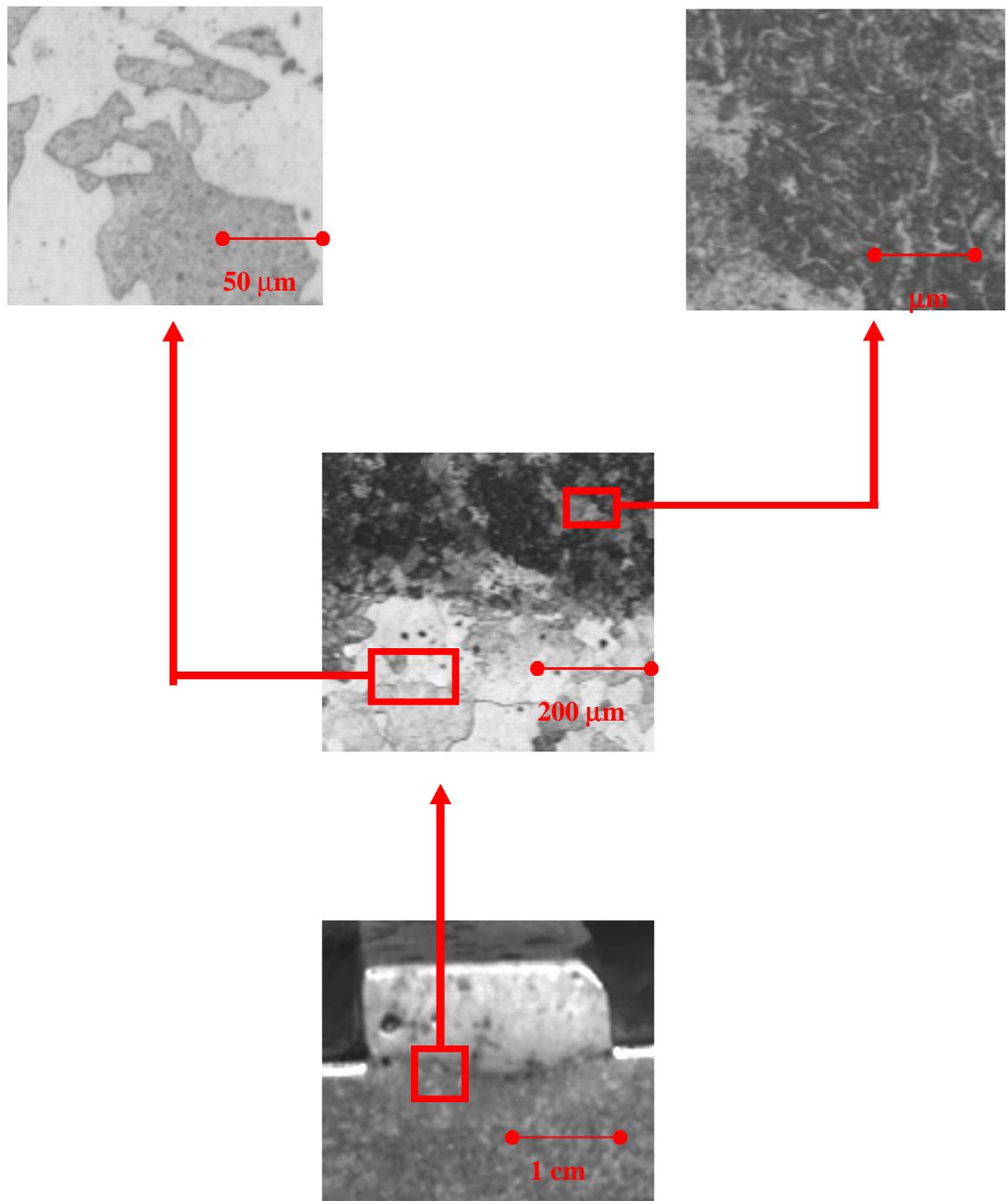


Fig 41. Perfil Microestructural del depósito (interfase con material base) para probetas con

A través de esta secuencia se presenta la microestructura del recubrimiento obtenido, primero a menor aumento ( $200\mu$ ) y luego observándose algunos detalles del mismo a mayor aumento ( $50\mu$ ).

La trayectoria seguida en forma ascendente comienza con una macrofotografía que muestra el cordón, el material base, la zona afectada por el calor y la sección tomada en la probeta para el análisis siguiente. La segunda foto muestra una micrografía a 200X donde se puede observar la interfaz y la sección tomada para realizar un mayor acercamiento. Se aprecia la zona del material base afectada térmicamente debido al cambio de la microestructura original del material base.

La fotografía final del lado izquierdo muestra un acercamiento mayor del material base ( $50\mu$ ), se muestra una sección de estructuras del tipo ferrita, perlita, zonas claras y oscuras respectivamente. La austenita presente en los límites de grano.

La fotografía final del lado derecho muestra un acercamiento mayor del material de aporte ( $50\mu$ ), se muestra una sección de estructuras del tipo ferrita, perlita, zonas claras y oscuras respectivamente. La austenita presente en los límites de grano.

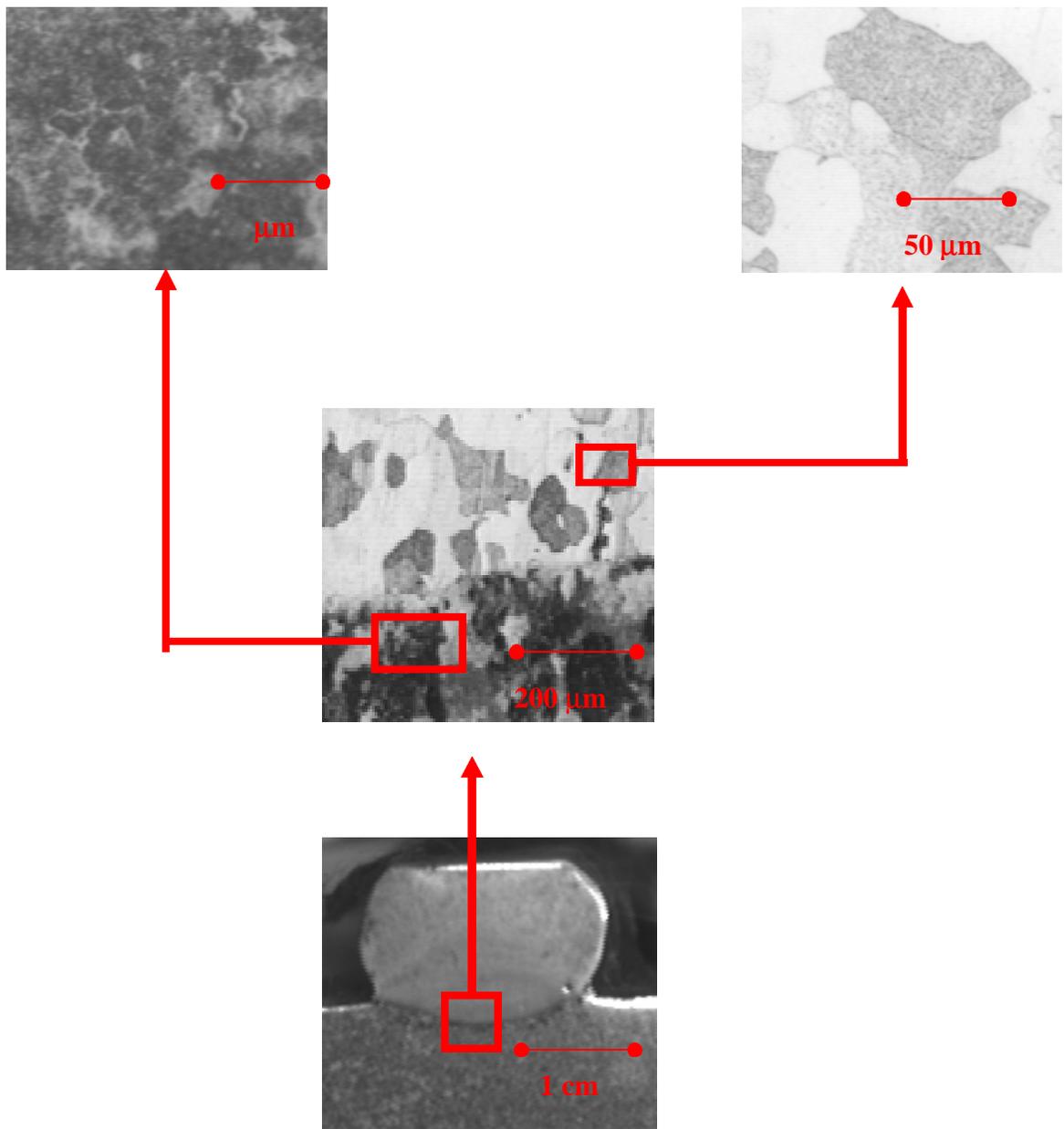


Fig. 42. Perfil Microestructural del depósito (interfase con material base) para probetas con tratamiento térmico de recocido con tres pases.

A través de esta secuencia se presenta la microestructura del recubrimiento obtenido, primero a menor aumento ( $200\mu$ ) y luego observándose algunos detalles del mismo a mayor aumento ( $50\mu$ ).

La trayectoria seguida en forma ascendente comienza con una macrofotografía que muestra el cordón, el material base, la zona afectada por el calor y la sección tomada en la probeta para el análisis siguiente. La segunda foto muestra una micrografía a  $200X$  donde se puede observar la interfaz y la sección tomada para realizar un mayor acercamiento. Se aprecia la zona del material base afectada térmicamente debido al cambio de la microestructura original del material base.

La fotografía final del lado derecho muestra un acercamiento mayor del material base ( $50\mu$ ), se muestra una sección de estructuras del tipo ferrita, perlita, zonas claras y oscuras respectivamente. La austenita presente en los límites de grano.

La fotografía final del lado izquierdo muestra un acercamiento mayor del material de aporte ( $50\mu$ ), se muestra una sección de estructuras del tipo ferrita, perlita, zonas claras y oscuras respectivamente. La austenita presente en los límites de grano.

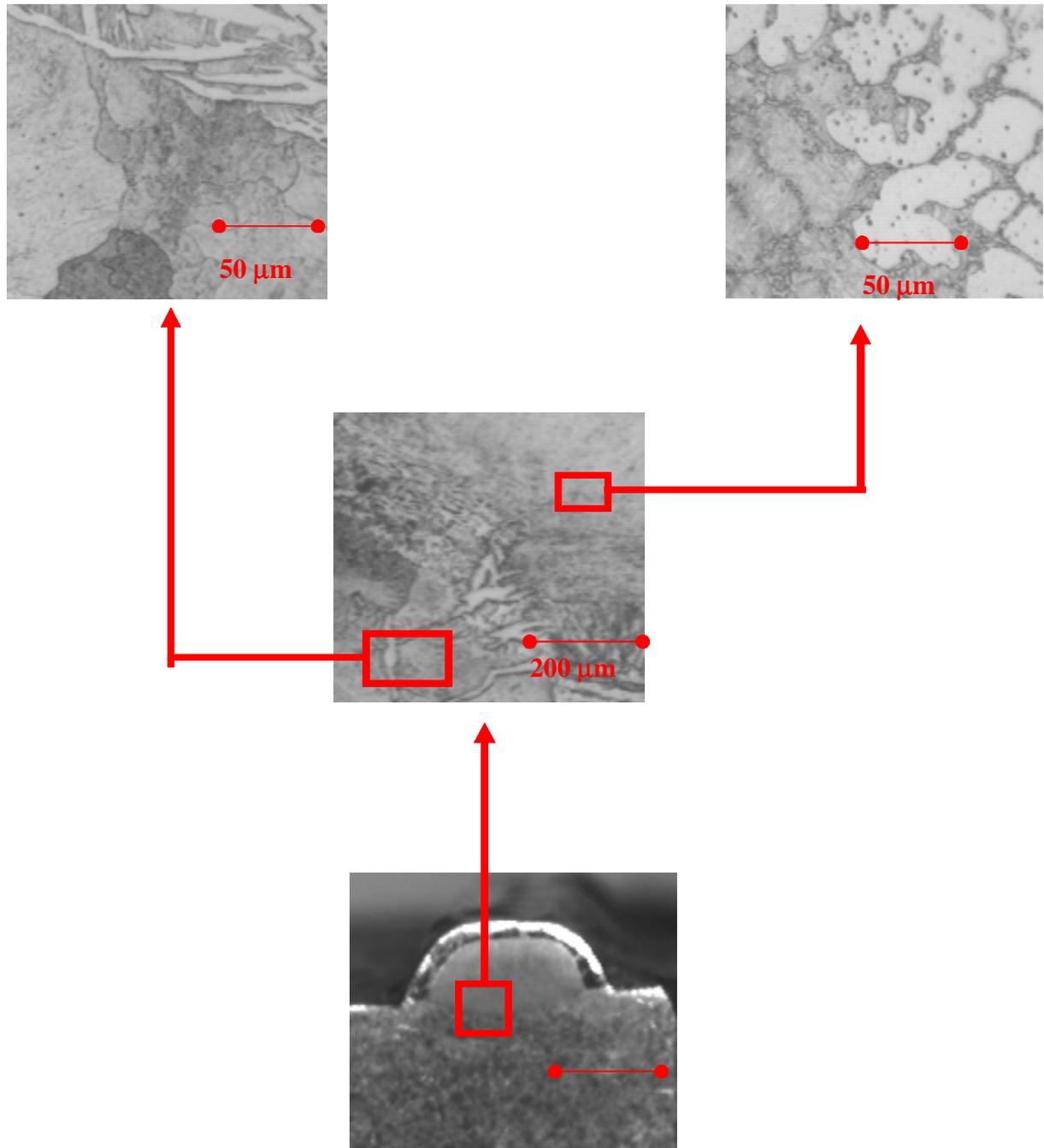


Fig. 43. Perfil Microestructural del depósito (interfase con material base) para probetas con tratamiento térmico de temple - revenido con un pase.

A través de esta secuencia se presenta la microestructura del recubrimiento obtenido, primero a menor aumento ( $200\mu$ ) y luego observándose algunos detalles del mismo a mayor aumento ( $50\mu$ ).

La trayectoria seguida en forma ascendente comienza con una macrofotografía que muestra el cordón, el material base, la zona afectada por el calor y la sección tomada en la probeta para el análisis siguiente. La segunda foto muestra una micrografía a 200X donde se puede observar la interfaz y la sección tomada para realizar un mayor acercamiento. Se aprecia la zona del material base afectada térmicamente debido al cambio de la microestructura original del material base.

La fotografía final del lado izquierdo muestra un acercamiento mayor del material base ( $50\mu$ ), se muestra una sección de estructuras del tipo Widmannstätten y granos bien definidos de ferrita.

La fotografía de la derecha muestra una sección de la probeta correspondiente a una sección del cordón, donde se puede observar la presencia exclusiva de carburos en los límites de grano en una matriz austenítica.

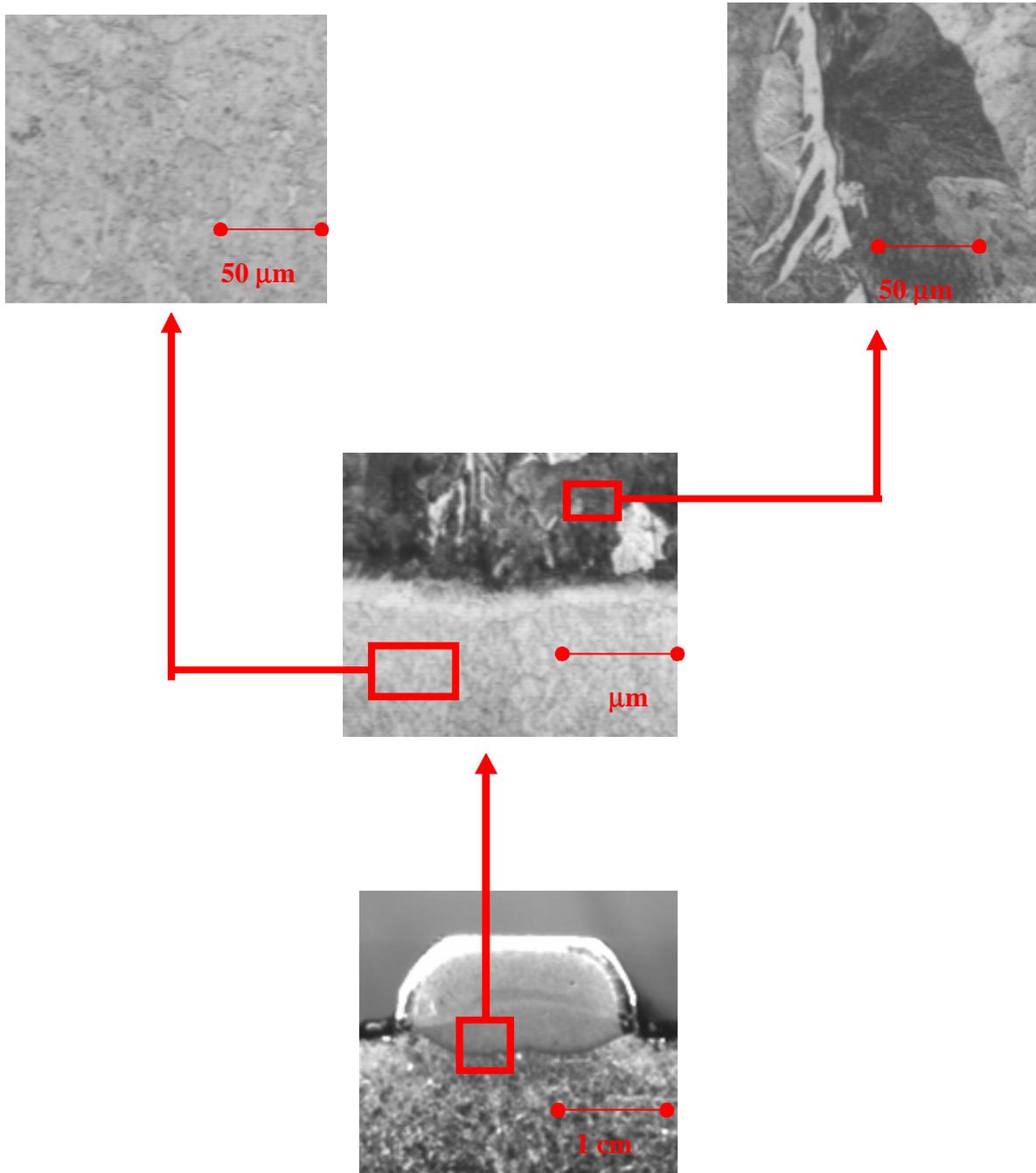


Fig. 44. Perfil Microestructural del depósito (interfase con material base) para probetas con tratamiento térmico de temple - revenido con dos pases.

A través de esta secuencia se presenta la microestructura del recubrimiento obtenido, primero a menor aumento ( $200\mu$ ) y luego observándose algunos detalles del mismo a mayor aumento ( $50\mu$ ).

La trayectoria seguida en forma ascendente comienza con una macrofotografía que muestra el cordón, el material base, la zona afectada por el calor y la sección tomada en la probeta para el análisis siguiente. La segunda foto muestra una micrografía a 200X donde se puede observar la interfaz y la sección tomada para realizar un mayor acercamiento. Se aprecia la zona del material base afectada térmicamente debido al cambio de la microestructura original del material base.

La fotografía final del lado derecho muestra un acercamiento mayor del material base ( $50\mu$ ), se muestra una sección de estructuras del tipo Widmannstätten y granos bien definidos de ferrita.

La fotografía de la izquierda muestra una sección de la probeta correspondiente a una sección del cordón, donde se puede observar la presencia exclusiva de carburos en los límites de grano en una matriz austenítica.

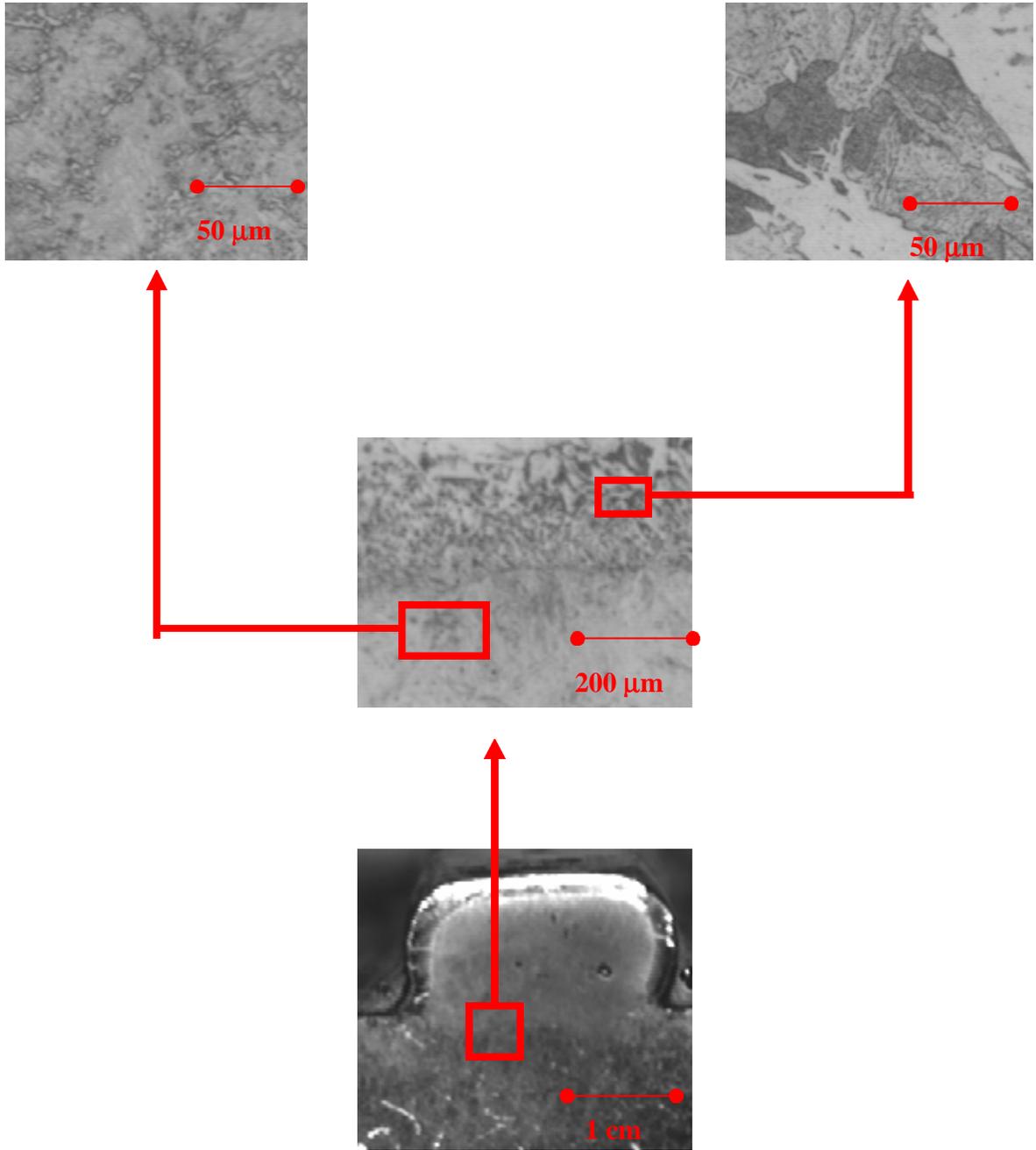


Fig 45. Perfil Microestructural del depósito (interfase con material base) para probetas con tratamiento térmico de temple - revenido con tres pases.

A través de esta secuencia se presenta la microestructura del recubrimiento obtenido, primero  $\mu$ ) y luego observándose algunos detalles del mismo a  $\mu$ ).

La trayectoria seguida en forma ascendente comienza con una macrofotografía que muestra el cordón, el material base, la zona afectada por el calor y la sección para el análisis siguiente. La segunda foto muestra una micrografía a 200X donde se puede observar la interfaz y la sección tomada para realizar un mayor acercamiento. Se aprecia la al cambio de la microestructura original del material base.

La fotografía final del lado derecho muestra un acercamiento mayor del material base (50 ), se muestra una sección de estructuras del tipo Widmannstätten y granos bien definidos de ferrita.

La fotografía de la izquierda muestra una sección de la probeta correspondiente a una límites de grano en una matriz austenítica.

### 3.7.- METALOGRAFIA

Los resultados obtenidos se muestran en las siguientes tablas:

Tabla 31. Fase, tamaño y cantidad presente de microestructura en la Probeta 114.2 **Material Base** Sin tratamiento térmico 1 pase

	<b>Largo</b>	<b>Area</b>		<b>Area</b>	<b>Largo</b>
	6.3222113	8		6	2.8284271
	2.2352393	6		1993	94.90921
	6.079802	16		18	4.9952216
	3.6055493	7		36	9.217248
	2.8284271	9		52	9.9904432
	84.084305	139		24	8.5981388
	9.4833174	1276		234	25.469553
	21.837456	38		18	5.3847647
8		10	4.4704785		2.8284271
4		8	4.1182318		6.079802
11		19	6.079802		70.543137
16		31	8.0590363		3.1611056
6		1624	77.113754		33.232468
58		45	12.076092		4.9952216
13		5	3.1611059		25.471886
16		20	9.8456497		57.411652
35		37	11.176197		2.8284271
166		11	4.2426405		3.6055493
14		59	15.646674		12.03224
23		188	18.384777		2.2352393
21		171	29.529507		16.154293
4		6	2.8284271		15.809237
44		65	15.123806		13.411436
7		16	5.3847647		7.2110987
6		11	6.3222113		3.6055493
15		11	3.6055493		5.3847647
95		7	3.1611059		11.176196
4		14892	311.04001	13	
207	21.170799		64.660645		
<b>Presente</b>	<b>grano (G)</b>	<b>grano</b>		<b>Pixels de fase</b>	
Ferrita	0		26600	13440.98	50.53
	0	Ver fig.46			49.47
Austenita		Limite de grano			-

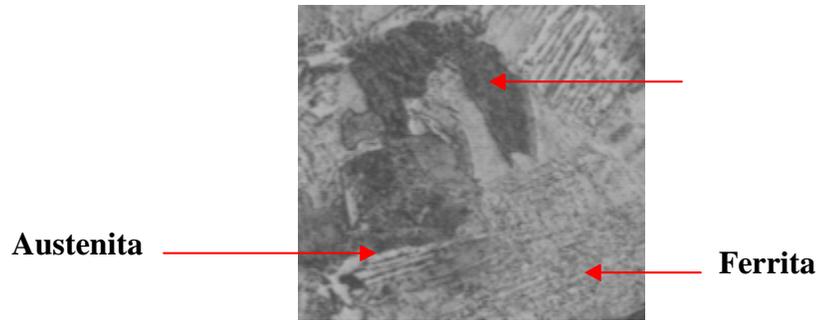


Fig. 46. Material base de probeta sin tratamiento térmico con un pase

Se observa que al aplicar el cordón sin tratamiento térmico posterior, las fases presentes son las esperadas, es decir, ferrita, perlita y austenita; presentando la perlita y la ferrita un tamaño de grano similar, con una distribución muy equitativa.

Tabla 32. Fase, tamaño y cantidad presente de microestructura en la Probeta 114.2 **Material Aporte** Sin tratamiento térmico 1 pase

Area	Largo	Area	Largo	Area	
287	49.228249		29.198318	7	
14	7.0643101		10.198033	10	
5	2.2352393		4.4704785	4	
8	2.8284271		15.556349	4	
4	2.8284271		5.8240585	20	
6	2.8284271		3.1611059	12	
23	8.5390873	242		36	16.393068
	4.9952216	4		192	31.320774
	15.805529	153		15	5.8240585
	7.2791519	24		14	7.2110987
	5.8240585	4		4	2.2352393
	5.8240585	4		27	8.9409571
	8.9409571	29		6	4.4704785
	11.648117	8		4	2.2352393
	39.541111	15		4	4
	2.8284271	4		41	12.529514
	14.422197	5		12	6.3222113
	4.9952216	4		41	14.985665
	2.8284271	7		140	24.152184
	15.253666	11		7	2.8284271
	8.2364626	36		4	2.8284271
	8.2364626	9		27	11.693409
	26.901785	37		50	12.203688
	2.2352393	12		11	5.8240585
	7.810029	11		19	5.6568542
	6.705718	7		62	15.646674
	11.693409	11		64529	572.44043
	4.4704785	25		19	5.3847647
	2.8284271	7		11	5.0990167
Presente	grano (G)	grano		Pixels de Fase	
Austenita	3			63842.40	94.02
	--	Limites de grano	67903		5.98

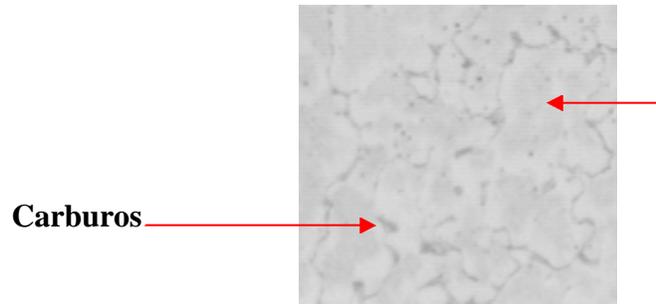
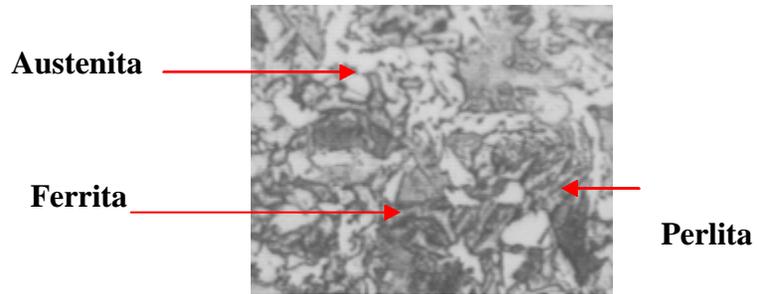


Fig 47. Material de aporte de probeta sin tratamiento térmico con un pase

Se observa que al aplicar el cordón sin tratamiento térmico posterior, las fases presentes son las esperadas, es decir, austenita y carburos presentes en los límites de grano; presentando un tamaño de grano homogéneo, con una distribución muy equitativa.

Tabla 33. Fase, tamaño y cantidad presente de microestructura en la Probeta 4.12 **Material Base Sin** tratamiento térmico 2 pases

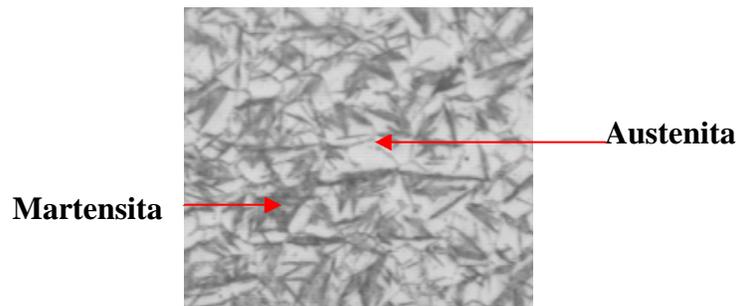
Area	Largo	Area	Largo	Area	Largo
205	35.224022	12	6.4026251	29	7.6152067
5	2.2352393	726	51.618797	13	6.079802
19	8.2364626	8	4.4704785	6	2.8284271
6	2.8284271	4	4.4704785	5	2.2352393
6	4.4704785	8	3.6055493	23	8.0590363
4	2.8284271	441	50.586609	6	2.8284271
6	4.4704785	9	3.6055493	65	16.999992
46	9.4296074	7	2.2352393	8	3.1611056
24	8.0590363	227	26.244896	6	4.1182313
12	4.4704785	13	6.4026251	4	2.8284271
191	24.587631	4	2.8284271	4	4.1182318
796	55.127228	7	2.8284271	4	2.8284271
98	21.633297	6	2.8284271	15	6.705718
4	4	15	6.705718	7	2.8284271
4	4	17	6.4026251	13	4.4704785
6	2.8284271	9	4.4704785	7	3.1611059
668	61.84584	4	2.2352393	8	4.1182318
4	2.8284271	38	12.203688	28	9.217248
11	5.8240585	25	6.3222113	24	9.4833174
6	5.6568542	5	2.2352393	6	4.9952216
4	2.8284271	17	6.3222113	7	2.8284271
10	4.4704785	4	4.4704785	138	26.162952
7	4.4704785	29	10.769529	1001	71.835083
13	5.6568542	5	2.8284271	51	10.816648
32	9.0546799	4556	192.79309	12322	292.96185
10	7.2110982	5	3.1611059	40	10.294275
7	2.8284271	10	4.9952216	21	5.6568542
12	4.4704785	4	2.8284271	9	3.6055493
31	10.198034	9	4.1182313	14	4.1182313
15	7.810029	6223	140.13168	8	4.4704785
Fase Presente	Tamaño de grano (G)	Forma de grano	Area total	Pixels de fase	Distribución
Perlita	4	Ver	29014	13889	47.87
Ferrita	4	Figura 48		8216.76	28.32
Austenita	---	Limite de grano		6908.23	23.81



erior, las fases presentes son las esperadas, es decir, ferrita, perlita y austenita; presentando la austenita y la ferrita un tener mayor presencia de calor, la perlita tiende a formarse en mayor grado.

Tabla 34. Fase, tamaño y cantidad presente de microestructura en la Probeta 4.12 **Material de aporte** Sin tratamiento térmico 2 pases

Area	Largo	Area		Area	Largo
	4.1182318	18		61	14.849242
14		218	22.188866		4.4704785
8		8	4.4704785		9.217248
51		11	4.4704785		5
9		23	7.6152067		5.3847647
26		13	4.2426405		6.3222113
145		467	55.409584		6.3222113
7		342	44.001995	5	
7	3.1611059		5.3847647	78	
28	7.6152067		10.816648	61	
8	3.1611059		6.705718	7	
11	3.6055493		12.80525	282	
80	17.258621		2.2352393	18523	
109	24.709389		4.9952216	36	
4	2.8284271		9.217248	4	
140	29.120295		4.4704785	23	
13	6		2.8284271		
	8.2364635	7			
Fase Presente	Tamaño de grano	Forma de grano	Area total	fase	Distribución
	---	Ver	21118	9384.83	44
	---			11741.6	



Se observa que al aplicar el cordón sin tratamiento térmico posterior, las fases presentes son una matriz de austenita y martensita; presentando la forma de grano irregular, característica de dicha estructura con una distribución similar.

Tabla 35. Fase, tamaño y cantidad presente de microestructura en la Probeta 3.16.1 **Material Base** Sin tratamiento térmico 3 pases

Area	Largo	Area	Largo	Area	Largo
6	3.1611059	5	2.8284271	9	3.6055493
21	9.217248	7	3.1611059	4	2.8284271
70	16.154293	29	11.178819	157	19.923574
6	2.8284271	4	2.8284271	68	12.529514
10	4.4704785	62	17.67767	8	4.4704785
24	7.0710678	46	10.440258	11	4.9952216
20	6.079802	59	11.648117	16076	267.63837
6	4.4704785	22	6.079802	8	4.4704785
9	3.1611056	8	4.4704785	12	9.4833164
4	2.8284271	128	22.352392	7	4.1182318
17	5.8240585	29	8.5390863	74	15.620059
47	14.306534	196	37.213905	7	3.6055493
19	5.824059	5	2.8284271	8	4.4704785
162	20.246256	28	8.485281	13	5.3847647
18	8.0590363	4	2.2352393	4	2.8284271
7	2.8284271	72	14.306534	4	2.8284271
7	2.8284271	27	8.5981388	17	9.8456497
7	3.1611059	27	10.294275	5	2.2352393
4	2.2352393	93	16.393068	425	51.970955
21	6.079802	15	4.4704785	4	2.8284271
5	2.2352393	4	2.2352393		
Fase Presente	Tamaño de grano (G)	Forma de grano	Area total	Pixels de fase	Distribución
Austenita	---	Ver figura	18281	9727.32	53.21
Widmanstätten	---	50		8553.68	46.70

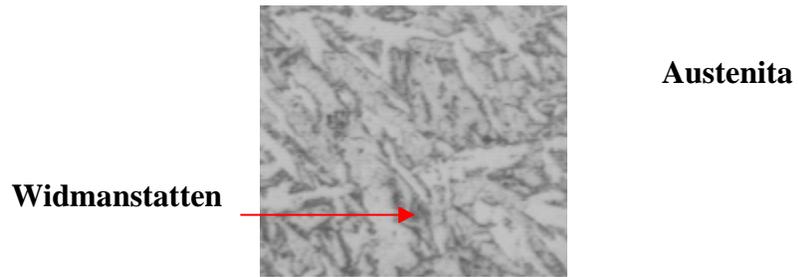


Fig 50. **Material Base** tratamiento térmico 3 pases

Se observa que al aplicar el cordón sin tratamiento térmico posterior, las fases presentes son Widmanstätten y austenita; presentando la Widmanstätten y la austenita un tamaño de itativa.

Tabla 36. Fase, tamaño y cantidad presente de microestructura en la Probeta 3.16.1 **Material Aporte** Sin tratamiento térmico 3 pases

Area	Largo	Area	Largo	Area	Largo
6	3.1611059	68	12.529514	22	6.079802
21	9.217248	8	4.4704785	8	4.4704785
70	16.154293	11	4.9952216	128	22.352392
6	2.8284271	5	2.8284271	29	8.5390863
10	4.4704785	7	3.1611059	196	37.213905
24	7.0710678	29	11.178819	5	2.8284271
20	6.079802	4	2.8284271	28	8.485281
6	4.4704785	62	17.67767	4	2.2352393
9	3.1611056	46	10.440258	72	14.306534
4	2.8284271	59	11.648117	27	8.5981388
17	5.8240585	27	10.294275	5	2.2352393
47	14.306534	93	16.393068	16076	267.63837
19	5.824059	15	4.4704785	8	4.4704785
162	20.246256	4	2.2352393	12	9.4833164
18	8.0590363	4	2.8284271	7	4.1182318
7	2.8284271	17	9.8456497	74	15.620059
7	2.8284271	8	4.4704785	157	19.923574
7	3.1611059	13	5.3847647	7	3.6055493
4	2.2352393	4	2.8284271	425	51.970955
21	6.079802	9	3.6055493	4	2.8284271
5	2.2352393	4	2.8284271		
Fase Presente	Tamaño de grano	Forma de grano	Area total	Pixels de fase	Distribución
Martensita	---	Ver figura 51	18281	9727.32	53.21
Austenita	---			8553.67	46.79

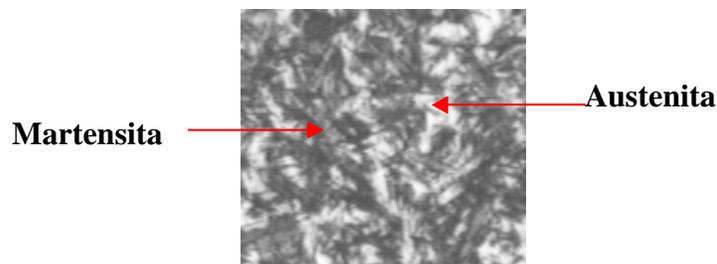


Fig 51. **Material Aporte** Sin tratamiento térmico 3 pases

Se observa que al aplicar el cordón sin tratamiento térmico posterior, las fases presentes son una matriz de austenita y martensita; presentando la forma de grano irregular, característica de dicha estructura con una distribución similar.

Tabla 37. Fase, tamaño y cantidad presente de microestructura en la Probeta 26.4 **Material Base** Con tratamiento térmico de recocido 1 pase

Area	Largo	Area	Largo	Area	Largo
27	8.5981388	6	3.6055493	47	12.644423
7	3.6055493	4	2.8284271	90	26.54114
62	11.397198	8	3.6055493	25	8.9409571
4	4.1182318	4	2.2352393	6	4.2426405
98	16.154293	5	2.8284271	5	3.1611059
15	7.2791519	2182	146.44803	4	2.8284271
7	4.4704785	6584	222.42538	5	2.2352393
11	5.824059	9	3.6055493	19	6.705718
66	13.035157	105	40.513805	16	5.0990171
8	4	10	5.3847647	17	6.705718
8	5.3847647	28	9.4833164	53	13.140389
4	2.8284271	4	2.8284271	4	2.2352393
46	15.230414	13	7.0710678	12	3.6055493
27	8.5390863	88	17.800472	5	3.6055493
67	15.620058	5	2.8284271	116	13.590728
20	7.810029	13	9.0546799	28695	361.64722
37	11.176196	44	10.769529	12	6.4026251
20	6.705718	785	42.38586	15	6.3222113
18	4.9952216	18	6.4026251	165	24.06448
9	4.2426405	543	46.592472	10	4.4704785
6	6.079802	6	2.8284271	4	4.4704785
264	39.204273	5	4.4704785	6	3.6055493
6	2.8284271	107	20.880516	18	6.705718
22	8.0590363	22	7.2791519	6	3.1611056
63	12.03224	6	4.4704785	6	2.8284271
64	20.999073	5	2.8284271	11	4.4704785
5	2.2352393	122	22.188866	12	4.9952216
9	5.3847647	827	52.489792	20	7.6152067
13	6.705718	10	5.6568542	8	4.4704785
8	3.6055493	11	4.2426405	4	2.8284271
Fase Presente	Tamaño de grano (G)	Forma de grano	Area total	Pixels de fase	Distribución
Widmannstaten	---	Ver	52145	17406.00	33.38
Ferrita	2	Figura 52		34738.99	66,62

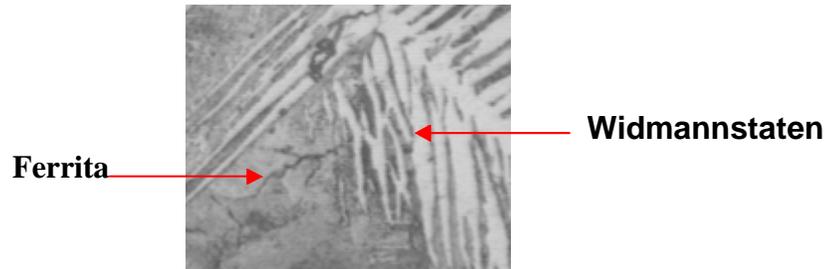


Fig 52. **Material Base** Con tratamiento térmico de recocido 1 pase

Se observa que al aplicar el cordón con tratamiento térmico posterior de recocido, las fases presentes son Widmanstatten y ferrita; presentando la Widmanstatten un tamaño de grano irregular y la ferrita un tamaño de grano medible, con una distribución mayor de ferrita.

Tabla 38. Fase, tamaño y cantidad presente de microestructura en la Probeta 26.4 **Material Aporte** Con tratamiento térmico de recocido 1 pase

Area	Largo	Area	Largo	Area	Largo
84265	447.6286	16	7.2791519	4	4.1182318
68	14.848588	16	6.079802	5	2.2352393
24	8.0590353	9	5.3847647	33	10.816648
6	3.1611056	7	2.8284271	16	4.9952216
Fase Presente	Tamaño de grano	Forma de grano	Area total	Pixels de Fase	Distribución
Austenita	5	Ver figura 53	84469	78488.59	92.92
Carburos	----			5980.41	7.08

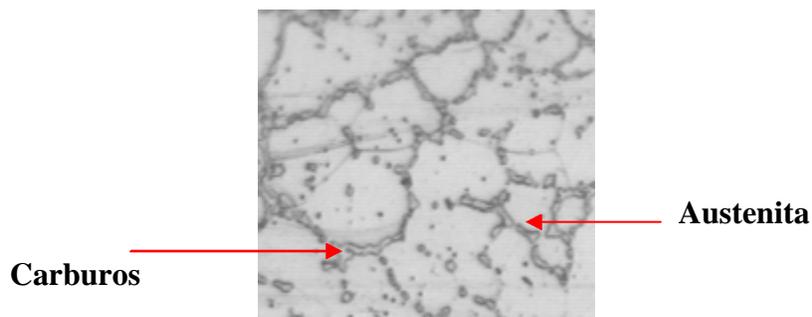


Fig 53. **Material Aporte** Con tratamiento térmico de recocido 1 pase

Se observa que al aplicar el cordón con tratamiento térmico posterior de recocido, la fase presentes es austenita y carburos; presentando la austenita un tamaño de grano regular y la carburos localizados en los limites de grano.

Tabla 39. Fase, tamaño y cantidad presente de microestructura en la Probeta 5.11 **Material Base** Con tratamiento térmico de recocido 2 pases

Area	Largo	Area	Largo	Area	Largo
10	4.1182313	42	17.67767	13	10.049864
9	6.705718	6	2.8284271	4	2.2352393
6	4.4704785	27	9.9904432	7	3.1611059
1289	64.179054	6	2.2352393	7	3.1611059
15	6.705718	22	5.8240585	13	6.079802
11	7.2110987	7	2.8284271	109	16.277836
13	8.5390863	6	4.1182318	73	16.536976
11	4.9952216	8	3.6055493	52	16.118073
34	9.217248	5	2.2352393	62	18.434496
22	6.705718	39	8.2364635	5	3.1611056
5	2.2352393	6	6.079802	27	11.178819
8	4.1182313	12	4.9952216	25	6.705718
8	2.8284271	7	3.6055493	5	3.1611059
22	11.176196	18	11.397198	71	12.80525
37	9.217433	7	2.8284271	53	12.529514
95	16.118073	16	7.6152072	17	9.4296083
13	4.9952216	5	2.8284271	4	4.4704785
4	2.2352393	488	46.860176	9	5.3847647
10	3.6055493	9	5.3847647	10	5.6568542
81	14.764753	4	4.1182318	4	4.1182318
4	4.1182318	42	14.848588	10	4.1182313
128	26.54114	4	2.8284271	6	2.8284271
11	4.9952216	5	4.1182318	4	2.8284271
85	13.923851	12	4.9952216	4	2.8284271
16	6.4026251	4	2.8284271	4	2.8284271
273	35.46233	27	9.4833174	21	5.3847647
4	2.8284271	7	5.0990167	23	6.705718
5	2.2352393	25	10.440257	27	10.769529
22	7.2791514	11	4.2426405	15	5.3847647
314	38.5499	5	3.1611056	10	6.079802
Fase Presente	Tamaño de grano (G)	Forma de grano	Area total	Pixels de fase	Distribución
Perlita	0	Ver	4176	1761.43	42.18
Ferrita	1	Figura		2014.08	48.23
Austenita	---	54		400.47	9.59

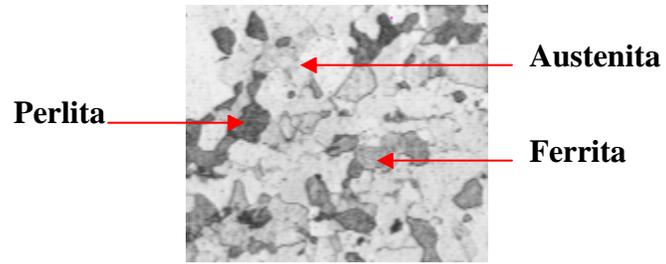


Fig 54. **Material Base** Con tratamiento térmico de recocido 2 pases

Se observa que al aplicar el cordón con tratamiento térmico posterior de recocido, las fases presentes son austenita, perlita y ferrita; presentando la perlita el tamaño de grano más grande y la ferrita un tamaño de grano menor, con una distribución equitativa.

Tabla 40. Fase, tamaño y cantidad presente de microestructura en la Probeta 5.11 **Material Aporte** Con tratamiento térmico de recocido 2 pases

Area	Largo	Area	Largo	Area	Largo
65	14.316265	5	2.8284271	39	12.644423
10	4.1182313	4	2.8284271	30098	277.89566
4	2.8284271	6	2.8284271	4	2.8284271
10	4.4704785	21	7.0710678	5	3.6055493
4	2.8284271	6	2.8284271	8	6.079802
6	3.1611056	7	3.1611056		
Fase Presente	Tamaño de grano (G)	Forma de grano	Area total	Pixels de fase	Distribución
Perlita	1	Ver	30333	24885.19	82.04
Ferrita	1	Figura		5117.17	16.87
Austenita	---	55		330.62	1.09

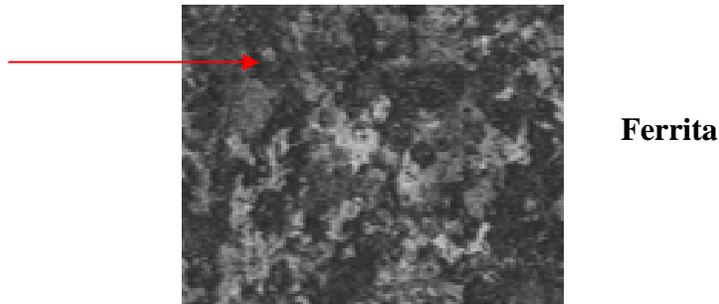


Fig. 55. **Material Aporte** Con tratamiento térmico de recocido 2 pases

Se observa que al aplicar el cordón con tratamiento térmico posterior de recocido, las fases presentes son austenita, perlita y ferrita; presentando la perlita el tamaño de grano más grande y la ferrita un tamaño de grano menor, con una distribución equitativa, con mayor presencia de dichas estructuras a expensas de la austenita.

Tabla 41. Fase, tamaño y cantidad presente de microestructura en la Probeta 3.25 **Material Aporte** Con tratamiento térmico de recocido 3 pases

Area	Largo	Area	Largo	Area	Largo
24	5.6568542	1224	67.999969	1847	84.326202
170	20.117153	292	27.493011	7	2.8284271
4	4.1182318	376	43.539398	6	2.8284271
435	45.300545	1303	68.50544	8	3.6055493
60	19.220192	5	2.8284271	31	9.217433
37	7.810029	14	5.3847647	7	3.1611059
163	16.970562	76	12.727922	6	2.8284271
108	18.859217	527	53.897194	13	6.4026251
24	6.4026251	5	2.2352393	40	22.552727
103	22.357637	17	7.0643101	66	22.127741
14	10.049864	18	7.0643101	14	6.079802
24	7.2110987	1022	84.691162	6	4
10	3.6055493	8	4.1182318	7	2.8284271
20	7.810029	1483	74.246216	121	12.999971
12	7.2791519	74	12.644423	7	2.8284271
36	9.217433	12	4.4704785	25	8.9409571
4	2.8284271	1535	83.646652	70	12.999971
1138	89.310555	6	2.8284271	9	2.8284271
258	23.334524	4	2.8284271	36	8.0590363
17	6.079802	24	5.3847647	6	4.4704785
5	2.2352393	4	2.8284271	13	5.0990171
26	7.2110987	38	10.624836	415	32.858284
8	4.1182318	15	6.079802	87	13.601362
13	4.4704785	632	39.823784	22	6.4026251
77	12.354694	83	13.590728	10	5.0990167
5	2.2352393	5	2.8284271	33	9.4833164
45	11.176197	33	7.6152072	29	7.6152077
4	2.8284271	1662	69.296463	8	2.8284271
35	9.8456497	5	3.1611056	9	5.0990167
29	8.0590363	300	30.882824	6	6.079802
Fase Presente	Tamaño de grano (G)	Forma de grano	Area total	Pixels de fase	Distribución
Perlita	2	Ver Figura 56	23582	6673.70	28.30
Austenita	---			3619.83	15.35
Ferrita	2			13288.45	56.35

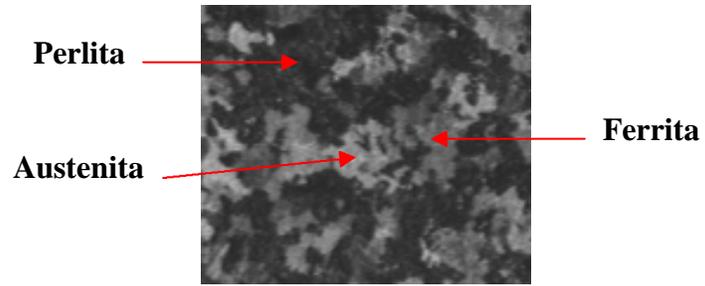


Fig 56. Con tratamiento térmico de recocido 3 pases

Se observa que al aplicar el cordón con tratamiento térmico posterior de recocido, las fases grano igual, con una distribución mayor de ferrita.

Tabla 42. Fase, tamaño y cantidad presente de microestructura en la Probeta 3.25 **Material Base** Con tratamiento térmico de recocido 3 pases

Area	Largo	Area	Largo	Area	Largo
77	14.128621	7	4.4704785	9	6
24	9.8456497	749	56.284275	9	5.3847647
28	9.8456497	31	10.440257	6	3.1611059
21	7.0643101	129	22.845623	18	7.0710678
6	4.1182318	32	8.5390863	11	6.079802
4	2.2352393	14	4.4704785	54	17.71941
4	2.8284271	33	8.5390863	4	2.8284271
5	2.2352393	11	5.0990167	8	4.4704785
12	4.4704785	4	2.8284271	9	3.1611056
12	4.4704785	38	10.624836	101	18.966635
2932	147	5	2.8284271	3972	154.69308
51	14.306534	4	2.2352393	2810	118.33929
7	3.6055493	4	2.8284271	32	9.4833174
28	8.940958	18	5.8240585	36	8.9409571
5	4	3531	108.05481	26	9.217433
4	2.2352393	8	3.6055493	4	4.1182318
18	6.3222113	12	7.6152077	8	4.4704785
9	3.6055493	7	3.6055493	12	6.3222113
17	6.4026251	5	3.6055493	10	5.0990171
8	4.9952216	665	45.69606		
Fase Presente	Tamaño de grano (G)	Forma de grano	Area total	Pixels de fase	Distribución
Perlita	7	Ver Figura 57	15718	7884.14	50.16
Ferrita	7			6057.71	38.54
Austenita	---			1774.56	11.29

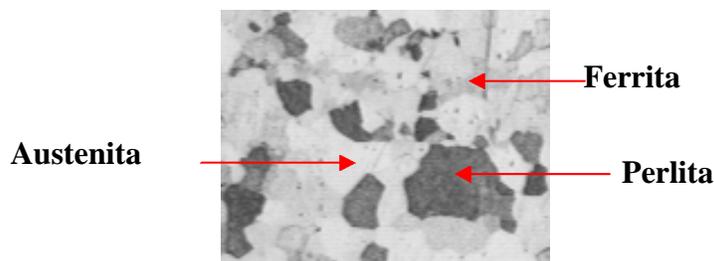


Fig. 57. **Material Base** Con tratamiento térmico de recocido 3 pases

Se observa que al aplicar el cordón con tratamiento térmico posterior de recocido, las fases presentes son austenita, perlita y ferrita; presentando la perlita y la ferrita un tamaño de grano igual, con una distribución mayor de perlita.

Tabla 43. Fase, tamaño y cantidad presente de microestructura en la Probeta 2.12 **Material Base** Con tratamiento térmico de Temple 1 pase

Area	Largo	Area	Largo	Area	Largo
12	6.4026251	6	2.8284271	5	2.2352393
31	11.397846	6	4.1182318	4	4
49	14.128621	19	6.705718	9	5.3847647
129	40.10144	4	2.2352393	2739	111.78285
41	13.601362	20	6.7057176	6	3.1611056
10	5.8240585	6	4.1182313	5	2.8284271
20	10.769529	5	2.2352393	38	12.203688
5	2.2352393	16	5.3847647	35	13.33548
5	3.1611056	6	2.8284271	8	4.4704785
23	9.4833164	4	2.8284271	7	5.0990171
4	2.8284271	14	6.3222113	5	3.1611059
6	2.8284271	87	14.212654	8	8.059495
7	3.6055493	56	14.985665	8	4.1182313
4	2.2352393	6	3.1611059	5	3.6055493
10	6.079802	55	12.529514	6	2.2352393
11	3.6055493	6	2.8284271	14	5.3847647
5	2.8284271	7	3.1611056	18	7.810029
4	2.8284271	206	31.320774	62	21.47047
4	2.2352393	11	3.6055493	8	2.8284271
4	2.8284271	6	2.8284271	95	19.308615
10	4.2426405	5	2.2352393	10	5.824059
4	2.8284271	4	4.1182318	11	4.4704785
13	5.0990167	16	6.079802	60967	420.46848
37	12.999971	7	4.1182318	50	17.027462
44	12.999971	5	3.1611059	5	3.1611056
15	6.079802	58	16.393068	10	4.9952216
4	2.8284271	24	6.4026251	12	5.8240585
4	2.2352393	3222	130.60753	4	2.8284271
Fase Presente	Tamaño de grano (G)	Forma de grano	Area total	Pixel de fase	Distribución
Widmannstätten	---	Ver Figura 58	72217	39798.78	55.11
Perlita	0			20581.84	28.5
Ferrita	0			11836.36	16.39

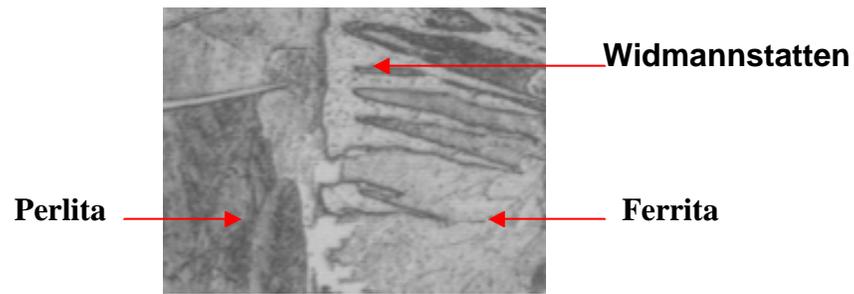


Fig 58. **Material Base** Con tratamiento térmico de Temple 1 pase

Se observa que al aplicar el cordón con tratamiento térmico posterior de temple, las fases presentes son Widmannstätten, perlita y ferrita; presentando la Widmannstätten distribución mayor que la ferrita (segunda en cantidad) y la perlita, el tamaño de grano de la perlita y la ferrita es similar e igual a cero (0); en la escala de Heyn.

Tabla 44. Fase, tamaño y cantidad presente de microestructura en la Probeta 2.12 **Material Aporte** Con tratamiento térmico de Temple 1 pase

Area	Largo	Area	Largo	Area	Largo
19	6.705718	1983	88.249344	31	7.6152072
7	4.9952216	8	4.4704785	5	2.2352393
10	4.4704785	43	9.4296074	6	4.1182318
4	2.2352393	6	3.6055493	7	3.6055493
8	8.059495	16	8.2364626	8	4.4704785
5	2.2352393	30	8.485281	7	2.8284271
18	8.059495	7	3.6055493	8	4.4704785
8	2.8284271	5	3.6055493	4	4.1182318
19	7.2791519	8	3.6055493	4	4.4704785
19	9.217248	12	6.3222113	11	4.9952216
8	4.1182313	14	8.0590363	8	3.6055493
15	8.0590363	5	2.8284271	10	4.4704785
4	2.8284271	5	4.1182318	30	9.8994942
6	2.8284271	5	2.8284271	6	2.8284271
18	16.020973	42	10.624836	4	2.8284271
25	8.485281	9	4.4704785	42	16.263456
5	2.8284271	4	2.8284271	8	5.3847647
7	2.8284271	6	2.8284271	10	3.6055493
721	51.53463	7	4.1182313	9	4.4704785
5	3.1611059	4	2.8284271	5	2.8284271
182	29.399965	79	19.633289	5	2.2352393
10	5.6568542	4	4.4704785	6	2.8284271
18	5.3847647	6	4	4	2.8284271
8	4.4704785	4	2.2352393	6	3.1611059
32	6.3222113	4	4.1182318	6	4.4704785
6	2.8284271	12	4.9952216	8	4.4704785
40	9.8456497	11	7.2791519	4	2.2352393
44	13.590727	4	4.1182318	25663	219.65131
11	6.3222113	10	3.6055493	19475	270.82916
4	4	7	3.6055493	13	4.9952216
Fase Presente	Tamaño de grano	Forma de grano	Area total	Pixels de fase	Distribución
Carburos	----	Ver figura 59	49601	47334.23	95.43
Austenita	1			2266.7	4.57

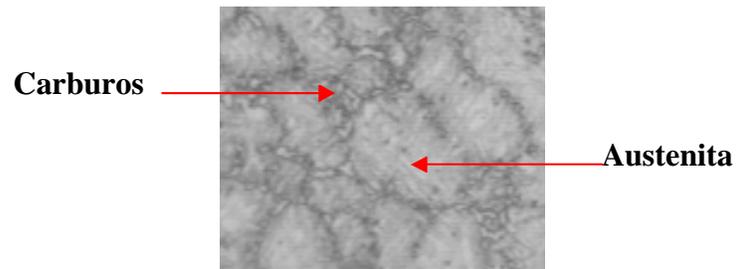


Fig 59. **Material Aporte** Con tratamiento térmico de Temple 1 pase

Se observa que al aplicar el cordón con tratamiento térmico posterior de temple, la fase presente es austenita; presentando la misma carburos distribuidos a lo largo de los límites de grano, y un tamaño homogéneo de 1 en la escala de Heyn.

Tabla 45. Fase, tamaño y cantidad presente de microestructura en la Probeta 5.25 **Material Base** Con tratamiento térmico de Temple 2 pases

Area	Largo	Area	Largo	Area	Largo
37	7.810029	7	3.6055493	6	6.079802
22	8.5981388	11	4.2426405	51	14.422197
345	98.606293	15	5.8240585	6	2.8284271
4	2.8284271	5	2.2352393	5	2.8284271
28	8.5981388	5	2.8284271	542	69.647919
92	20.591156	4	2.8284271	17	10.049864
132	28.230385	515	133.03067	12	4.4704785
5	4.1182318	4	2.8284271	59	15.29705
274	99.797516	4	2.8284271	47	16.472925
5	2.2352393	71	24.514297	4	2.8284271
9	3.6055493	9	8.2364635	12	8.059495
9	5.3847647	5	2.2352393	8	5.0990167
21	9.4833174	10	6.3222113	7	3.1611059
14	6.705718	4	4.4704785	8	3.1611059
9	6	5	2.2352393	15595	415.81537
20	11.178819	4	2.8284271	9	4.9952216
10	6.079802	67	17.472178	20	7.2791519
6	4.4704785	8	8.059495	18	7.2791519
39	11.178819	20	8.2364626	45	10.198033
4	2.8284271	48	10.198033	6	2.2352393
104	16.762468	6	2.8284271	11	4.4704785
8	5.3847647	24	9.8456497	61	19.104544
8	4.1182318	16	6.705718	6	4.9952216
76	14.316265	64	12.076092	167	34.032314
21	8.5390863	13	4.2426405		
39	9.8456497	21	7.2791519		
Fase Presente	Tamaño de grano	Forma de grano	Area total	Pixels de fase	Distribución
widmasttaten	---	Ver figura 60	19028	4146.2	21.79
Perlita	0			7419.01	38.99
Ferrita	0			7462.78	39.22

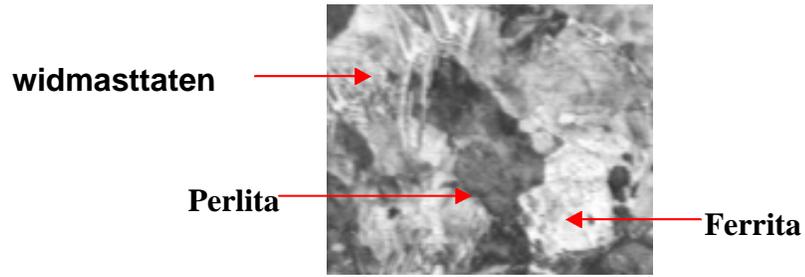


Fig 60. **erial Base** Con tratamiento térmico de Temple 2 pases

Se observa que al aplicar el cordón con tratamiento térmico posterior de temple, las fases de grano similar (0) y la Widmannstatten una distribución menor.

17	7.0643101	8832	190.62518	365	50.943768
31	8.5981388	10	5.8240585	7	4.4704785
4	4.1182318	282	37.352699	5	3.1611056
25	5.824059	19	6.4026251	11	4.9952216
29	8.2364635	8	3.6055493	43	10.769529
7	3.6055493	15	6.705718	5	2.8284271
9	5.3847647	8	4.2426405	10	4.4704785
32	11.397198	31	9.4833174	11	3.6055493
8	4.4704785	23	6.4026251	35	9.8456497
21	7.2110987	5	3.1611056	12	6.3222113
8	4.4704785	4	2.8284271	4	2.8284271
5	3.6055493	394	35.693115	4	2.8284271
30	7.2791519	11	5.3847647	7	3.6055493
17	6.4026251	9	3.6055493	6	4.1182318
12	4.4704785	6	2.8284271	6	2.8284271
6	2.8284271	6	2.8284271	29	9.8994942
12	7.2791514	27	10	102	18.434496
60	15.620058	5	2.2352393	4	2.2352393
30	7.6152072	7	3.1611059	75	17.196278
8	4	3332	136.01363	8	4.9952216
4	2.8284271	19	8.9409571	7	2.8284271
29	9.9904432	10	4.1182313	42	13.33548
10	6.705718	4	2.2352393	5	4.4704785
9	4.4704785	1369	99	5	3.1611056
78	16.640705	81	22.794395	9	5.8240585
61	15.556349	22	8.5981388	4	2.2352393
5	2.8284271	10	4.4704785	12	4.1182318
46	12.076092	9	6.079802	6	3.1611059
15	6.705718	10	4.9952216	4	2.8284271
8	6.705718	4	2.2352393	170	27.306507
<b>Fase Presente</b>	<b>Tamaño de grano</b>	<b>Forma de grano</b>	<b>Area total</b>	<b>Pixels de fase</b>	<b>Distribución</b>
Austenita	2	Ver Figura 61	20835	20049	96.23
Carburos	---			786	3.

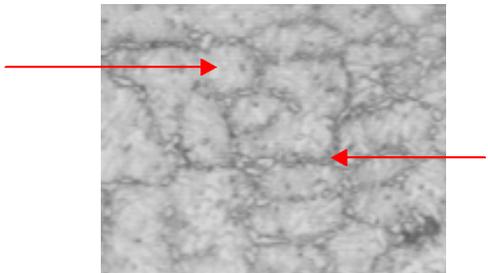


Tabla 47. Fase, tamaño y cantidad presente de microestructura en la Probeta 6.25 **Material Base** Con tratamiento térmico de Temple 3 pases

Area	Largo	Area	Largo	Area	Largo
108	28.25724	23	6.3222113	14	7.0643106
82	15.230413	8	3.6055493	17	8.059495
19	7.2791514	661	47.156319	4	2.8284271
17	8.2364626	121	17.258621	6	2.8284271
13	7.2791514	169	29.120293	16	8.2364635
4	4.1182318	30	9.0546799	5	2.8284271
4	2.2352393	161	60.147095	12	5.3847647
36	8.0590363	7	4.4704785	7	3.6055493
174	32.236145	13	3.6055493	4	2.2352393
8	3.6055493	50	17.114174	13	5.8240585
32	9.4833164	505	63	12	4.4704785
82	18.384735	15	4.4704785	30	6.705718
4	2.8284271	5	2.2352393	6	2.8284271
10	4.1182318	4	2.8284271	5	2.2352393
116	23.386818	7	2.8284271	10	3.6055493
6	4.4704785	4	2.2352393	29	8.9409571
4	2.8284271	48	12.80525	6	4.4704785
5	2.8284271	7	4.2426405	12	5.3847647
84	21.094913	29	7.810029	18	7.2791514
6	2.8284271	6	4.1182318	10	4.4704785
4	2.2352393	10	4.2426405	3492	126.46585
14	4.2426405	25	8.0590363	5	2.2352393
53	10.769529	4	2.2352393	95	20.588551
11	6.079802	5	2.8284271	45	9.8456497
4	2.8284271	7	4.2426405	5	2.8284271
24	12.80525	12	4.9952216	15383	352.84628
4	2.8284271	15	5.3847647	298	42.287842
11	4.9952216	5	2.2352393	54	13.590727
6	3.1611056	4	2.8284271	25	7.810029
15	7.0643101	71191	549.19159	30	9.4296074
Fase Presente	Tamaño de grano (G)	Forma de grano	Area total	Pixels de fase	Distribución
Ferrita	0	Ver Figura 62	97372	46582.76	47.84
Widmannstaten	---			34255.46	35.18
Perlita	0			16533.76	16.98

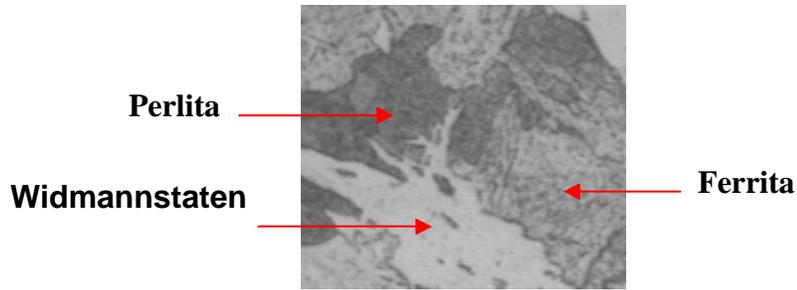


Fig 62. **Material Base** Con tratamiento térmico de Temple 3 pases

Se observa que al aplicar el cordón con tratamiento térmico posterior de temple, las fases presentes son Widmannstatten, perlita y ferrita; presentando la perlita y la ferrita tamaño de grano similar (0) y la ferrita una distribución mayor.

Tabla 48. Fase, tamaño y cantidad presente de microestructura en la Probeta 6.25 **Material Aporte** Con tratamiento térmico de Temple 3 pases

Area	Largo	Area	Largo	Area	Largo
11	4.1182318	25	8.5981388	336	42.341599
41	11.397198	4	2.8284271	4	2.8284271
10	4.9952216	4	2.8284271	5	4.4704785
18	7.0643101	33	9.217248	7	3.1611059
5	2.2352393	16	6.4026251	27	8.5981388
40	10.198033	11	4.9952216	27	6.4026256
8	4.4704785	9	3.6055493	4	2.8284271
4	2.8284271	11	5.3847647	4	4.1182318
46	11.397198	6	2.8284271	5	2.8284271
11	4.2426405	8	4.2426405	4	2.2352393
12	4.4704785	5	2.2352393	6	2.2352393
14	6.3222113	37	9.8456497	5	3.1611056
7	3.6055493	6	2.8284271	107	14.422197
22	10.440258	26	13.33548	35	12.354694
14	4.4704785	12	4.2426405	6	3.6055493
4	2.2352393	4	2.8284271	56327	421.76093
4	2.8284271	10	3.6055493	4	2.8284271
Fase Presente	Tamaño de grano (G)	Forma de grano	Area total	Pixels de fase	Distribución
Austenita	3	Ver figura 63	57411	55126.04	96.02
Carburos	----			2284.96	3.98

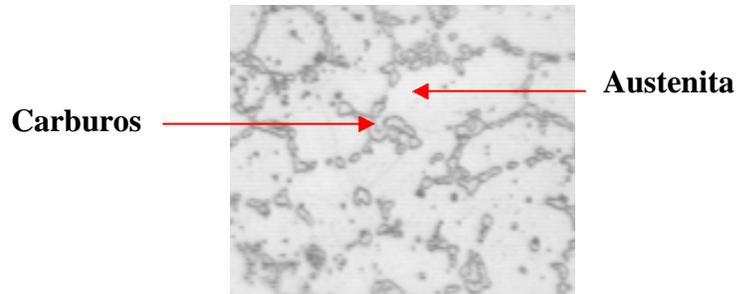


Fig 63. **Material Aporte** Con tratamiento térmico de Temple 3 pases

Se observa que al aplicar el cordón con tratamiento térmico posterior de temple, la fase presente es austenita; presentando la misma carburos distribuidos a lo largo de los límites de grano, y un tamaño homogéneo de 3 en la escala de Heyn.

### 3.8.- EVALUACIONES ADICIONALES.

#### 3.8.1.- DIFRACCION DE RAYOS X

La Difracción de rayos X realizada sobre los cordones arrojó las siguientes gráficas:

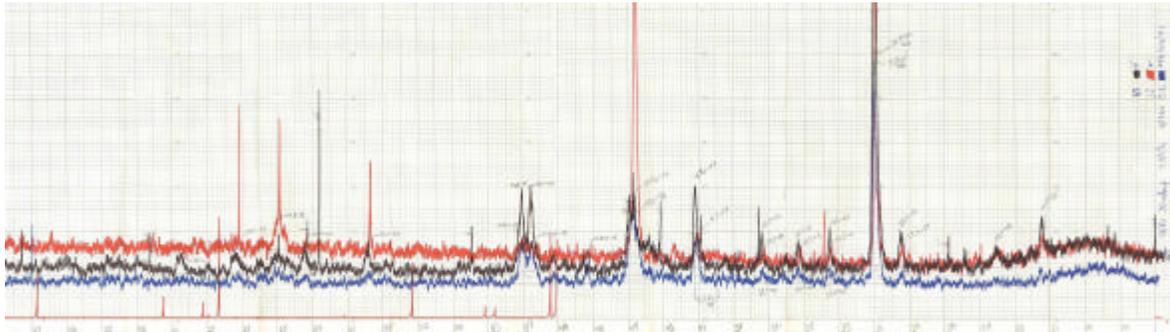


Fig. 64. Difractograma #1

Donde: ----- Sin tratamiento térmico

----- Recocido

----- Temple revenido

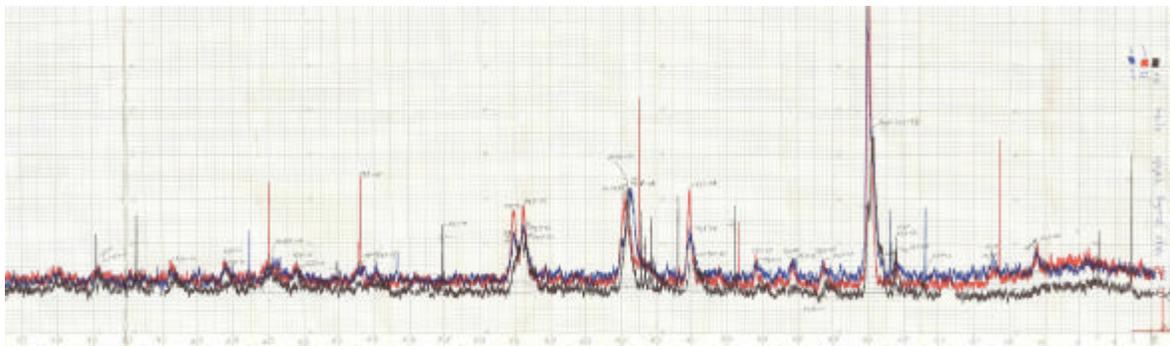


Fig. 65 Difractograma #2

Donde: ----- Sin tratamiento térmico

----- Recocido

----- Temple revenido

De la cual se obtuvo la siguiente data:

Tabla 49. Difractograma de la probeta 3. 1 sin tratamiento térmico 1 pase

Ángulo Doble	Intensidad	Ángulo	Distancia Interplanar	Intensidad Relativa
21.40	16	10.700	4.149	8
23.80	8	11.900	3.735	4
29.40	20	14.700	3.035	10
30.80	193	15.400	2.901	100
33.50	15	16.750	2.673	8
35.30	14	17.650	2.540	7
37.40	20	18.700	2.402	10
41.10	56	20.550	2.194	29
44.80	51	22.400	2.021	26
50.50	49	25.250	1.806	25
51.10	41	25.550	1.786	21
59.90	60	29.950	1.543	31
63.40	11	31.700	1.466	6
67.40	14	33.700	1.388	7
70.60	14	35.300	1.333	7

Tabla 50. Difractograma de la probeta 4. 1 sin tratamiento térmico 2 pases

Ángulo Doble	Intensidad	Ángulo	Distancia Interplanar	Intensidad Relativa
21.50	15	10.750	4.129	7
24.10	12	12.050	3.690	5
29.50	21	14.750	3.025	10
31.00	221	15.500	2.882	100
33.60	25	16.800	2.665	11
35.40	11	17.700	2.533	5
37.40	22	18.700	2.402	10
41.20	47	20.600	2.189	21
44.60	38	22.300	2.030	17
50.50	48	25.250	1.806	22
51.10	47	25.550	1.786	21
59.80	17	29.900	1.545	8
63.50	20	31.750	1.464	9
70.50	12	35.250	1.335	5

Tabla 51. Difractograma de la probeta 3. 2 con tratamiento térmico de recocido 3 pases

Ángulo Doble	Intensidad	Ángulo	Distancia Interplanar	Intensidad Relativa
21.50	15	10.750	4.129	8
29.40	14	14.700	3.035	8
33.50	11	16.750	2.673	6
35.20	11	17.600	2.547	6
37.30	10	18.650	2.409	6
41.10	17	20.550	2.194	10
44.60	177	22.300	2.030	100
64.90	18	32.450	1.436	10

Tabla 52. Difractograma de la probeta 5. 1 con tratamiento térmico de recocido 2 pases

Ángulo Doble	Intensidad	Ángulo	Distancia Interplanar	Intensidad Relativa
27.90	12	13.950	3.195	15
29.40	20	14.700	3.035	24
30.70	82	15.350	2.910	100
33.60	11	16.800	2.665	13
40.80	20	20.400	2.210	24
44.60	51	22.300	2.030	62
50.40	33	25.200	1.809	40
64.80	15	32.400	1.437	18

Tabla 5. Difractograma de la probeta 5. 2 con tratamiento térmico de temple y revenido 2 pases

Ángulo Doble	Intensidad	Ángulo	Distancia Interplanar	Intensidad Relativa
31.00	125	15.500	2.882	100
33.60	11	16.800	2.665	9
35.40	10	17.700	2.533	8
37.40	10	18.700	2.402	8
41.20	28	20.600	2.189	22
44.60	38	22.300	2.030	30
47.30	19	23.650	1.920	15
50.50	25	25.250	1.806	20
51.10	26	25.550	1.786	21

Tabla 54. Difractograma de la probeta 6. 2 con tratamiento térmico de temple y revenido 3 pases

Angulo Doble	Intensidad	Angulo	Distancia Interplanar	Intensidad Relativa
21.50	14	10.750	4.129	9
24.00	15	12.000	3.705	10
31.00	153	15.500	2.882	100
33.60	12	16.800	2.665	8
35.20	12	17.600	2.547	8
37.30	10	18.650	2.409	7
41.10	28	20.550	2.194	18
44.40	52	22.200	2.039	34
50.40	32	25.200	1.809	21
51.10	27	25.550	1.786	18
58.90	9	29.450	1.567	6
59.80	10	29.900	1.545	7
63.40	6	31.700	1.466	4
67.40	12	33.700	1.388	8
74.70	9	37.350	1.270	6

Al obtener el ángulo doble y la intensidad mediante el difractograma en la evaluación de los cordones (material de aporte); podemos hallar por simples ecuaciones matemáticas y con la ayuda de la Ley de Bragg la distancia interplanar y la intensidad relativa asociada a cada elemento evaluado. Se observa la presencia de picos en común en los seis difractogramas evaluados, los cuales corresponden a los ángulos 31; 45 y 51; lo que nos hace afirmar la presencia de los mismos carburos básicos.

Con diferencias en otros picos observamos que cada tratamiento disuelve y crea nuevos carburos, que le confieren las propiedades características. El presente ensayo no pretende evaluar la cantidad total de carburos presentes, solo pretende dar a conocer la presencia de algunos carburos representativos. Con la ayuda técnica adecuada se observó la presencia en primera instancia de:

Tabla. 55 Elementos y compuestos caracterizados en los cordones de prueba

<b>Elemento/ compuesto</b>	<b>Nomenclatura</b>	<b>Clasificación</b>
Fe	Hierro	06-0696
Fe, C	Hierro	31-0619
Fe <sub>3</sub> C	Carburo de Hierro	06-0670
V <sub>2</sub> C	Carburo de Vanadio	20-1372
MoC	Carburo de Molibdeno	45-1015
Fe <sub>2</sub> MoC	Carburo de hierro-molibdeno	17-0130
Cr <sub>2</sub> C	Carburo de Cromo	35-0783

# Capitulo IV

---

## CONCLUSIONES

#### **4.- CONCLUSIONES**

- \* La dureza que generan los recargues duros EFe5-B, disminuye significativamente con los tratamientos térmicos (recocido y temple revenido).
- \* La dureza de los recargues disminuye con el incremento del número de pases.
- \* Todos los cordones de recargue realizados con tres pases presentaron agrietamiento.
- \* La microestructura generada por los tratamientos térmicos varía de acuerdo al número de pases.

# Capitulo V

---

## RECOMENDACIONES

## **5.- RECOMENDACIONES**

- Evaluar la influencia de diferentes parámetros de soldadura del proceso SMAW, para este tipo de electrodo de recargue
- Aplicar recargues duros con el proceso FCAW
- Caracterizar los recargues duros a través del ensayo de desgaste
- Evitar el uso de cordones de tres pases, por presentar agrietamiento

# **Capítulo VI**

---

## **REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS**

## 6.- REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

<sup>0</sup> Análise de transferencia metálica na soldagem a arco. P Riolo de Souza; S. Duarte. V Encontro Ibero-americano de soldagem. 1998

<sup>1</sup> Welding Handbook, Vol 1 Capitulo 2. 8ª edición, p.p 50-54

<sup>2</sup> “Welding metallurgy”. G. Linnert. The American Welding Society. Miami, Fla., 1968.

<sup>3</sup> “Wolman’s engineering alloys”. Robert Gibbons. American society for metals, metals park, Ohio, 1979

<sup>4</sup> Welding Handbook - Fundamentals of Welding

<sup>5</sup> “The theory of moving sources of heat and its application to metal treatment”. D Rosenthal. Transactions of the ASME . Noviembre de 1946. pág 849.

<sup>6</sup> “Welding and Brazing”. Metals Hanbook, Vol 6. American Society of metals, metals park, Ohio.

<sup>7</sup> Ciencia y Técnica de la soldadura. José Palma y Raúl Timerman. Tomo I. Ediciones CONARCO. Pág 22

<sup>8</sup> Ciencia y Técnica de la soldadura. José Palma y Raúl Timerman. Tomo I. Ediciones CONARCO. Pág 174-177

<sup>9</sup> Ciencia y Técnica de la soldadura. José Palma y Raúl Timerman. Tomo I. Ediciones CONARCO. Pág 174-177

<sup>10</sup> Ciencia y Técnica de la soldadura. José Palma y Raúl Timerman. Tomo I. Ediciones CONARCO. Pág 174-177

<sup>11</sup> Ciencia y Técnica de la soldadura. José Palma y Raúl Timerman. Tomo I. Ediciones CONARCO. Pág 153-154

<sup>13</sup> “Metales”. G Ramírez. Edición Telmar. 1969.

<sup>14</sup> The Measurement of cooling Rater associated with arc-welding, por Hess, Merrill, Nippes y Bunk - Supl. Welding Journal. Sep. 1943

<sup>(15)</sup> Ciencia y Técnica de la soldadura. José Palma y Raúl Timerman. Tomo I. Ediciones CONARCO. Pág 211-212

<sup>16</sup> Ciencia y Técnica de la soldadura. José Palma y Raúl Timerman. Tomo I. Ediciones CONARCO. Pág 323-325

<sup>17</sup> Berrios. L “Guía de tratamientos Térmicos”. Universidad Central de Venezuela

<sup>18</sup> “What to Know Before Selecting hardfacing electrodes”. Olin Zollinger, Joseph Beckham. Welding Journal. Febrero de 1998. pág 39-43.

<sup>19</sup> “The theory of mild steel and micro alloy steel’s weldability”. Ivan Hrivnak, Bratislava, Checoslovaquia. 1969.

<sup>20</sup> “Hardfacing: tips and techniques to prevent wear”. John Yochum. American Welder. Enero- Febrero de 2000. pág 16-17.

<sup>21</sup> Metalurgia de la Soldadura de D. Seférian

<sup>22</sup> Ciencia y Técnica de la soldadura. José Palma y Raúl Timerman. Tomo I. Ediciones CONARCO. Pág 154-155

<sup>23</sup> Ciencia y Técnica de la soldadura. José Palma y Raúl Timerman. Tomo I. Ediciones CONARCO. Pág 156-157

<sup>24</sup> Normas COVENIN 0310-91 ASTM E-350

# **CAPITULO VII**

---

**ANEXOS**

## 7.- ANEXOS

### 7.1.- ASTM NORMA E18 – 89a

#### **Método de ensayo estándar para medición de dureza Rockwell y dureza superficial Rockwell de materiales metálicos.**

Esta prueba, es la compilación del método utilizado para determinar la dureza en materiales metálicos, incluye además la verificación y calibración de las maquinas y ensayos. Se utiliza las unidades SI y pulgadas para expresar los resultados.

La prueba Rockwell es la indentación usando la fuerza sobre un material, que ofrece resistencia a ser penetrado, se utiliza un “indentador” con punta de diamante, se utiliza para materiales cuyas durezas son respectivamente altas. El número que expresa la profundidad de la indentación y la fuerza aplicada se especifica con las letras HR-X donde X es la escala en la que se trabaja (B,C,N). La prueba de dureza Rockwell es un valor empírico que aporta información del material, dicha información aporta valores correlacionados con deformación por tensión, resistencia al impacto, ductilidad y otras características físicas de los materiales, usados en controles de calidad y selección de materiales.

Esta prueba por ser localizada en pequeñas partes no representa cambios drásticos en piezas y productos finales. Este método es usado ampliamente como prueba testigo y es usado extensamente en la industria.

El principio general de las pruebas Rockwell se ilustra en la figura 1 (indentador de diamante) y 2 (indentador tipo bola), junto con la tabla 1 y 2. La maquina y limitaciones operativas de uso , varían dependiendo del material a ensayar, como se muestra en las tablas 5 y 6. Igual que el tipo de indentador y la fuerza aplicada. La diferencia en la profundidad de la indentación es llamada  $e$ .

El valor de  $e$  es 0,002 mm para la dureza Rockwell. Para la evaluación de  $e$ , el número es derivado y se debe especificar necesariamente el tipo de indentador y la fuerza aplicada (ver tabla 5 y 6).

En la dureza Rockwell la fuerza preliminar es de 10 kgf (98N). Pudiendo variar entre 60 kgf (589N), 100 kgf (981N) y 150 kgf (1471N). El número de ensayos y escalas varían con el tipo de indentador y fuerza aplicada.

La diferencia en la profundidad es normalmente medida por indicadores electrónicos. La evaluación de la dureza es leída directamente por el equipo, es un número arbitrario cuyo valor relata la diferencia en las profundidades producidas por dos fuerzas aplicadas en la misma escala.

Procedimiento :

Esta prueba normalmente es realizada en ambientes cuyas temperaturas están entre los límites de 10 a 35 °C. Se recomienda controlarla a ambientes más específicos con temperatura de  $23 \pm 5$  °C.

La pieza a ensayar debe ser colocada en el soporte de forma rígida para evitar el efecto de desplazamiento que puede alterar los resultados de la prueba.

En el ensayo no se debe aplicar fuerzas que excedan más de 3 segundos. El equipo está diseñado para ofrecer data directamente. Cada ocho mediciones se debe revisar el equipo para ajustarlo. Las pruebas se deben realizar (para obtener datos confiables) con una separación mínima. En general no existe un método recurrente para obtener la conversión entre escalas de dureza Rockwell o con otras escalas, se utiliza la aproximación en los casos que se requiera por métodos de aproximación obtenidos por pruebas comparativas. A la hora de reportar la data obtenida se debe incluir : el tipo de escala de trabajo (B,C,N), la medida obtenida, la temperatura de trabajo y el número de pruebas realizadas.

## **6.2.- ESPECTROSCOPIA DE EMISIÓN POR PLASMA ICP**

En 1948, el profesor Williams Meggers comenzaba una revisión de los “Principios del análisis espectroquímico” publicado en “Spectroquímica Acta” con la siguiente frase :

“De acuerdo con la Biblia, la espectroscopia comienza cuando, acabado el diluvio, aparece en el cielo el arco iris, pero fueron necesarios miles de años para que el hombre hiciese uso práctico de un espectro”.

Hoy casi cuarenta años después de esta frase de Meggers, el analista dispone de una nueva y revolucionaria fuente capaz de producir espectros elementales para la identificación y

cuantificación de los elementos contenidos en una muestra : el plasma de acoplamiento inductivo ICP”.

### QUE ES UN PLASMA ?

En 1920 LANGMUIR y TONKS, introducen la palabra “PLASMA” para designar un gas ionizado, eléctricamente neutro, confinado en tubos de descarga”. Puede considerarse que el plasma es un cuarto estado de la materia cuyas propiedades derivan de las fuerzas coulombianas por la interacción entre partículas cargadas.

En su aplicación espectroscópica se da el nombre de plasma a un gas parcialmente ionizado, eléctricamente neutro en su conjunto y confinado en un campo electromagnético. Sus temperaturas (4000-10000 K) son notablemente superiores a las de las llamas químicas, lo que constituye la base del interés en su aplicación como fuente de emisión en espectroscopia donde deben disociarse las combinaciones químicas, incluidas las más refractarias.

Un sistema típico de análisis elemental por espectroscopia con un plasma con fuente de excitación y atomización esta constituido por :

- El plasma : que deberá reunir ciertas condiciones de temperatura, confinamiento, etc.
- El generador eléctrico : que aportará la energía externa al plasma que la disipara en forma térmica y radiante.
- El sistema de introducción de la muestra : que deberá permitir un eficaz aporte de la muestra al conjunto con buena penetración en el seno del plasma y con tiempo de residencia suficiente en el mismo.
- El sistema de alimentación de gas : que asegura el funcionamiento de plasma, el transporte de la muestra y eventualmente la formación del aerosol con la muestra.
- El sistema óptico : que permitirá analizar el espectro emitido por el plasma.
- El sistema de tratamiento de la señal: que permitirá el análisis cualitativo y cuantitativo a partir de las radiaciones emitidas.

Veremos a continuación cada uno de estos elementos en detalle.

## *El plasma*

Definido el plasma como un estado de equilibrio entre partículas cargadas y neutras de un gas ionizado:



Tendremos diferentes tipos de plasmas en función de la forma de obtener y mantener dicho equilibrio.

El plasma de acoplamiento inductivo (comúnmente conocido como ICP por las siglas de su denominación inglesa: inductively coupled plasma”) se obtiene por la acción de una corriente de alta frecuencia que genera un campo magnético oscilante hasta el que se lleva el gas que va a sustentar el plasma.

Estos campos magnéticos provocan la aparición de iones y electrones que se mueven siguiendo trayectorias anulares acelerados por efecto de la alternancia de los campos magnéticos, produciéndole por efecto JOULE una liberación de energía calorífica que permite alcanzar temperaturas de hasta 10000 K en el interior de la zona máxima corriente circular. De esta manera se consigue una configuración toroidal del plasma confinado en el campo magnético con una fuerte intensidad luminosa radiante que se denomina (por semejanza) “llama”.

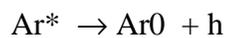
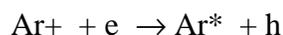
Veamos ahora los mecanismos que tienen lugar en el plasma. Puesto que el argón es el gas más comúnmente utilizado en el plasma ICP y teniendo en cuenta las características que definen un plasma, tendremos las siguientes especies coexistiendo en el mismo :

- electrones (e)
- iones (Ar<sup>+</sup>)
- átomos de argón en estado fundamental (Ar<sup>0</sup>)
- átomos de argón excitados (Ar<sup>\*</sup>)
- Moléculas de argón ionizados (Ar<sup>2+</sup>) y neutras (Ar<sup>2\*</sup>)

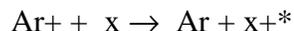
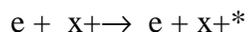
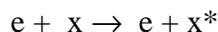
Los electrones son los que, principalmente, van a crear el plasma por lo que es necesario aportarles una energía externa que en el caso que nos ocupa va a ser debida a la radiofrecuencia (rf)



Esta energía deberá ser, como mínimo, igual al potencial de ionización del argón (15,7 electrón volts). Una vez alcanzada la ionización, se producirá la reacción inversa (recombinación radiante) produciéndose la emisión del espectro o del átomo neutro (I) del argón.



Cuando en el seno de este plasma, se inyecta un elemento x, este podrá ser excitado o ionizado mediante las siguientes reacciones :



Este mecanismo de transferencia nos da así mismo un límite superior de 15,7 Ev para la obtención de líneas de emisión sensibles. La recombinación de estos mecanismos nos permite diferenciar tres niveles de energía en plasma ICP.

Una primera zona de 0-16 eV en la que se dispone de las energías liberadas por los átomos de argón en estado excitado, por los átomos de argón en sus dos estados metaestables (11,55 y 11,72 eV) y por los iones de argón en su nivel fundamental (11,76 eV). Con estas energías se pueden excitar e ionizar (en primera ionización) los átomos de la mayoría de los elementos de la tabla periódica, ya que el nivel energético necesario es inferior a los 15 eV, obteniéndose así los espectros de las líneas analíticas más sensibles.

Una segunda zona (16-30 eV) en la que se dispone de las energías liberadas por los iones de argón en el nivel de resonancia y en sus niveles metaestables. En esta zona se producen los espectros de los iones de elementos con potenciales de ionización superiores a 15 eV (halógenos) o bien de los átomos doblemente ionizados (titanio).

En la tercera zona con energía superior a los 30 eV se dispone de la energía cedida por los electrones libres y en ella se excitan las líneas de argón.

Estas zonas energéticas son una simplificación muy esquemática de los mecanismos que se producen en el plasma en función de las diferentes densidades electrónicas y que permiten asignar gradientes de temperatura en las diferentes zonas de la llama.

Físicamente el plasma se confina en un conjunto de 3 tubos concéntricos (generalmente de cuarzo) abiertos por un extremo a la presión atmosférica.

El tubo interior, denominado inyector, se utiliza para hacer llegar el aerosol de la muestra hasta el interior de la llama del plasma. Los otros dos tubos forman una corona cilíndrica a través de la cual se transporta el argón que sustenta el plasma en régimen de turbulencia. Este argón tiene la doble misión de mantener el plasma y de refrigerar las paredes del tubo exterior a fin de evitar su fusión por las elevadas temperaturas alcanzadas en la llama.

Existen dos tipos de antorcha :

- Monobloc : con los tres soldados en un solo cuerpo
- Desmontable : con los tubos independientes montados sobre un soporte teflón, aluminio, etc.

este último tiene la ventaja de :

- Permitir el reglaje de la concentricidad de los tubos
- Permitir utilizar el inyector en material diferente a los tubos exteriores, lo que a su vez permite trabajar con ataques ácidos de la muestra que no podría soportar el inyector de cuarzo normal.
- Permitir un bajo costo de mantenimiento ya que la rotura de uno de los tubos no conlleva la inutilización total de la antorcha como ocurre en la Monobloc.

### *El generador de radiofrecuencia*

Es el elemento que permite aplicar la energía necesaria para sustentar y confinar el plasma ICP.

Se clasifican según el ; tipo de oscilador, la frecuencia y la potencia.

Por el tipo de oscilador se distinguen :

- Osciladores pilotos a cristal piezoeléctrico : cuya frecuencia está determinada por un cuarzo. Estos generadores requieren de un dispositivo electromecánico para corregir las variaciones de impedancia producidas en el plasma con el paso de las muestras.
- Osciladores libres (free running) : cuya frecuencia de oscilación está determinada por los componentes incluidos en la etapa de potencia (bobina de inducción incluida) por lo que las variaciones de impedancia en el plasma se traducen en variaciones de la frecuencia de oscilación.
- Osciladores de líneas acopladas : que son un caso particular de los osciladores libres, en los que la frecuencia viene determinada por la dimensión de las líneas anódica y catódica. La adaptación de impedancia se efectúa por variación del coeficiente de inducción mutua entre las líneas anódicas y las de salida y por tanto instantáneamente, al no existir servomecanismos de compensación.

La frecuencia es un parámetro importante del generador que ha sufrido modificaciones a lo largo del desarrollo seguido por los plasmas aplicados a los espectros, copia de sus comienzos en los años 60.

En un principio se utilizaron frecuencia entre 1 y 8 megahertz para ir incrementando hasta 27, 42 ; 40 y 56 Mhz, que se emplean actualmente observándose una configuración más toroidal del plasma por encima de los 25 Mhz, lo que se traduce en una mayor facilidad para que las partículas del aerosol penetren en el plasma, frente a la “barrera” que opone al paso de dichas partículas el fuerte gradiente térmico frente al inyector en los plasmas de frecuencia inferior.

Algunos investigadores (Mermet-Robin) han venido estudiando la influencia de la frecuencia en las características espectrales de los plasmas ICP, llegando a la conclusión de

que el incremento de la frecuencia lleva aparejada una disminución de la temperatura de excitación y de la densidad electrónica y por tanto de la intensidad de las líneas analíticas,. No obstante se produce un sustancial incremento de la relación señal/ruido de fondo lo que permite afirmar que la tendencia al incremento de la frecuencia, está justificada desde el punto de vista analítico.

La potencia es un parámetro del generador que está ligado al tipo y configuración de la antorcha y que por tanto debe ser adaptado a las características específicas de cada equipo. Baste señalar que una potencia inferior a 1500 vatios es suficiente para el análisis de trazas en medios poco cargados, requiriendo potencias superiores (2 KW) las muestras de matriz orgánica.

#### *Sistemas de introducción de muestras*

El espectro de emisión se produce introduciendo la muestra en el seno del plasma en cualquiera de los estados de la materia (sólido, líquido, gas).

Esta afirmación es correcta aunque debe ser matizada, ya que por razones operativas (reproducibilidad, facilidad de disponer de patrones de calibración, homogeneidad, etc.) el método más difundido de introducción de la muestra es en forma de solución líquida a través de la nebulización.

La nebulización tiene por misión formar un aerosol húmedo, finamente dividido, con un tamaño de partícula homogéneo y lo más reducido posible a fin de facilitar el tránsito de la muestra en el seno del plasma y conseguir una excitación homogénea y reproducible. Este objetivo se alcanza mediante la combinación de dos elementos : nebulizador y cámara de nebulización.

El nebulizador transforma la solución líquida de la muestra en un aerosol húmedo. Esta operación tiene lugar, generalmente mediante un sistema neumático que por efecto Venturi aspira la solución a través de un capilar pulverizándola con el impacto de un chorro de gas a presión. Según la disposición física del capilar, a través del que fluye la muestra en relación con el aporte del gas, se dividen en nebulizadores concéntricos y de flujo cruzado (cross flow).

La necesidad de utilizar capilares en este tipo de nebulizadores es causa de su principal desventaja al producirse obstrucciones por depósito de sólidos en las puntas de los capilares.

Para tratar de evitar este inconveniente, se han desarrollado los nebulizadores de alta presión, en los que la elevada presión arrastra materialmente los residuos sólidos que pudieran depositarse y el nebulizador Babington en el que el líquido discurre libremente por el fondo de un diedro inclinado en el que se ha practicado un orificio por el que fluye el gas produciendo la nebulización.

El denominador común de todos estos nebulizadores es su escaso rendimiento ya que su eficacia es inferior al 10% por lo que se han estudiado y aplicado otros sistemas que permitan una mayor eficacia, como el nebulizador ultrasónico en el que la disgregación del líquido se obtiene por el efecto de los ultrasonidos generados en un cristal piezoeléctrico sobre el que se deposita la muestra en solución.

Otros sistemas de introducción de muestras al plasma se están ensayando a fin de evitar los inconvenientes de la puesta en solución de las muestras sólidas, intentando la atomización directa mediante distintos métodos :

- a) Vaporización electrotérmica en la que, la muestra depositada en una cápsula de grafito es calentada por una corriente eléctrica hasta producir su vaporización, siendo arrastrado este vapor hasta el plasma por una corriente de argón.
- b) Vaporización por descarga de arco eléctrico sobre la muestra y posterior arrastre al plasma.
- c) Vaporización térmica directa, en la que la muestra depositada en una cápsula de grafito se introduce directamente en la zona caliente del plasma para producir la atomización
- d) Todos estos métodos de introducción de la muestra en fase experimentación y aunque se han obtenido resultados muy prometedores, aún no tienen una difusión masiva debido a los inconvenientes mencionados anteriormente.

Mención aparte merece el método de introducción de muestras gaseosa por generación de hidruros volátiles obtenidos por reacción de borohidruro sódico en medio clorhídrico sobre

la muestra aunque solo es aplicable a aquellos elementos susceptibles de generar hidruros (As-Bi-Ge-Sb-Se-Te-Hg).

#### *Las cámaras de nebulización*

Las cámara de nebulización tiene por misión separar del aerosol formado las gotas de mayor tamaño, a fin de uniformar el aporte de muestra al plasma. Se utilizan dos sistemas claramente diferenciados :

- Bola de impacto
- Decantación

#### *Sistemas de gases :*

Va a permitir disponer de un control de presión y caudal sobre el gas utilizado en la generación del plasma, en la refrigeración de las paredes de la antorcha y en el aporte de la muestra en los sistemas de nebulización mediante circuitos independientes.

Recientemente están empezando a utilizar los controles de masa (mass flow) ya que permiten un control más preciso y estable al no estar afectados por las variaciones de temperatura.

El flujo de argón requerido para un sistema de espectroscopia de plasma ICP es de 12-14 litros/minuto.

Se utiliza argón como plasmógeno debido a que, como veíamos anteriormente, su potencial de ionización (15,7 eV) permite disponer de una energía suficiente para excitar prácticamente todos los elementos en sus líneas más sensibles. No obstante se están efectuando pruebas con otros gases (incluso mezclas) para aplicaciones especiales como análisis de halógenos.

#### *Sistema óptico :*

Los átomos de la muestra absorben energía en el plasma pasando a un estado excitado desde el que vuelven a su estado fundamental, liberando dicha energía en forma de radiaciones electromagnéticas, características de cada elemento presente. Por tanto tendremos desde el plasma, una radiación luminosa policromática representativa de todos los elementos de la muestra.

Para identificar y medir la presencia de estos elementos en la muestra necesitamos un sistema que separe cada una de las radiaciones monocromáticas que constituyen el haz policromático ; esto se consigue mediante el sistema óptico.

Los elementos fundamentales de los sistemas ópticos utilizados en espectroscopia son : la ventana o rendija de entrada, a través de la cual se introduce la radiación policromática al sistema, el elemento dispersivo que separa las radiaciones monocromáticas en función de su longitud de onda, y la rendija secundaria, a través de la cual se conducen al detector las radiaciones monocromáticas.

El elemento dispersivo es el más importante del sistema óptico y está constituido generalmente por una red de difracción.

La red de difracción , en teoría, comprende un gran número de rendijas muy finas, paralelas, equidistantes y localizadas en un mismo plano.

En la práctica, estas rendijas están reemplazadas por unos surcos paralelos grabados sobre una superficie reflectante.

Las leyes físicas aplicables al funcionamiento de una red de difracción se recogen en la llamada ecuación de la red :

$$d (\text{sen } \alpha + \text{sen } \beta ) = K\lambda$$

donde :

$d$  : distancia entre dos surcos adyacentes

$\alpha$  : ángulo del haz incidente

$\beta$  : ángulo del haz difractado

$k$  : orden de difracción

$\lambda$  : longitud de onda

Puesto que el orden de difracción es constante, así como la distancia entre surcos, tendremos que para un ángulo dado de incidencia del haz policromático existirá un haz monocromático difractado para cada longitud de onda.

$$\beta = f(\lambda)$$

El número de surcos y el área rayada vemos que juegan un papel preponderante en las características de la red, pero su incremento presenta limitaciones prácticas.

Se utilizan comúnmente dos tipos de red de difracción en espectroscopia, con distinto proceso de fabricación.

- La red grabada, en la que los surcos se graban a punta de diamante en máquinas especiales. Teniendo en cuenta que el número de surcos por milímetro utilizados en espectroscopia es de 1200-2400 y que el tamaño de las redes es de 60-80 mm., obtendremos un número de líneas que requiere muchos días para su grabado sobre una red con lo que su uniformidad no es muy grande y su proceso muy costoso utilizándose réplicas con eficacias reducidas.
- Las redes holográficas en las que los surcos se graban por un procedimiento fotoquímico sobre las franjas de interferencia producidas por 2 haces de láser incidentes sobre la superficie de la red. Al ser el procedimiento prácticamente instantáneo se pueden conseguir uniformidades muy elevadas a la vez que su menor costo permite la utilización de originales. Esto ha permitido utilizar en espectrometros comerciales redes de difracción de 3600 surcos por milímetro con longitudes de 140 milímetros.

La disposición de los elementos del sistema óptico va a dar lugar a los “montajes” característicos : EBERT, ZERNY, TURNER, PASCHEN-RUNGE, LITROW, etc. que cada fabricante escoge en función de criterios de fabricación.

Los instrumentos utilizados en espectroscopia de emisión son de dos tipos desde el punto de vista óptico.

- monocromador : 1 rendija de entrada, 1 rendija de salida y red de difracción móvil (determinación secuencial de elementos)
- Policromador : 1 rendija de entrada, varias rendijas de salida (hasta 60 - 80), red de difracción fija (determinación simultánea)

El monocromador, al utilizar 1 rendija de entrada y una de salida debe disponer de un dispositivo mecánico que permita girar la red (variación del ángulo  $\alpha$ ) para que los diferentes haces monocromáticos que configuran la composición de una muestra, vienen

determinadas por las características de la red ( número de líneas grabadas, superficie rayada, ángulo de máxima eficiencia) y las características del montaje (distancia focal, dispersión recíproca expresada en Amstrong/milímetro, amplitud de la rendija de salida y paso mínimo aplicado al giro de la red.

Los parámetros más importantes de una red de difracción serán :

- Su capacidad para difractar el haz policromático conservando la máxima energía en los haces monocromáticos: "eficiencia".
- Su capacidad para separar haces monocromáticos muy próximos: "resolución"
- Su número de surcos por unidad de longitud: "rayado".
- Su superficie cubierta por los surcos: "área rayada".

La eficiencia no es idéntica a lo largo de todo el espectro de longitudes de onda, sino que presenta un máximo en un punto del espectro que es variable en función del ángulo que forman las paredes del surco, este valor de máxima eficiencia se denomina "Blaze" ó ángulo de "Blaze" y se elegirá en función de la zona del espectro de longitudes de onda que nos interese estudiar.

La resolución teórica de la red se expresa mediante la fórmula:

$$R \propto K \cdot n \cdot l.$$

donde :

K; número de orden espectral

n: número de surcos por milímetro

l: longitud de la zona rayada en milímetros

Lógicamente cuanto mayores sean n y l mayor será el poder de resolución de la red.

En general este tipo de instrumentos presenta mejor poder de resolución y mayor flexibilidad al no tener limitaciones en el número de elementos a analizar y estar igualmente capacitado para el análisis cualitativo y cuantitativo.

El Policromador dispone de una red de difracción fija con lo que los diferentes haces monocromáticos se recogen sobre sendas rendijas secundarias dispuestas a lo largo de la curva focal a distintos ángulos correspondientes a los de difracción de cada haz.

Su característica principal es el carácter de simultaneidad en la recepción de los haces monocromáticos y por tanto en el análisis de los elementos presentes en la muestra.

Su principal desventaja radica en el carácter fijo del programa analítico por lo que su aplicación más usual es el análisis de rutina.

Las presentaciones del Policromador vienen definidas principalmente por la red de difracción, pudiendo incluso montarse dos redes de difracción de manera que cubren con el máximo de eficacia una zona más amplia del espectro.

Tanto en el monocromador como en el Policromador, hay un parámetro clave que es la resolución y que agudiza su importancia en la espectroscopia de plasma ICP ya que, por las especiales características de la excitación, los espectros presentan una gran abundancia de líneas cuya separación, para una correcta identificación y cuantificación resulta fundamental.

Para una mejor ilustración de la importancia de este parámetro la figura nos muestra el espectro de un acero 2020 tomado a distintas resoluciones en las que se aprecia la imposibilidad de efectuar medidas del molibdeno con una resolución de 0,3Å debido a la fuerte interferencia del hierro y como el problema va resolviéndose a medida que aumentan la resolución.

Para mejorar esta resolución algunos fabricantes han recurrido a la utilización de los sistemas ópticos equipados con red de difracción “chelle” y un predispersor, que permiten alcanzar resoluciones equivalentes a las obtenidas con las mejores redes de difracción holográficas aunque con una notable disminución de sensibilidad por pérdida de energía. A este respecto cabe mencionar el trabajo del Prof. Kielkopf del departamento de Física de la Universidad de Luisville (USA) que compara un monocromador equipado con red de difracción holográfica de 3600 líneas/milímetro y uno equipado con red de “chelle” y predispersor, constatando una sensibilidad cinco veces menor es este último.

## El sistema de detección y tratamiento de la señal

La radiación monocromática que sale a través de la rendija secundaria es recogida por un tubo fotomultiplicador que transforma la señal óptica en impulsos eléctricos que son convenientemente amplificados y tratados para su identificación y cuantificación.

La mayoría de los instrumentos disponen de sistemas de proceso de datos que permiten :

- I) Automatizar el conjunto generador de plasma
- II) Automatizar el sistema introductor de la muestra
- III) Automatizar y controlar el sistema óptico
- IV) Efectuar la recogida y tratamiento de espectros
- V) Confeccionar curvas de calibrado
- VI) Calcular las concentraciones de los elementos en la muestra
- VII) Efectuar correcciones del fondo espectral y de solapamiento de líneas
- VIII) Cálculos estadísticos

A pesar de la importancia de este último componente del sistema de espectroscopia de emisión por plasma ICP no nos detendremos en detalles ya que la evolución de los sistemas informáticos es tan rápido que correríamos el riesgo de que lo que aquí hemos presentando como novedad, estuviese superado en el momento de su publicación.

De aquí la importancia del concepto de modularidad en los equipos para que permitan su actualización si las circunstancias lo requieren.

## Aplicaciones

Las peculiares características del sistema de excitación por plasma ICP :

- a) Excitación de las líneas más sensibles para casi todos los elementos
- b) Carácter único de la excitación para todos ellos
- c) Linealidad en un rango de 6 órdenes de magnitud
- d) Mínimos efectos de matriz

- e) Posibilidad de introducción de muestras en diferentes estados
- f) Rango analítico que comprende constituyentes mayoritarios, minoritarios, trazas y ultratrazas.

Hacen de esta técnica una valiosa herramienta universal en manos de los analistas, como lo prueban los miles de trabajos publicados desde su implantación a principios de los años 70, en los más variados campos de aplicación, tanto en la investigación como en el control de calidad.

A título de ejemplo citaremos :

- ◇ Análisis de aceites lubricantes hidráulicos para determinar la contaminación por desgaste de las partes bañadas por el aceite.
- ◇ Análisis de aguas residuales y naturales a efectos de determinar su contaminación y potabilidad
- ◇ Análisis de combustibles para determinar su contenido en elementos contaminantes
- ◇ Análisis de líquidos de proceso (refrigerantes, baños de metalización, etc.) a fin de determinar la bondad del proceso.
- ◇ Análisis de todo tipo de metales para controlar su composición en aleaciones y el grado de impurezas, para su clasificación de acuerdo a normas.
- ◇ Análisis de productos alimenticios (bebidas, conservas, etc.) para controlar el cumplimiento de legislación sanitaria en materia de contenidos máximos admisibles de elementos pesados o tóxicos.
- ◇ Análisis de cementos en proceso y terminados
- ◇ Análisis de materias primas y productos finales en la industria química, petroquímica, farmacéutica, papelera, plásticos, pinturas, etc.
- ◇ Análisis de rocas, sedimentos y materiales geológicos
- ◇ Análisis de minerales para determinación de su riqueza
- ◇ Análisis de suelos agrícolas para determinar sus necesidades fertilizantes
- ◇ Análisis de graveras y canteras para determinar el contenido en elementos que pudieran interaccionar con el cemento en los hormigones.
- ◇ Análisis de líquidos fisiológicos (sangre, orina, sueros, etc.) para estudios de toxicología y prevención - control de enfermedades profesionales.
- ◇ Análisis de plantas y tejidos vegetales para estudio de la absorción de los nutrientes.
- ◇ Análisis de muestras arqueológicas para su clasificación
- ◇ Análisis de materiales cerámicos y “composite”.

Como puede apreciarse, la técnica que nos ocupa ha alcanzado en los 20 años escasos de su existencia una difusión universal en su aplicación debido a sus innumerables ventajas y a pesar de sus inconvenientes.

Llegados a este punto cabe preguntarse: ¿Cuál es el futuro de la espectroscopia de plasma ICP ?

Desde el punto de vista de su difusión, una publicación del sector de la instrumentación analítica del carácter y reconocido prestigio internacional, afirmaba recientemente que en los próximos 10 años el plasma ICP tendría una tasa de crecimiento superior a todas las restantes técnicas analíticas.

Desde el punto de vista de su evolución podríamos hacer una doble distinción :

- a) la evolución de los componentes del sistema
- b) La evolución de su aplicación

En el apartado a podemos diferenciar: La evolución en el plasma, a través de un mejor conocimiento de los mecanismos de excitación y transmisión energética así como la distribución de temperaturas, permitirán optimizar los parámetros de la antorcha, tendiendo a la utilización de antorchas de caudal y potencia reducidas, ya que la mayor parte del caudal de argón aportado , no tiene más misión que refrigerar las paredes de la antorcha. A este respecto cabe reseñar los trabajos de Leo de Galán, Mermet, Fassel, utilizando materiales cerámicos, refrigeración por aire, por agua, reduciendo los diámetros de los tubos de antorcha, etc.

La reducción de los caudales y las antorchas, permitirán a su vez disminuir la potencia y el tamaño de los generadores de radiofrecuencia, utilizando componentes integrados.

En la óptica hay dos tendencias que se están desarrollando simultáneamente :

- a) La búsqueda de sistema de muy alta resolución y velocidad para el análisis de matrices complejas, mediante mejoras en las redes de difracción
- b) La fabricación de un sistema compacto de media resolución optimizado para emisión, que permita abaratar el instrumento para hacerlo más competitivo con otras técnicas alternativas (principalmente absorción atómica).

En la detección de las señales se están ensayando sistemas alternativos al ya “clásico” fotomultiplicador, mediante el uso de fotodiodos (aislados o en mosaico), y analizadores multicanales ópticos.

En el capítulo de la introducción de muestras, es previsible una profunda modificación en los nebulizadores actuales para conseguir mejorar la eficacia, aunque los mayores avances se esperan en los sistemas de introducción de muestras sólidas directamente, a fin de eliminar los procesos de puesta en solución a veces lentos y laboriosos y siempre fuentes de contaminación de la muestra.

En el área del tratamiento de datos, la evolución es continua y las predicciones aventuradas.

En el apartado relativo al futuro de las aplicaciones del plasma ICP, debemos mencionar la aplicación del plasma ICP como fuente de iones para la espectrometría de masas, lo que permitirá reducir aún más los límites de detección, así como acometer el análisis de isótopos y resolver algunos problemas de interferencias en emisión dadas las mejores características de selectividad de la espectrometría de masas.

Otra aplicación de la espectrometría de plasma ICP es su uso como detector en cromatografía líquida y gaseosa.

También se ha aplicado el plasma UCP como fuente para la fluorescencia atómica, así como substitutivo de la lámpara en absorción atómica para obtener una fuente de emisión multielemental y también como zona de confinamiento de átomos en estado fundamental en sustitución de la llama en absorción atómica.

Como conclusión cabría preguntarse si al encender el plasma ICP habremos encendido la llama del futuro. El tiempo y los analistas nos darán la respuesta.<sup>22</sup>