

**CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**DETERMINACIÓN DEL MECANISMO DE AGRIETAMIENTO  
EN LA UNIÓN DE ACERO ESTRUCTURAL Y ACERO FORJADO  
MEDIANTE GMAW**

**POR**

**RUBÉN SÁNCHEZ SÁNCHEZ**

**MONOGRAFÍA**

**EN OPCIÓN COMO ESPECIALISTA EN TECNOLOGÍA  
DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL**

**SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO 19 DE DICIEMBRE DEL 2009**

**Corporación Mexicana de Investigación en Materiales**  
**Gerencia de Desarrollo Humano**  
**División de Estudios de Postgrado**

Los miembros del Comité Tutorial recomendamos que la Monografía  
**“DETERMINACIÓN DEL MECANISMO DE AGRIETAMIENTO EN LA UNIÓN  
DE ACERO ESTRUCTURAL Y ACERO FORJADO MEDIANTE GMAW”**  
realizada por el alumno **RUBÉN SÀNCHEZ SÀNCHEZ**, con número de  
matrícula 08ES-079 sea aceptada para su defensa como Especialista en  
Tecnología de la Soldadura Industrial.

El Comité Tutorial

**Dr. Jorge Leobardo Acevedo Dávila**  
Tutor Académico

**Ing. Francisco García Culebro**  
Tutor en Planta

**M.C. Mario Francisco Trejo Aguirre**  
Asesor

Vc.Bo.

**MC. Claudia A. González Rodríguez**  
Coordinador de Posgrado

**Corporación Mexicana de Investigación en Materiales**  
**Gerencia de Desarrollo Humano**  
**División de Estudios de Postgrado**

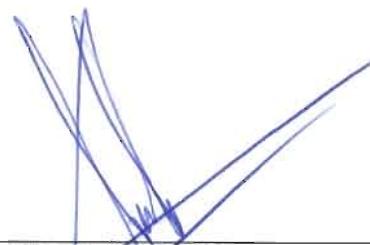
Los abajo firmantes, miembros del Jurado del Examen de especialización del alumno **RUBÈN SÁNCHEZ SÁNCHEZ**, una vez leída y revisada la Monografía titulada "**DETERMINACIÓN DEL MECANISMO DE AGRIETAMIENTO EN LA UNIÓN DE ACERO ESTRUCTURAL Y ACERO FORJADO MEDIANTE GMAW**", aceptamos que la referida monografía revisada y corregida, sea presentada por el alumno para aspirar al grado de Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial durante la defensa de la monografía correspondiente.

Y para que así conste firmamos la presente a los 19 días del mes de Diciembre del año 2009.



---

**MC. Jesús Ventura Valdés Flores**  
Presidente



---

**MC. Gabriel García Cerecero**  
Secretario



---

**Dr. Jorge Leobardo Acevedo Dávila**  
Vocal

# DEDICATORIA

A Dios por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte para lograr otra meta más en mi vida.

A mi esposa Erika Patricia Galván Villareal, a mis hijos Rubén Sánchez Galván y Héctor Sánchez Galván por apoyarme en todo momento y la motivación constante para salir adelante además de su valioso tiempo.

A mi compañero MC. Manuel Eduardo Valenzuela Hipólito, ya que confió en mí para este proyecto y que siempre me ha apoyado en mi desarrollo profesional.

A mis asesores Dr. Jorge Leobardo Acevedo Dávila, MC. Gabriel García Cerecero, Ing. Francisco García Culebro, Ing. María Eugenia Herrera López, que participaron en mi desarrollo profesional durante mi maestría.

Así también a todo el personal de COMIMSA, tanto de posgrado, como de laboratorios, administración, biblioteca, recepción, que me han apoyado sin ponerme ningún impedimento.

A todos Gracias

# ÍNDICE

	Página
Síntesis	1
1 Introducción	2
1.1 Objetivo	5
1.2 Objetivo específico	5
1.3 Justificación	6
1.4 Beneficios del proyecto	6
1.5 Alcance del proyecto	6
2 Estado del arte	7
2.1 Acero estructural y acero forjado	7
2.2 Soldadura de arco eléctrico con protección de gas	11
2.2.1 Principios y fundamentos	11
2.2.2 Equipo empleado para la aplicación del proceso GMAW	12
2.2.3 Ventajas y limitaciones	13
2.2.3.1 Ventajas	13
2.2.3.2 Limitaciones	13
2.3 Tratamiento térmicos de uniones de acero estructural y acero forjado	13
2.3.1 Precalentamiento y postcalentamiento	13
2.3.2 Precalentamiento	15
2.3.3 Método Seferian	20
2.3.4 Postcalentamiento	21
2.4 Agrietamiento en los procesos de soldadura GMAW	22
2.4.1 Agrietamiento central	24
2.4.1.1 Agrietamiento central inducido por segregación	25
2.4.1.2 Agrietamiento central inducido en la forma del cordón	27
2.4.1.3 Agrietamiento central por la forma de la superficie	28
2.4.2 Agrietamiento en la zona afectada por el calor	29
2.4.3 Agrietamiento transversal	34

<b>3</b>	<b>Caso de estudio</b>	<b>37</b>
<b>3.1</b>	<b>Antecedentes</b>	<b>37</b>
<b>3.2</b>	<b>Material base</b>	<b>37</b>
<b>3.3</b>	<b>Material de aporte</b>	<b>41</b>
<b>3.4</b>	<b>Metodología de unión</b>	<b>41</b>
<b>3.5</b>	<b>Análisis del caso</b>	<b>42</b>
<b>4</b>	<b>Discusión y conclusiones</b>	<b>45</b>
	<b>Bibliografía.</b>	<b>46</b>
	<b>Lista de figuras</b>	<b>48</b>
	<b>Lista de tablas</b>	<b>49</b>

## SÍNTESIS

En la empresa Equipos de Acuña uno de las prioridades que imperan es el desarrollo de productos con la más alta calidad posible; lo anterior, con el objetivo de minimizar las posibilidades de falla durante el ciclo de vida del componente para lo cual fue diseñado.

En este contexto, el presente trabajo monográfico se centra en desarrollar y entender las principales variables esenciales del proceso GMAW, las condiciones de operación de la máquina y el efecto que tiene su variación sobre la calidad de la soldadura, apariencia y propiedades mecánicas en los cordones aplicados para la fabricación de los *Augers* con partes de rodamientos en acero de alto desempeño conocido como Astrolloy o Lescaloy 52100 Vac Arc (Split bushing) y GS20Mn5 (Drive male), así como las condiciones de aplicación de precalentamiento y postcalentamiento las soldaduras aplicadas

Finalmente, resultado del presente desarrollo se concluyó que el proceso GMAW es viable para la unión de aceros de media y alta resistencia, entre otros aspectos por el bajo costo por consumibles y equipo. Dado su aporte calórico y afectación térmica es uno de los que requieren mayor control para evitar transformaciones de fases y zonas de alta resistencia en las uniones, evitando la generación de grietas, tanto en caliente como en frío.

# CAPÍTULO 1

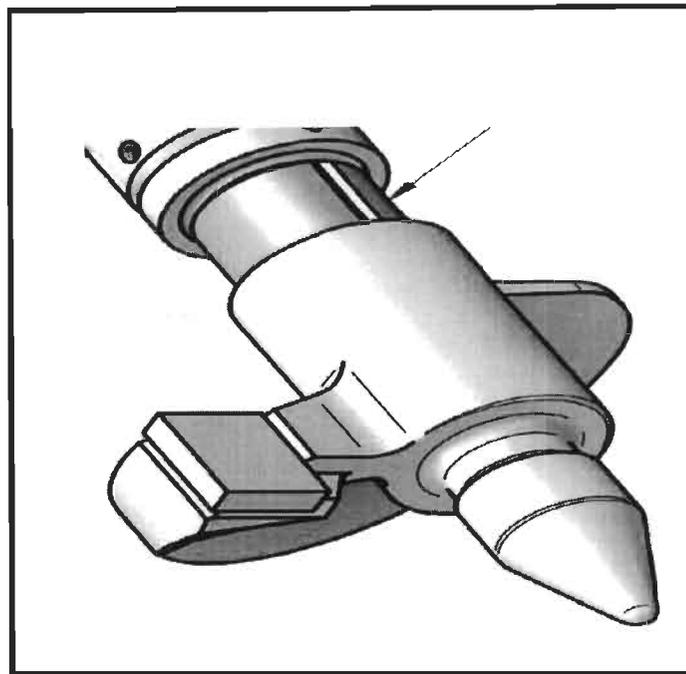
## Introducción

A lo largo de los años la soldadura por arco eléctrico se ha mantenido como uno de los procesos más utilizados en la unión de materiales metálicos, debido en gran parte, a la alta demanda que se tiene en las industrias que se encuentran involucradas en los procesos de manufactura como lo es el caso de la industria del acero. Es así que el costo en los procesos de unión juega un papel importante en la toma de decisiones para la producción.

Existen diferentes variables que afectan el costo total en la fabricación de un componente y en la selección de procesos de soldadura, si se considera en primer lugar como proceso controlado y con buena calidad en los productos fabricados, se encontrarán costos del equipo, de mano de obra, material, energía eléctrica, por mencionar algunos. Contemplando un escenario de este nivel, la competencia entre las industrias se observa en la actualidad muy marcada. Lo cual deja de manera clara, que en la industria existe una carencia en cuanto al control de los procesos de soldadura y por lo tanto, una notable falta de calidad en sus productos, quedando así completamente fuera del mercado, tomando en cuenta que en la industria existe un vertiginoso cambio hacia la fabricación de mejores productos a un menor costo.

Es necesario tomar en cuenta muchas situaciones, por lo cual surge la demanda de enfocar esfuerzos para controlar los procesos de soldadura que afectan la competitividad del producto en el mercado cambiante. Uno de los puntos que se tratará en el presente trabajo es la problemática del agrietamiento en soldadura por el proceso GMAW en uniones simple en "V" en aceros estructurales y forjados.

La soldadura de arco metálico con protección de gas (GMAW, por sus siglas en inglés) o metal con gas inerte (MIG) es uno de los procesos más utilizados en la industria donde el tiempo y la calidad en la soldadura son de suma importancia, aunado a la habilidad del operador, la cual es una variable fundamental que puede ser alcanzada con práctica y capacitación. Este proceso es utilizado en la empresa Equipos de Acuña para la fabricación de estructuras metálicas en forma de espiral para la extracción de materiales como el carbón mineral llamada Augers. Figura 1.1



**Figura 1.1** Pieza metálica en forma de espiral

El control de calidad durante el proceso de fabricación de los Augers es vital para la entrega de un producto libre de discontinuidades y así poder garantizar la mínima posibilidad de falla durante el ciclo de vida del componente para lo cual fue diseñado. De acuerdo a los lotes de piezas inspeccionadas de manera física en la empresa Equipos de Acuña, el principal defecto corresponde a grietas en la unión y extremos donde se sueldan dos piezas que llevan por nombre *Split bushing* sobre la pieza llamada *Drive male*, de la cual no se cuenta con información que sustente dicho comportamiento.

Por lo anterior, el presente trabajo de investigación se centra en realizar un análisis de las principales variables esenciales del proceso GMAW, las condiciones de operación de la máquina y el efecto que tiene su variación sobre la calidad de la soldadura, apariencia y propiedades mecánicas en los cordones aplicados para la fabricación de los *Augers* con partes de rodamientos en acero de alto desempeño conocido como Astrolloy o Lescaloy 52100 Vac Arc (Split bushing) y GS20Mn5 (Drive male), así como las condiciones de aplicación de precalentamiento y postcalentamiento las soldaduras aplicadas.

## **1.1 Objetivo general**

Desarrollar la situación tecnológica de la soldadura de componentes de acero estructural y acero forjado por el proceso GMAW y la influencia que presenta los tratamientos térmicos sobre la unión.

## **1.2 Objetivos específicos**

- Desarrollar el tema de procesos GMAW y las variables involucradas en uniones de aceros estructural y forjado.
- Determinar la situación tecnológica que guardan los tratamientos térmicos aplicados en las uniones de los aceros estructurales y forjado por el proceso GMAW.
- Entender los mecanismos que generan las grietas durante la aplicación del proceso GMAW en la unión de acero estructural y forjado.

### **1.3 Justificación**

Hoy en día, no se cuestiona el hecho que dadas las restrictivas condiciones económicas en las cuales debe desenvolverse toda actividad, es imprescindible minimizar costos de operación y maximizar el rendimiento de la maquinaria, por tal motivo, el presente trabajo se enfoca en determinar las causas que permitan incrementar la vida útil de las uniones de los componentes *split bushing* y *drive male*.

### **1.4 Beneficios del proyecto**

Mediante el desarrollo del presente trabajo se pretende generar conocimiento técnico-científico que permita entender las causas de la generación de grietas en componentes de acero estructural y aceros forjados unidos por el proceso GMAW

### **1.5 Alcances del proyecto.**

El alcance de este trabajo es realizar una recopilación de información y análisis del estado del arte en la temática del proceso de soldadura GMAW y la unión de aceros estructurales y aceros forjados los cuales se derivan en la generación de discontinuidades y grietas.

# CAPÍTULO 2

## Estado del arte

Derivado de la problemática planteada en el presente trabajo, que lleve a entender los mecanismos de agrietamiento generados en la unión de aceros estructurales y forjados por el proceso GMAW, a continuación se presenta el desarrollo de los siguientes temas: 1) Aceros estructurales y acero forjado, en este punto se desarrolla las características y soldabilidad de dichos materiales; en el punto siguiente se lleva a cabo el desarrollo del 2) Proceso de soldadura de arco eléctrico con protección de gas, considerando los principios del proceso y fundamentos, así como las ventajas y limitantes; para el siguiente apartado se contempla, el punto relacionado a los 3) Tratamientos térmicos aplicados en la unión de aceros estructurales y forjado por el proceso GMAW, finalmente, se desarrolla el tema, 4) Agrietamientos generados durante o después de la aplicación del proceso de soldadura GMAW

### **2.1 Acero estructural y acero forjado**

Se define como acero estructural al producto de la aleación de hierro, carbono y pequeñas cantidades de otros elementos tales como silicio, fósforo, azufre y oxígeno, que le aportan características específicas. El acero laminado en caliente, fabricado con fines estructurales, se denomina como acero estructural al carbono, con límite de fluencia de 250 megapascales. De esta forma, se puede establecer la siguiente división de los aceros empleados en estructuras:

- Aceros al Carbono
- Aceros de alta resistencia y baja aleación.

Clasificación del acero estructural o de refuerzo:

El acero estructural, según su forma, se clasifica en:

- a. Perfiles estructurales: Los perfiles estructurales son piezas de acero laminado cuya sección transversal puede ser en forma de I, H, T, canal o ángulo.
- b. Barras: Las barras de acero estructural son piezas de acero laminado, cuya sección transversal puede ser circular, hexagonal o cuadrada en todos los tamaños.
- c. Planchas: Las planchas de acero estructural son productos planos de acero laminado en caliente con anchos de 203 mm y 219 mm, y espesores mayores de 5,8 mm y mayores de 4,5 mm, respectivamente.

Entre los materiales de construcción, el acero tiene una posición relevante; combina la resistencia mecánica, su capacidad de ser trabajado, disponibilidad y su bajo costo. Siendo así, es fácil comprender la importancia y el amplio uso de los aceros en todos los campos de la ingeniería, en las estructuras, sean éstas fijas, como los edificios, puentes, etc. o sean móviles, en la industria ferroviaria, automotriz, naval, aeronáutica, etc.

Los aceros al carbono comunes, simplemente laminados y sin ningún tratamiento térmico, son plenamente satisfactorios y constituyen un porcentaje considerable dentro de los aceros estructurales.

En otras aplicaciones, se exige una relación resistencia/peso más satisfactoria. es el caso de la industria del transporte, en donde el equipo utilizado – camiones, autobuses, equipo ferroviario, naval, etc.- debido a las condiciones propias del servicio, debe caracterizarse por un peso relativamente bajo y una alta resistencia. Esta condición es fundamental ya que estas estructuras están

sujetas a esfuerzos e impactos severos, además de una resistencia a la corrosión adecuada.

Para todas estas aplicaciones, los aceros indicados son los de baja aleación, como los "alta resistencia y baja aleación". De esta forma, se puede establecer la siguiente división de los aceros empleados en estructuras:

- Aceros al Carbono
- Aceros de alta resistencia y baja aleación

#### Aceros al carbono

Los requisitos fundamentales que deben cumplir estos aceros, son los siguientes:

- Ductilidad.
- Valor elevado de la relación resistencia mecánica/límite de fluencia.
- Soldabilidad.
- Apto para ser cortado por llama, sin endurecimiento.
- Resistencia a la corrosión, razonable.

Con excepción de la resistencia a la corrosión, todos los otros requisitos son satisfechos en mayor o menos grado, por los aceros al carbono de bajo a medio carbono, que son obtenidos por laminación y cuyos límites de resistencia varían de 40 a 50 Kg<sub>f</sub>/mm<sup>2</sup> y alargamientos que están en torno al 20%.

De hecho, un contenido relativamente bajo de carbono y el trabajado en caliente de laminación de los perfiles estructurales, garantizan la ductilidad necesaria, en todo el producto. La ductilidad de estos aceros garantiza una excelente trabajabilidad en operaciones como el corte, doblado, perforado, etc., sin que se originen fisuras u otros defectos.

La soldabilidad por otra parte, es otra característica muy importante en este tipo de material de construcción, ya que la soldadura de los elementos y piezas en una estructura, es práctica común. Los aceros al carbono comunes también satisfacen este requisito, pues deben ser soldados sin alterar su microestructura. Del mismo modo, el corte por llama, muy empleado en piezas estructurales, poco afecta a estos aceros, desde el punto de vista de sus alteraciones microestructurales en las proximidades de la zona de corte.

Finalmente, la resistencia a la corrosión sólo es alcanzada por la adición de pequeñas cantidades de cobre, elemento que adicionado en cantidades muy bajas (0,25%) mejora esta propiedad, en dos veces, en relación al mismo acero sin cobre.

Para la mayoría de las aplicaciones estructurales, la cantidad de carbono de estos aceros varía entre 0,15% a 0,40%, con otros elementos (Mn, Si, P y S) en cantidades consideradas normales. Un acero con carbono y manganeso de un 0,20% y 0,50% respectivamente, presenta un límite de fluencia de 25 Kg/mm<sup>2</sup> y una resistencia mecánica de 42 Kg/mm<sup>2</sup>.

Un aumento del contenido de carbono eleva estos límites, actuando en el mismo sentido pero en menor grado, del aumento de contenido de manganeso.

En las estructuras, los perfiles de acero al carbono utilizados son los más diversos, sobresaliendo los siguientes: barras redondas, cuadradas, hexagonales, planas, ángulos, canales, perfiles doble T, etc. Todos estos productos son laminados en caliente y empleados en ese estado, sin otro tratamiento térmico o mecánico posterior.

## 2.2 Soldadura de arco eléctrico con protección de gas

### 2.2.1 Principios y fundamentos

El proceso de soldadura de arco eléctrico con protección de gas es un proceso que se establece entre un electrodo metálico continuo de aporte y el charco de soldadura del metal base. La protección se obtiene por completo de un gas suministrado externamente y no se aplica a presión [1].

Este proceso también es conocido como MIG (Metal Inert Gas), MAG (Metal Active Gas), dependiendo de si emplean gases inertes o activos, micro alambre, entre otras designaciones Figura 2.1.

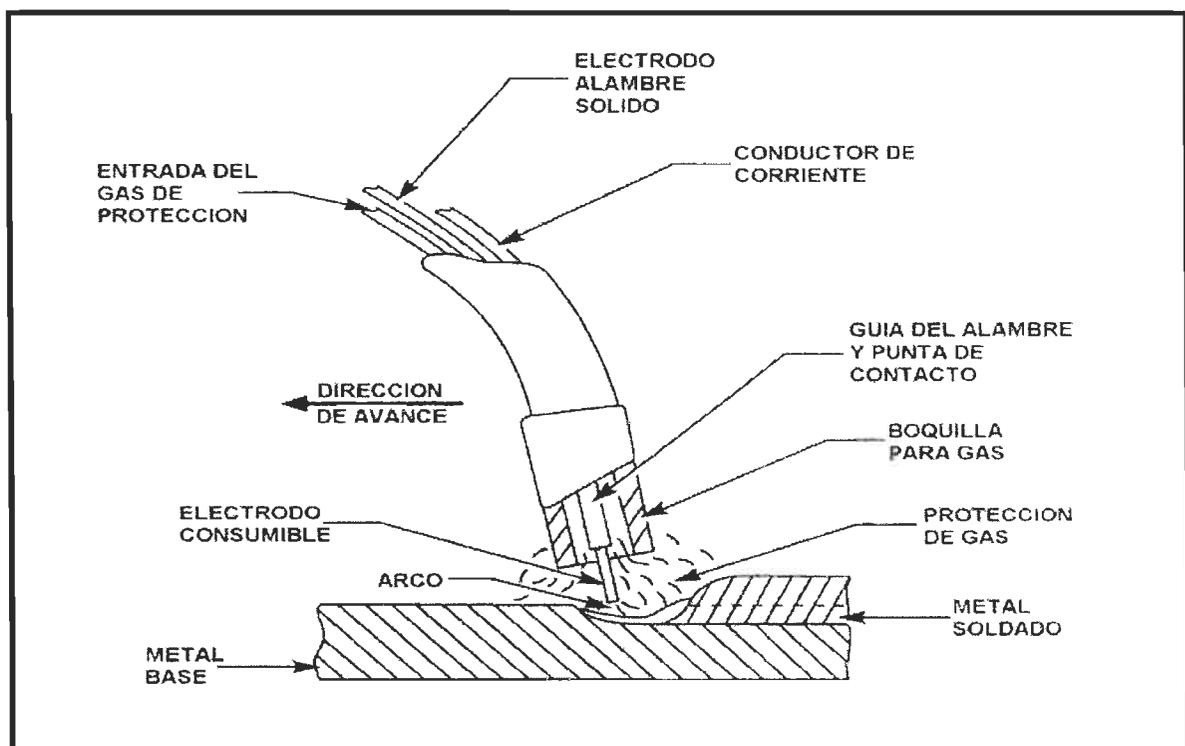


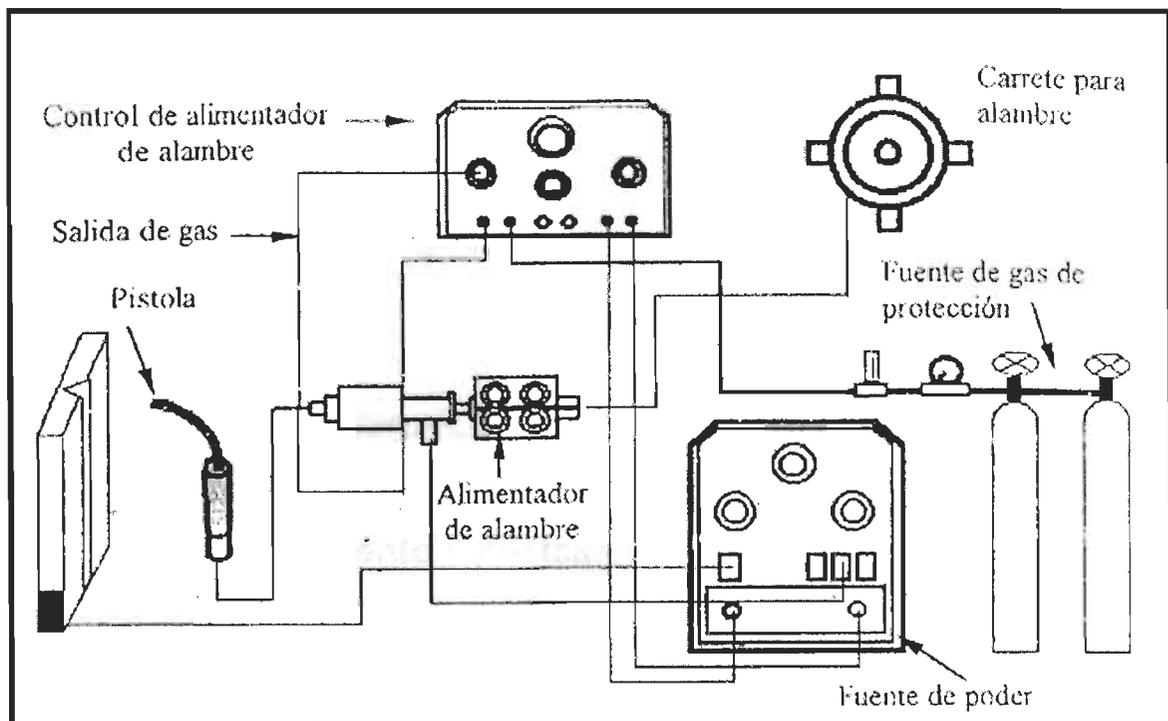
Figura 2.1 Esquema del proceso GMAW [2].

En el proceso GMAW se emplea un alambre continuo, sólido y desnudo que tiene la función de servir como electrodo y como metal de aporte y, al no existir revestimientos como en el caso de los procesos soldadura de arco manual o núcleo de fundente (SMAW y FCAW por sus siglas en inglés respectivamente), ni fundente adicionado externamente como el proceso de arco sumergido (SAW

por sus siglas en inglés) no se forma una capa de escoria, sino una película vítrea [1]. El metal depositado y los aleantes son suministrados completamente por el metal de aporte y al no haber agentes limpiadores ni fundentes, se requieren cuidados y limpieza adecuados para obtener soldaduras libres de poros y otras discontinuidades [1]. Los controles manuales que el soldador requiere para la operación semiautomática son los de velocidad de avance, velocidad del electrodo, voltaje, amperaje, diámetro del electrodo posición oscilación y dirección del desplazamiento, así como también el posicionamiento de la pistola [3].

### 2.2.2 Equipo empleado para la aplicación del proceso GMAW

El equipo básico empleado en este proceso consiste en una fuente de energía de voltaje constante, una unidad de alimentación de alambre, gas de protección y una antorcha o pistola. La Figura 2.2 ilustra de manera esquemática el equipo típico que se emplea en el proceso GMAW [1].



**Figura 2.2** Equipo para el proceso de soldadura por arco metálico con alambre continuo protegido con gas [1].

### **2.2.3 Ventajas y limitaciones**

Las ventajas combinadas comparadas con los procesos de electrodo recubierto como el SMAW y el FCAW, SAW y GTAW son las siguientes:

#### **2.2.3.1 Ventajas**

- 1) Las operaciones de soldadura pueden hacerse en todas las posiciones mediante el modo de transferencia por rociado.
- 2) No se requiere limpieza adicional de escoria.
- 3) La velocidad de depósito es relativamente elevada.
- 4) Tiempos totales de aplicación de soldadura de aproximadamente la mitad de aquellos obtenidos con electrodo recubierto.
- 5) Alta calidad en las uniones soldadas [1].

#### **2.2.3.2 Limitaciones**

- El equipo de soldadura es más complejo, costoso y menos transportable que el de SMAW.
- Es más difícil de usar en lugares de difícil acceso.
- El arco de soldadura debe protegerse contra corrientes de aire que puedan dispersar el gas protector.
- Niveles relativamente altos de calor radiado e intensidad del arco [3].

## **2.3 Tratamientos térmicos de uniones de acero estructural y acero forjado.**

### **2.3.1 Precalentamiento y postcalentamiento**

La aplicación de calor adicional a una unión antes o después de soldar es una parte indispensables dentro del desarrollo de la aplicación de procesos de soldadura. Elevar la temperatura de la pieza de trabajo, de manera inmediata, antes de realizar una operación de soldadura o corte de una pieza se le llama

precalentamiento. De igual forma, la aplicación de calor adicional a una unión de soldadura después de soldarlo es llamado postcalentamiento [4].

Ambos procesos el precalentamiento y postcalentamiento, pueden ser aplicados de manera localizada en la unión de soldadura o en toda la pieza soldada. Este tipo de tratamientos son utilizadas en procesos de corte y particularmente en operaciones de soldadura, por varias razones existiendo algunas principales como:

- 1.- Prevenir grietas en las zonas afectadas por el calor en aceros con tratamientos térmicos (templados).
- 2.- Incrementar o disminuir la dureza en las uniones de soldadura y mejorar su capacidad en condiciones adversas de servicio, en los cuales se encuentren envueltas condiciones de impacto, carga o bajas temperaturas.
- 3.- Mitigar los efectos del hidrógeno el cual entra por difusión en el metal de soldadura y el metal base en la zona afectada por el calor.
- 4.- Reducir el esfuerzo residual, es decir, la contracción del esfuerzo interno, fase de transformación y reacción a la sujeción a través de dispositivos de proceso.
- 5.- Minimizar la contracción y la distorsión.
- 6.- Producir propiedades particulares en el acero para lo cual el ensamble de soldadura es construido, es decir, adecuar las propiedades al uso.

Por otra parte, los aceros al carbono y aleados son sensibles a los niveles de temperatura fría por debajo de los 200°C en lapsos cortos de tiempo. Así mismo, a no más de un centenar de grados de diferencia en la temperatura del metal base y al inicio de la soldadura en algunos casos puede determinarse si la soldadura será sana o tendrá grietas [4].

Durante varios años la cuestión del precalentamiento estaba resuelto principalmente, en la base de considerar necesario el precalentamiento para

obtener una soldadura sana, pero esto en realidad no sería su único beneficio ya que también ayuda a conservar las propiedades de resistencia al desgaste y a la tensión en el metal base. Con algunas de las nuevas aleaciones metálicas, el precalentamiento puede ser uno de los procesos claves para obtener ciertas propiedades en la junta de soldadura, sin hacer a un lado otras consideraciones térmicas [4].

Por varias razones, entre ellas, mecánica y metalurgia, se deben de poner atención especial a la temperatura inicial del metal base, el cual deberá ser precalentado si existiera la necesidad de tener una temperatura por encima de la temperatura ambiente. La temperatura del metal base durante múltiples depósitos de soldadura, pueden considerarse como interfaces de temperatura, cualquier ciclo térmico o tratamiento aplicado después de la operación de soldadura se considera postratamiento [4].

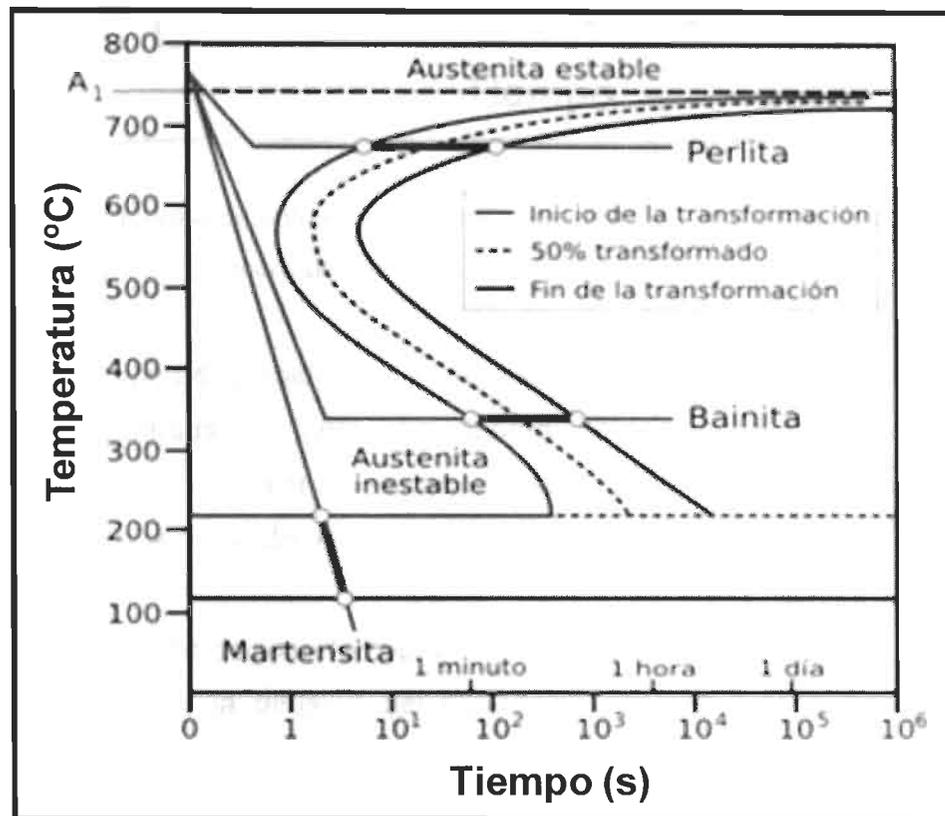
El postratamiento también puede implicar el tratamiento a temperaturas bajo cero junto a altas temperaturas. La metalurgia de la soldadura debe ser particularmente vigilada sobre la cuestión de precalentamiento y el posterior tratamiento de la soldadura [4].

### **2.3.2 Precalentamiento**

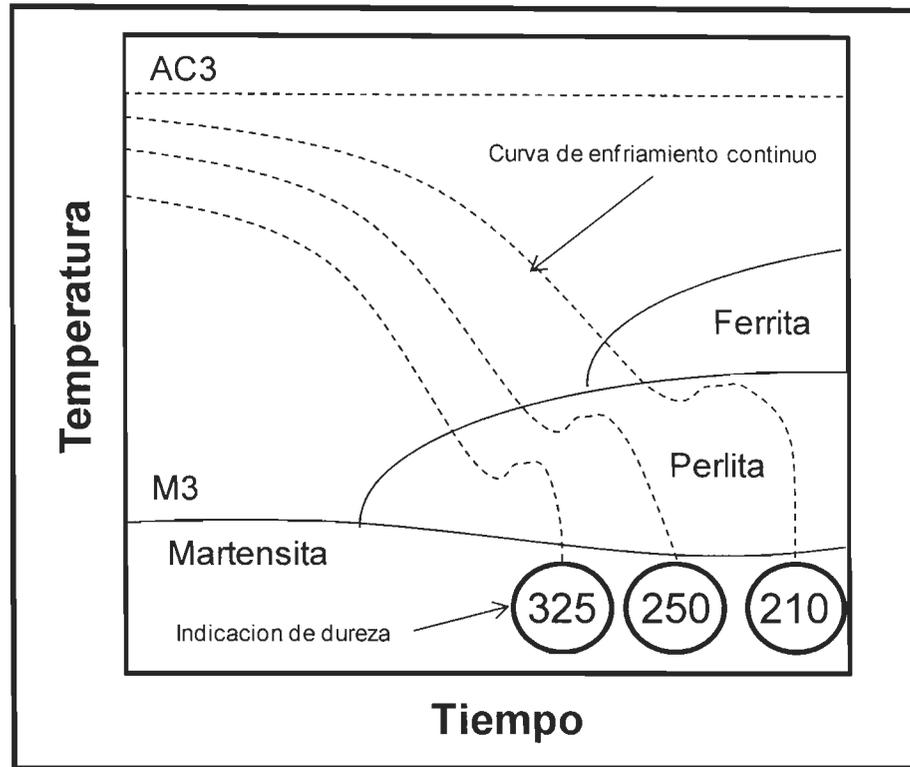
Al aplicar un tratamiento al acero, de manera previa en la soldadura, se podrá reducir el choque térmico que se tenga desde la temperatura de fusión del acero, presentándose un desplazamiento en la curva de enfriamiento hacia la derecha, ver Figura 2.3. De esta manera se favorecerán las transformaciones metalúrgicas a estructuras blandas que resultan menos frágiles y propensas a fisuraciones. Por lo que la función del precalentamiento es disminuir la velocidad de enfriamiento del conjunto soldado [4].

Por otra parte, una herramienta esencial en los precalentamiento de metales son curvas de enfriamiento continuo CCT (Continuos Cooling Transformation),

Figura 2.4, ésta mide la proporción de la transformación de la fase en función del tiempo para una disminución continua de la temperatura [7]. En las técnicas de tratamientos térmicos, las curvas CCT son normalmente utilizadas para analizar las transformaciones en el acero que permitan establecer un camino para relacionar proceso con microestructura y propiedades mecánicas resultantes [5]. Lo que se pretende es alcanzar la temperatura necesaria de manera uniforme en todo lo largo y ancho del material donde se tenga una suficiente área para llevar a cabo la aplicación del proceso de soldadura, el cual deberá de mantenerse entre las diversas pasadas en caso de soldaduras múltiples [6]. Se puede aplicar localmente por resistencia o por flama y su medición se realiza por termopares o lápices termos indicadores [6].



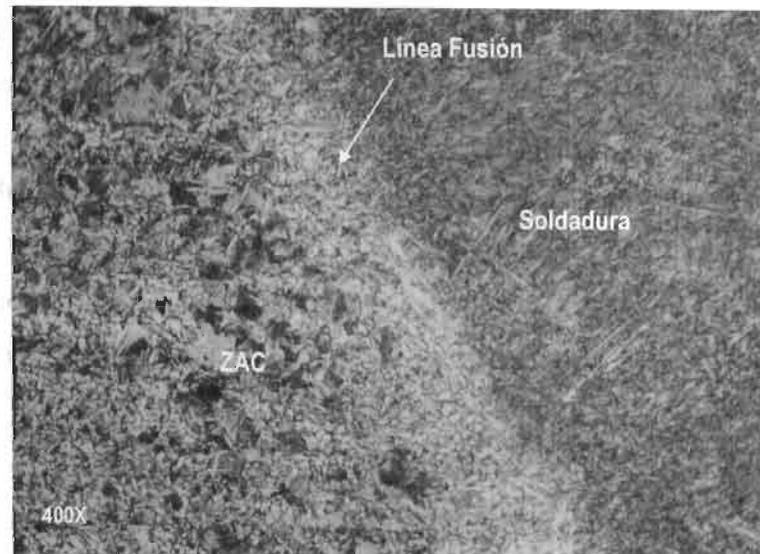
**Figura 2.3** Diagrama TTT (Temperatura-Tiempo-Transformación) desplazamiento en la curva de enfriamiento debido al precalentamiento [4].



**Figura 2.4** Diagrama de enfriamiento continuo, curva CCT, correspondiente a un acero del tipo 1.25 Cr – 0.50 Mo [7].

En la aplicación de la soldadura dependiendo el tipo de acero y función por la cual fue diseñada la junta, se deberá balancear la temperatura de precalentamiento con el calor de entrada (Energía eléctrica aplicada por el arco de la soldadura a la pieza de trabajo) [6].

Por otro lado, uno de los efectos, producido también por la temperatura de precalentamiento, es la difusión del hidrógeno, ya que éste puede generar microestructuras los cuales tendrán valores de dureza menores que la ZAC (zona afectada por el calor) y en el caso de la soldadura evita que se obtenga martensita en aceros de alto carbono Figura 2.5, además de disminuir las tensiones residuales [7].



**Figura 2.5** Estructuras martensíticas en aceros, zona afectada por el calor (ZAC), línea de fusión y soldadura [6].

Cuando se tiene la aplicación de varios cordones de soldadura y el calor generado no es el suficiente para mantener la temperatura que fue aplicada en el precalentamiento, es necesario aplicar precalentamiento entre cordón y cordón de soldadura como lo marcan en los procedimientos [6].

De cualquier manera el tiempo de precalentamiento es menor debido al calor de entrada en el proceso de múltiples pasadas de cordones de soldadura ya que este proceso ayuda a disminuir la dureza del ZAC y acelera la migración del hidrógeno, reduciendo la concentración del mismo aproximadamente un 30 a 40%, de esta manera se minimizará la posibilidad de fisuración en el proceso de enfriamiento por atrapamiento de hidrógeno [7].

Si se tienen temperaturas de precalentamiento que varían desde la temperatura ambiente de 250 °C hasta los 450°C, pero existen algunos requerimientos que puede que esta temperatura sea mayor. Es importante

considerar la eliminación de todo precalentamiento innecesario esto debido al consumo de energía, si se tienen procesos de precalentamiento excesivos e innecesarios no justificarán un costo además de que se podrían alterar las propiedades las propiedades y la calidad de la unión [7].

El precalentamiento alto afecta de manera directa al soldador y su calidad de trabajo tiende a ser menor. La determinación de los parámetros de precalentamiento serán determinados de acuerdo al diseño de junta el cual ya fue evaluado de manera técnica a través de ensayos o pruebas mecánicas [8].

Existen numerosos métodos de carácter predictivo propuestos para determinar o estimar la necesidad de precalentar en la soldadura de aceros. Estos métodos consideran algunos o todos los factores que influyen en la fisuración en frío:

- Composición química del acero.
- Difusión de hidrógeno.
- Calor aportado.
- Espesor del metal base.
- Diseño de junta

Sin embargo, hay una considerable diferencia en la valoración de la importancia de estos factores entre los distintos métodos. Por ejemplo, el efecto de la composición química difiere de un método a otro en la evaluación de la importancia de cada elemento de aleación y, por lo tanto, pueden considerar distintos carbonos equivalentes (CE) [8].

Algunos de los métodos más conocidos y aplicados para el cálculo de la temperatura de precalentamiento son los siguientes:

- Norma British Standard BS 5135
- Nomograma de Coe

- Criterio de Duren
- Criterio de Ito y Bessyo
- Criterio de Suzuki y Yurioka
- Método de Seferian
- Método del Instituto Internacional de Soldadura
- ANSI/AWS D1.1, Código de Estructuras Soldadas en Acero
- Método de la carta [8].

### 2.3.3 Método Seferian

Este famoso metalúrgico francés propone la siguiente expresión para el cálculo de la temperatura de precalentamiento:

$$T_p[^\circ\text{C}] = 350 \text{ CT} - 0.25 (0.25\% \text{ contenido de carbono})$$

$$\text{CT \%} = C_q + C_e = C_q(1 + 0,005e)$$

donde:

CT = Porcentaje de carbono equivalente,

Cq = Suma del equivalente químico y,

Ce = Carbono equivalente en el espesor que depende a su vez del propio espesor y de la templabilidad del acero [8].

e = espesor [mm].

$$C_q[\%] = C + \frac{\text{Mn} + \text{Cr}}{9} + \frac{\text{Ni}}{18} + \frac{7\text{Mo}}{90}$$

Seferian determina gráficamente la temperatura de precalentamiento como se muestra en la Figura 2.6 [8].

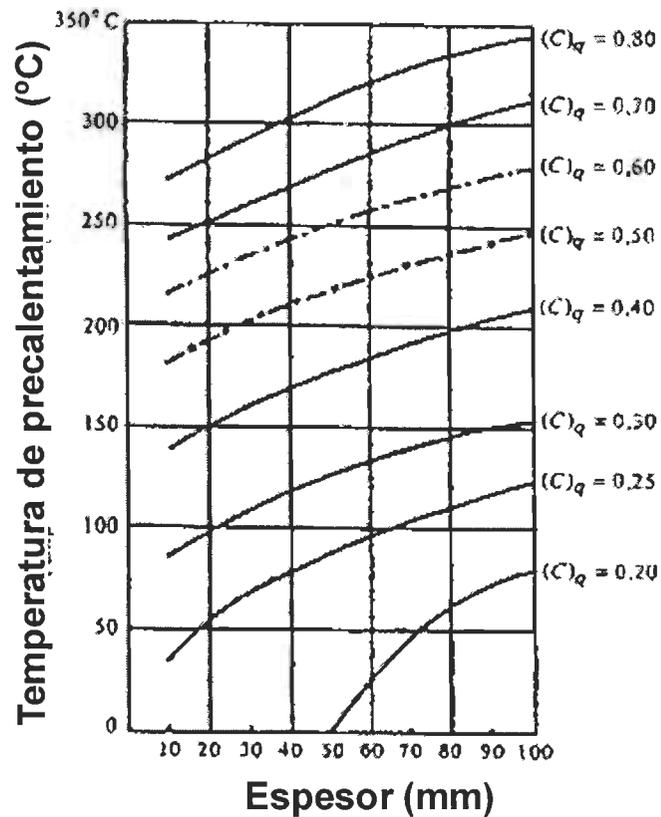


Figura 2.6 Gráfica Seferian [8].

### 2.3.4 Postcalentamiento

Con la aplicación de calentamiento después de soldar en todo un ensamble de soldadura o en una porción localizada, puede ocurrir alguna o más de las siguientes situaciones:

- 1.- Relevar esfuerzos.
- 2.- Incremento o disminución de la tenacidad.
- 3.- Incremento o disminución de resistencia.
- 4.- Incremento de la resistencia a la corrosión.

Esto consiste en un calentamiento uniforme de la soldadura a una temperatura por debajo del límite crítico del material, seguido de un enfriamiento controlado [9].

Para ensambles o conjuntos de dimensiones grandes y complicadas, el relevado de esfuerzos es aplicado dentro de un horno, donde la temperatura debe ser controlada y uniforme para asegurar un relevado apropiado [9].

El uso de la flama oxiacetilénica fue uno de los primeros métodos empleados para relevar esfuerzos. La velocidad de calentamiento y la distribución de calor eran controlados manualmente, las temperaturas eran comprobadas por medio de gráficas de colores o con lápices de temperaturas [9].

Posteriormente, este método ha sido mejorado con el empleo de anillos con gas colocados alrededor del cuerpo del recipiente o tubo, lográndose una mejor distribución de calor pero con dificultades en el control de la velocidad de calentamiento [9].

#### **2.4 Agrietamiento en los procesos de soldadura GMAW**

Varios tipos de discontinuidades pueden presentarse en las soldaduras o en las zonas afectadas por el calor (ZAC). Las soldaduras pueden contener porosidades, inclusiones de escoria o grietas, principalmente [10].

Considerando que existen límites aceptables para las inclusiones de escoria y la porosidad en las soldaduras, las grietas son las más perjudiciales y nunca son aceptables, esto debido a una posible fractura en la junta soldada. Las grietas en soldadura o en la zona afectada por el calor, indican que existen uno o más problemas que deben tratarse. Un análisis cuidadoso de la característica de la grieta permitirá determinar la causa raíz y tomar las medidas correctivas.

Las soldaduras pueden fallar, por mencionar algunos casos, debido al exceso de carga, a la fatiga y al impacto [10].

El agrietamiento mencionado es el resultado de la solidificación, el enfriamiento y el estrés que desarrolló debido a la contracción de la soldadura. Las grietas en la soldadura se producen en caliente o frío [10]:

**Las grietas en caliente** por encima de 500°C, son aquellas que se producen a temperaturas elevadas y están, por lo general, relacionada con la solidificación [11].

**Las grietas en frío** por debajo de 200°C, son las que se producen después que la soldadura se ha enfriado a temperatura ambiente y pueden ser relacionadas con el hidrógeno. No es el resultado alguna carga [11].

La mayoría de las grietas resultan de las contracciones de esfuerzos de tensión que se producen en la soldadura al enfriarse. Si la contracción es restringida, los esfuerzos inducirán esfuerzo residual que causan agrietamiento debido a las dos fuerzas opuestas que a continuación se mencionan [11]:

- a) Estrés inducido por la contracción de los metales.
- b) Rigidez circundante del material base.

El esfuerzo inducido por la contracción incrementa el volumen de la contracción del metal. Grandes tamaños de soldadura y los procesos de soldadura de penetración profunda aumentan el esfuerzo en la contracción del material. El estrés provocado por estos esfuerzos se incrementará cuando mayor resistencia en el metal de aporte se presenta. Con un mayor esfuerzo a la cedencia, se presentará un incrementó en esfuerzo residual [11].

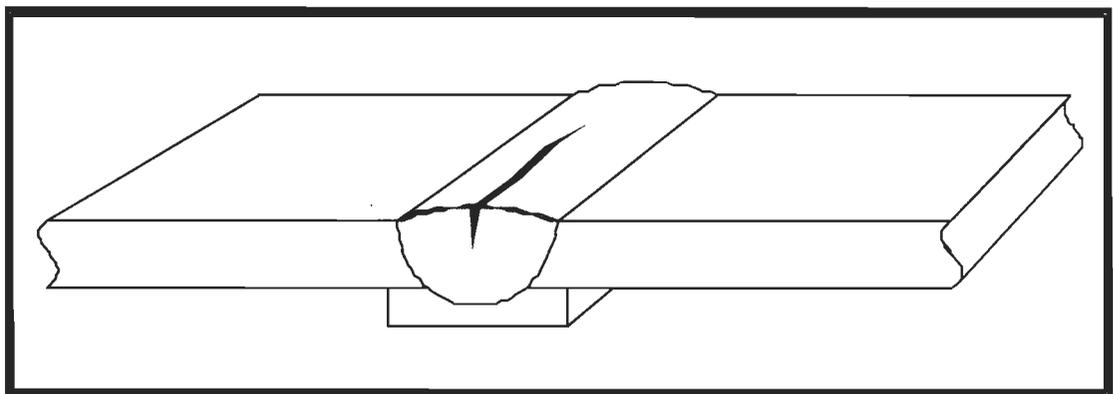
Bajo altas condiciones de sujeción, deberán considerarse precauciones extraordinarias para superar las tendencias de grietas, las cuales se describen en las secciones siguientes [11].

Resulta primordial prestar especial atención a la secuencia de soldadura, pre-calentamiento y temperatura entre pasos, postcalentamiento, diseño de la junta, procedimientos de soldadura y el material de aporte. El uso de martilleo, así como un tratamiento de revenido tal vez sea necesario cuando el componente a fabricar presenta una alta sujeción de sus elementos [11].

### 2.4.1 Agrietamiento central

El agrietamiento central se caracteriza por ser una separación en el centro de un cordón soldadura. Si el cordón de soldadura está en el centro de la unión, como ocurre siempre en una sola pasada de soldadura, el agrietamiento central será en el centro de la unión [11].

En el caso de múltiples pases de soldaduras, donde varios cordones por niveles son aplicados, la grieta central puede no estar en el centro geométrico de la unión, aunque siempre estará en el centro del cordón (Figura 2.7).



**Figura 2.7** Representación del fenómeno de agrietamiento central [11].

El agrietamiento central es el resultado de uno de los siguientes fenómenos [11]:

- a) Agrietamiento inducido por segregación.
- b) La forma del cordón inducida por las grietas.
- c) La superficie del perfil inducida por las grietas.

Lamentablemente, los tres fenómenos se manifiestan al mismo tiempo que las grietas, y con frecuencia es difícil identificar la causa. Además, la experiencia ha demostrado que, a menudo, dos o incluso tres de estos fenómenos interactúan y contribuyen al problema de agrietamiento [11].

La comprensión del mecanismo es fundamental para poder ayudar a determinar las soluciones correctivas en cada uno de los agrietamientos centrales reportados en la literatura [11].

#### **2.4.1.1 Agrietamiento central inducido por segregación.**

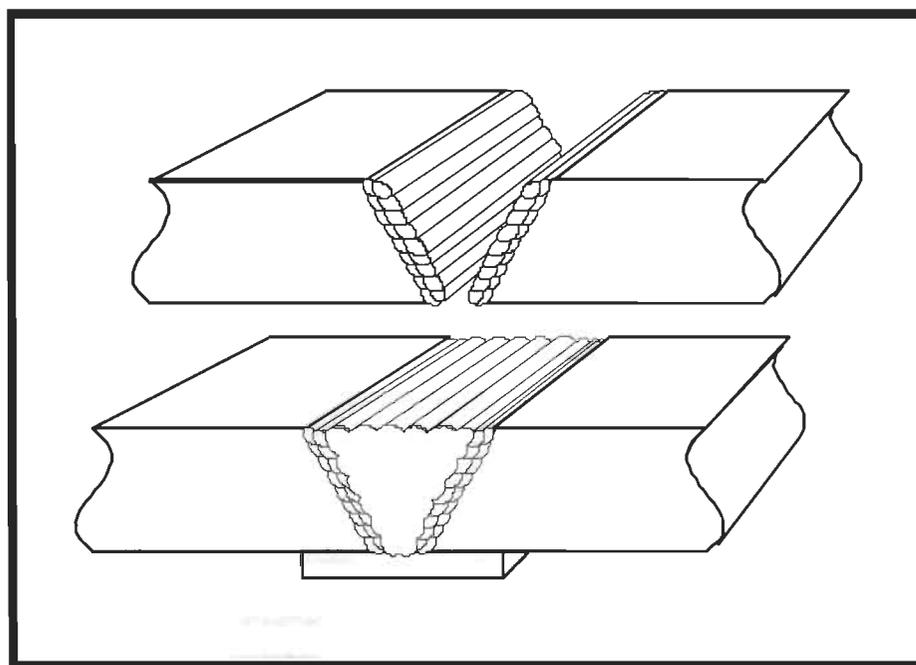
Se produce cuando componentes de bajo punto de fusión tales como fósforo, zinc, cobre y compuestos de azufre se separan en la mezcla durante el proceso de solidificación de la soldadura. Los componentes de bajo del punto de fusión, en el metal fundido, serán forzados al centro de la junta durante la solidificación, ya que son los últimos en solidificar y la soldadura tiende a separar en ese punto, la contracción de la solidificación del metal se presenta lejos de la región central con los componentes que contienen bajo punto de fusión [11].

Cuando se experimenta el agrietamiento central, inducido por la segregación, varias soluciones pueden aplicarse. Dado que los contaminantes, por lo general, provienen del material base, la primera consideración es la de limitar la cantidad de contaminantes del material base. Esto puede ser realizado

por la limitación de la penetración del proceso de soldadura. En algunos casos, requerirá un diseño nuevo de junta [11].

La penetración adicional ofrecida por algunos de los procesos no es necesaria y puede ser reducida mediante el uso de menor corriente en la aplicación de la soldadura [11].

Un nivel de cordones de soldadura, como se observa en la Figura 2.8, depositado con baja corriente, tal como el proceso SMAW, es más efectivo para reducir la cantidad de contaminantes volátiles en la mezcla de soldadura [11].



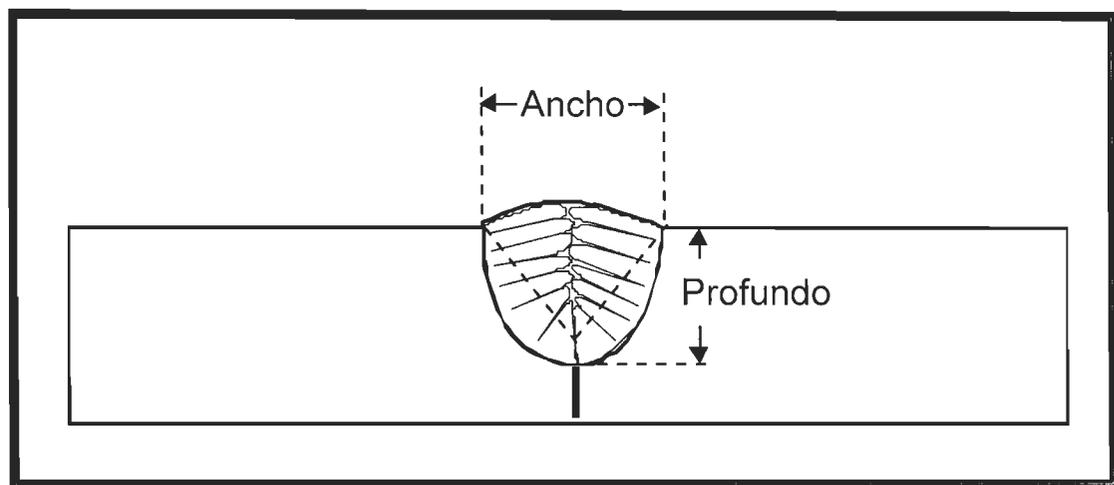
**Figura 2.8** Representación esquemática de soldadura en capas [11].

En el caso del azufre, es posible superar los efectos del daño de sulfuros de hierro preferentemente formando sulfuro de manganeso. El sulfuro de manganeso ( $MnS$ ) se genera cuando el manganeso está presente en cantidades suficientes para contrarrestar el azufre. El sulfuro de manganeso tiene un punto de fusión de  $2,900^{\circ}C$ . En esta situación, antes que la soldadura

comienza a solidificar, los sulfuros de manganeso se forman, los cuales no se segregaran. Los productores de acero utilizan este concepto cuando los niveles de azufre encontrados en el hierro mineral son altos. En soldadura, es posible utilizar materiales de aporte con altos niveles de manganeso, para superar la formación de bajo punto de fusión de sulfuro de hierro. Lamentablemente, este concepto no puede aplicarse a distintos contaminantes de azufre [11].

#### 2.4.1.2 Agrietamiento central inducido en la forma del cordón.

El segundo tipo de agrietamiento central se conoce como agrietamiento inducido en la forma del cordón de soldadura. Esto se ilustra en la Figura 2.9 y se asocia con procesos de penetración profunda de soldadura tales como SAW y protegidos con CO<sub>2</sub> como FCAW .



**Figura 2.9** Agrietamiento inducido en la forma del cordón de soldadura [11].

Cuando un cordón de soldadura es de la forma en la que hay más profundidad que anchura en la sección transversal de la soldadura, la solidificación de granos crece perpendicularmente a la superficie del acero intersectándose en el centro, pero no aumenta la fusión a través de la junta. Para corregir esta condición, los cordones de soldadura, de manera individual, deberán tener por lo menos tanto de ancho como de profundidad. Las

recomendaciones varían de 1:1 a 1.4:1 de ancho-profundo de radio para poner remedio a esta condición.

La total configuración de la soldadura, pueden componerse con varios cordones individuales, o puede tener una forma general que constituye más profundidad que ancho. Si se utilizan múltiples pases y cada cordón es más ancho que profundo, se podrá realizar una soldadura libre de grietas [11].

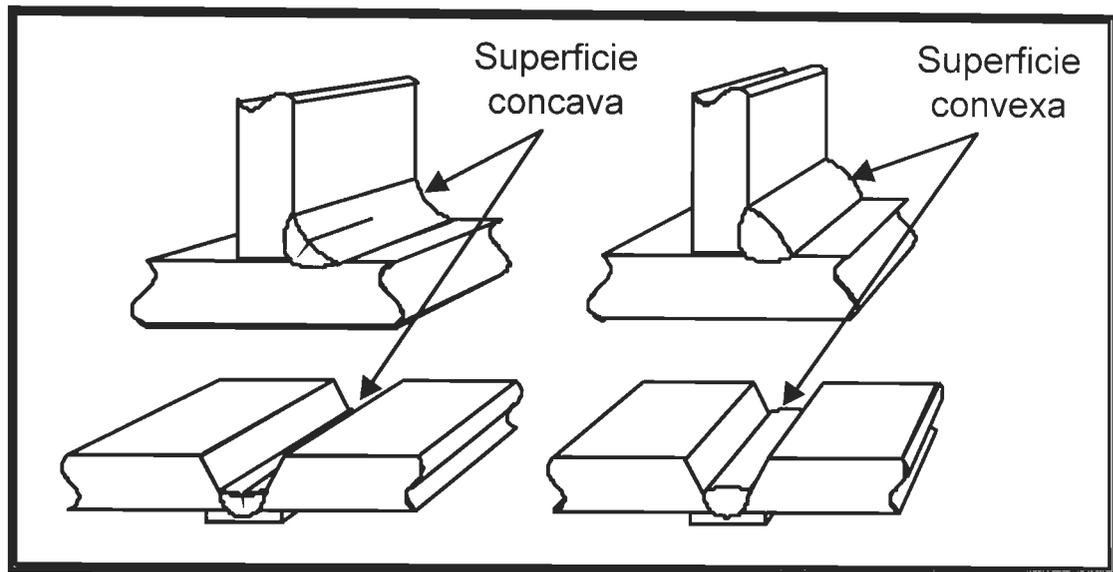
Cuando ocurre el agrietamiento central debido a la forma del cordón, la solución consiste en cambiar la relación ancho y profundidad. Esto puede implicar un cambio en el diseño de la junta. Dado que la profundidad es una función de penetración, es aconsejable reducir la cantidad de penetración [11].

Esto puede ser logrado mediante la utilización de menor amperaje en la soldadura y con electrodos de mayor diámetro. Todos estos enfoques reducirán la densidad de corriente y limitará la cantidad de penetración.

#### **2.4.1.3 Agrietamiento central por la forma de la superficie.**

El último mecanismo que genera agrietamiento central son las condiciones de la forma en la superficie. Cuando la soldadura crea superficies cóncavas se dará lugar a contracciones por esfuerzo interno en la superficie de la soldadura en tensión. Por el contrario, cuando las superficies de soldadura son convexas, las fuerzas de contracción internas jalarán la superficie en compresión [11].

Estas situaciones se ilustran en la Figura 2.10. Las soldaduras de superficie cóncava, con frecuencia, son el resultado de un alto voltaje del arco de soldadura. Una ligera disminución en el voltaje del arco de soldadura causará que el cordón de soldadura vuelva a un perfil ligeramente convexo que permita eliminar la tendencia de grietas [11].



**Figura 2.10** Superficies en los cordones de soldadura [11].

La alta velocidad en la alimentación del material de aporte también puede llevar a que se presenten cordones de soldadura con superficies cóncavas. Una reducción en la velocidad de la alimentación del material de aporte aumentará la cantidad de relleno y permitirá volver a tener superficies con perfil convexo en los cordones de soldadura [11].

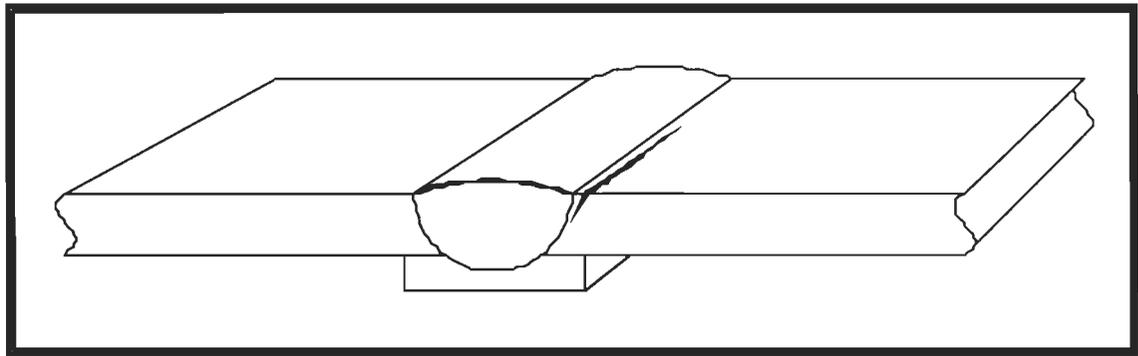
La aplicación de cordones de soldadura en posición vertical descendente también tiene tendencia a generar estas grietas sensibles, ya que usualmente se presentan cordones con superficies cóncavas. La aplicación de cordones de soldadura en posición vertical ascendente puede poner remedio a esta situación proporcionando una superficie del cordón más convexa [11].

#### **2.4.2 Agrietamiento en la zona afectada por el calor**

El agrietamiento en la ZAC, Figura 2.11 se caracteriza por la separación que se produce inmediatamente a la adyacente del cordón de soldadura. A pesar de que está

relacionado con el proceso soldadura, la grieta se produce en el material de base, no en el cordón de soldadura. Este tipo de grietas es también conocido como "agrietamiento por debajo del cordón de soldadura" (Underbead cracking), "agrietamiento en el borde de la soldadura" (toe cracking) o "agrietamiento retrasado" (delayed cracking) [11].

Debido a que este agrietamiento ocurre después que el acero se ha enfriado por debajo de los 400°F aproximadamente, puede ser llamado "agrietamiento en frío" (Cold cracking), y cuando se le asocia con el hidrógeno, se le denomina también "agrietamiento asistido por hidrógeno" (hydrogen assisted cracking).



**Figura 2.11** Agrietamiento en la zona afectada por el calor [11].

Para que el agrietamiento en la zona afectada por el calor ocurra, tres condiciones deben estar presentes al mismo tiempo [11]:

- 1) Es necesario que exista un nivel suficiente de hidrógeno.
- 2) Debe existir un material lo suficientemente sensible.
- 3) Debe haber un nivel suficientemente elevado de esfuerzo residual.

La adecuada reducción o eliminación de una de estas tres variables elimina generalmente el agrietamiento en la zona afectada por el calor. En aplicaciones

de soldadura, el típico enfoque es limitar dos de las tres variables, es decir, el nivel de hidrógeno y la sensibilidad del material [11].

La primera condición indica que el hidrógeno puede entrar en un charco de soldadura de diferentes orígenes. La humedad y los compuestos orgánicos son las principales fuentes de hidrógeno. Puede estar presente en el acero, el electrodo, en el protector del material, en la atmósfera, así como en el fundente para soldar (flux), ya sea en el exterior de los electrodos, en el interior del núcleo de los electrodos, o en forma de arco sumergido o fundente de electro escoria, pueden absorber la humedad, dependiendo de las condiciones de almacenamiento y prácticas de manipulación [11].

Por lo que para limitar el contenido de hidrógeno en los depósitos de soldadura, los consumibles de soldadura deben mantenerse adecuadamente, y la aplicación de la soldadura deberá realizarse sobre superficies que estén limpias y secas [11].

La segunda condición necesaria para el agrietamiento en la zona afectada por el calor es una sensible microestructura. El área de mayor interés, es la zona afectada que se deriva del ciclo térmico experimentado en la región inmediata en torno a la proceso de soldadura. Como esta zona se calienta por la soldadura de arco durante la creación del charco de soldadura, se ha transformado desde su temperatura ambiente a estructura de ferrita a la temperatura elevada a estructura de austenita. La velocidad de enfriamiento posterior determinará las propiedades resultantes de la zona afectada por el calor, así como las condiciones que fomenten el desarrollo de microestructuras sensiblemente agrietadas, incluyendo altos niveles de enfriamiento y altos niveles de dureza en el acero [11].

Los altos niveles de enfriamiento son alentados por la baja entrada de calor de los procesos de soldadura, un mayor espesor del metal base y las

temperaturas más frías del metal base. Los altos niveles de dureza son el resultado de grandes contenidos de carbono y/o niveles de aleación. Para un determinado acero, la forma más eficaz de reducir la velocidad de enfriamiento es mediante el aumento de la temperatura del acero del precalentamiento. Esto reduce el gradiente de temperatura, las tasas de enfriamiento son más lentas, y limita la formación de microestructuras sensibles. El efectivo precalentamiento es el medio primario por el cual las propiedades aceptables de la zona afectada por el calor son creadas, aunque también la entrada de calor tiene un efecto significativo en los niveles de enfriamiento en esta zona [11].

El esfuerzo residual de la soldadura se puede reducir a través de de un tratamiento térmico de revenido, aunque para la mayoría de las aplicaciones estructurales, esto es económicamente impráctico. Por la complejidad que representan las aplicaciones estructurales, los apuntalamientos temporales y las demás condiciones, es necesario considerarlos, debido a que el acero tendrá una gran reducción de su capacidad de fuerza en las temperaturas del alivio de esfuerzos. Para aplicaciones prácticas, el agrietamiento en la zona afectada por el calor estará controlado por prácticas efectivas de bajo hidrógeno y apropiados precalentamientos [11].

Para que el agrietamiento en la zona afectada por el calor ocurra, es necesario que el hidrógeno migre hacia esta zona, lo cual toma tiempo considerable. Por esta razón, para que sea localizado el agrietamiento en la zona afectada por el calor asistida por hidrógeno, el código D1.1 (D1.1-96, apartado 6.11) requiere una demora de 48 horas tras la finalización de los procesos de soldadura, para que la inspección de soldaduras sea hecha sobre aceros A514, A517 y A709 Gr. 100 y 100W, [11].

Con el tiempo, el hidrógeno se difunde a depósitos de soldadura. Las grietas normalmente se observan dentro de unas semanas, aunque, puede tomar varios meses dependiendo de la aplicación específica. Las

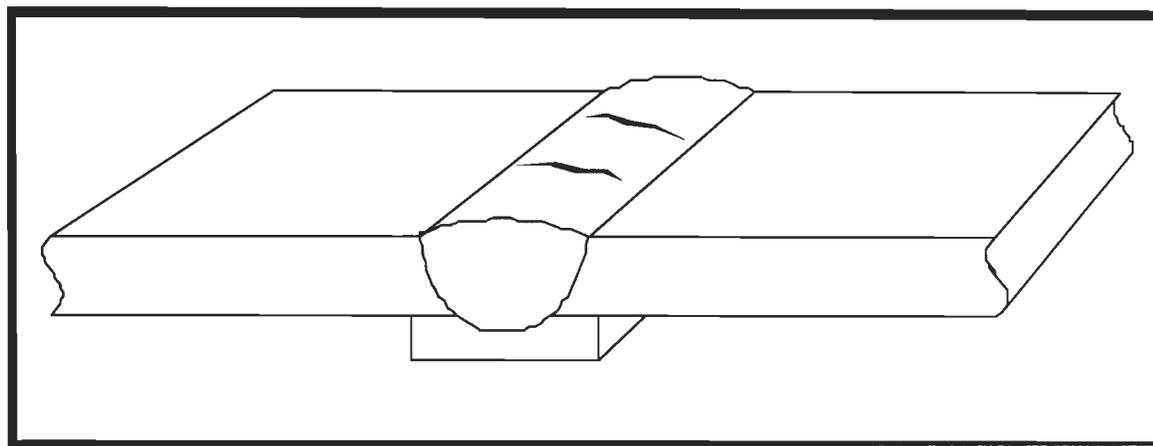
concentraciones de hidrógeno, cercanas al tiempo de la aplicación del proceso de soldadura, son siempre las mayores y si el agrietamiento inducido por hidrógeno esta por ocurrir, éste generalmente ocurrirá a los pocos días de fabricación. Sin embargo, puede tomar más tiempo para que las grietas crezcan lo suficiente para ser detectadas [11].

Para ejemplificar lo anterior, a 230°C, la velocidad de difusión de hidrógeno es de aproximadamente de 2.5 centímetros por minuto, pero a 104°C, la velocidad es de aproximadamente de 2.5 centímetros, en aproximadamente en 48 horas. A temperatura ambiente, la velocidad típica de difusión del hidrógeno es de 2.5 centímetros por 2 semanas. Si hay una cuestión sobre el nivel de hidrógeno en el proceso de soldadura, es posible aplicar un tratamiento térmico después de soldar comúnmente llamado postcalentamiento [11].

Por lo general, esto implica el calentamiento de la soldadura a una temperatura de 200 - 230°C, manteniendo la temperatura del acero por aproximadamente una hora por cada 2.5 centímetros de espesor de material. A esta temperatura, el hidrógeno es probable que se redistribuya a través de la difusión evitando el riesgo de agrietamiento. Algunos materiales, sin embargo, requerirán mucho más de 1 hora por cada 2.5 centímetros. Esta operación puede que no sea necesaria cuando el hidrógeno ha sido debidamente controlado, y no sea más fuerte que el precalentamiento, en función de su capacidad para prevenir el agrietamiento por debajo del cordón de soldadura en la zona afectada por el calor [11]. Para que las operaciones de postcalentamiento sean efectivas, deberán ser aplicadas antes de que la soldadura permita el enfriamiento a temperatura ambiente. Una falla podría dar como resultado agrietamientos en la zona afectada por el calor, antes de la aplicación del postcalentamiento [11].

### 2.4.3 Agrietamiento transversal

El agrietamiento transversal, también llamado agrietamiento cruzado, se caracteriza como una grieta en la soldadura perpendicular a la dirección de desplazamiento, Figura 2.12. Este es el tipo de grieta que se encuentra menos frecuentemente y está generalmente asociado con la soldadura que es altamente fuerte de manera significativa sobre el material base. Este tipo de agrietamiento puede ser asistido también por hidrógeno igual que el agrietamiento en la zona afectada por el calor, descrito anteriormente. El agrietamiento transversal es también un factor de exceso de hidrógeno, esfuerzo residual y una sensible micro-estructura. La principal diferencia es que el agrietamiento transversal ocurre en la soldadura como resultado de un esfuerzo residual longitudinal.



**Figura 2.12** Representación esquemática de agrietamiento transversal [11].

Si el cordón de soldadura se contrae longitudinalmente, el entorno del material de base se resiste a entrar en la compresión. La alta resistencia del acero en torno a la compresión restringe el encogimiento de la soldadura. Debido a la retención del entorno del material base, la soldadura desarrollará un esfuerzo longitudinal que facilitará el agrietamiento en la dirección transversal [11].

Cuando los agrietamientos transversales son encontrados, es justificada una práctica de revisión del bajo hidrógeno. Las condiciones de almacenamiento deben ser cuidadosamente revisada. Si esto es un problema, una reducción en la fuerza de la soldadura suele resolver los problemas de agrietamientos transversales. Por supuesto, los requisitos del diseño deberán ser cumplidos [11].

Se hace hincapié en la soldadura, porque tal vez el metal de aporte depositado es de menor resistencia, y muy dúctil bajo condiciones normales. Sin embargo, con la influencia de las aleaciones, es posible para la soldadura exponer una alta resistencia con una reducida ductilidad. El uso de una menor resistencia en la soldadura es una solución eficaz, pero se debe tener precaución de asegurar cumpla con los requerimientos mínimos de la junta [11].

El precalentamiento tal vez tenga que aplicarse para aliviar el agrietamiento transversal. El precalentamiento ayudará en la difusión de hidrógeno. De acuerdo a cómo el precalentamiento sea aplicado, se expandirá a lo largo del cordón de soldadura, lo que permitirá a la soldadura y la unión, la contracción de manera simultánea, y la reducción del esfuerzo aplicado por la contracción de la soldadura.

Esto es particularmente importante al hacer las soldaduras circunferenciales. Cuando la circunferencia de los materiales está siendo soldada se expanden, la soldadura es libre de contracciones junto con el entorno del material de base, reduciendo la contracción por estrés de manera longitudinal. Por último, los tratamientos involucrados posteriormente a la soldadura que mantengan las temperaturas del acero a 120-230°C por largos períodos de tiempo (generalmente de 1 hora por pulgada de espesor) ayudarán en la difusión de cualquier residuo de hidrógeno [11].

q  
b  
d  
t  
l  
  
o  
3  
a  
n  
q  
  
f  
L  
b  
c  
c  
  
c  
e  
e  
f  
d  
)

101  
102  
103  
104  
105

# CAPÍTULO 3

## Caso de estudio

### Análisis de defectos de sección de extractos de minerales.

#### 3.1 Antecedentes

Un eje extractor de mineral de este tipo se compone de una aleta helicoidal (Pieza A) para el empuje, y la de un componente para rodamientos en acero de alto desempeño, identificada como la Pieza B, Figura 3.1. Ambas piezas se unen por soldadura con proceso GTAW, sin embargo, en las secciones de unión se presentan agrietamientos en el cordón de soldadura y faltas de unión metal base-material de aporte.

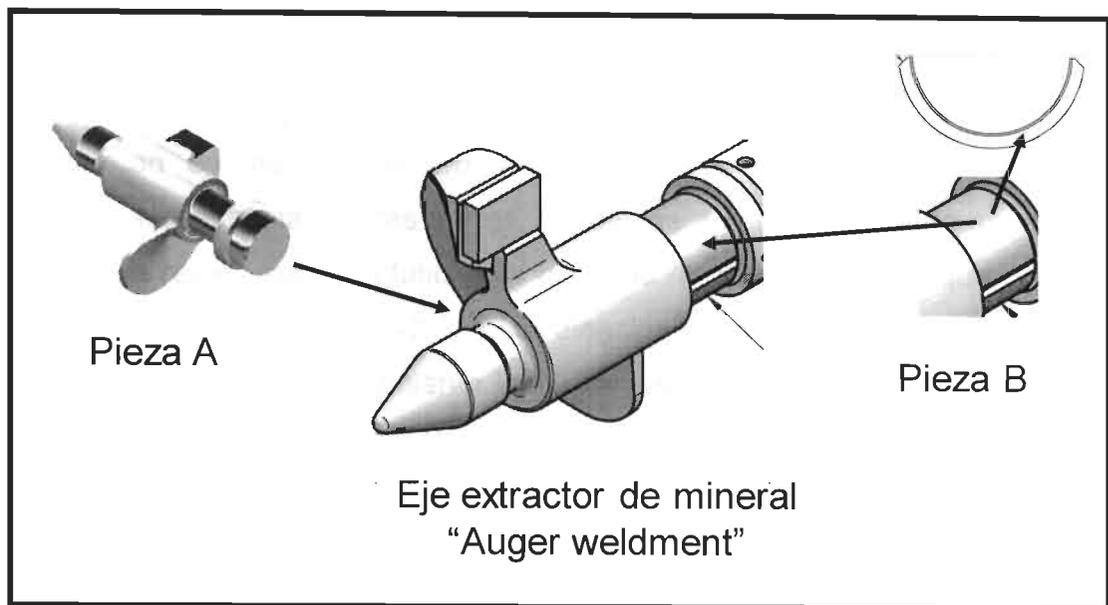


Figura 3.1 Partes de eje extractor de minerales [15].

#### 3.2 Material base

Las características de las piezas A y B son descritas a continuación. Tablas 3.1 a la 3.6.

Pieza A.

**Tabla 3.1** Composición química pieza A [12].

Composición química											
	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	Cu	V	CE
Pieza A	0.227	0.872	0.017	0.019	0.371	0.358	0.026	0.005	0.027	0.001	0.408

**Tabla 3.2** Propiedades mecánicas pieza A [12].

Propiedades mecánicas						
	Tension Mpa	Cedencia Mpa	Elongacion %	Reduccion de area / %	Dureza HB	Charpy V impacto
Pieza A	493.62	348.49	28.56%	62.50%	158	63

Pieza B.

Características generales: LESCALLOY 52100 VAC-ARC es un acero aleado con endurecimiento profundo que es utilizado para baleros en la industria aeroespacial y otras partes, expuestas a esfuerzos donde se requiere una buena resistencia a la fatiga por contacto en rodamientos, y que operen a temperaturas menores a 200°C. Esta aleación se produce por un proceso de vacío que asegura una excelente limpieza y sanidad, mejor que los procesos convencionales de vaciado [13].

Propiedades físicas [13]:

Gravedad específica: 7.8

Densidad: 7.75 g/cm<sup>3</sup>

Módulo de elasticidad: 200 GPa

Módulo de rigidez: 82.7 GPa

Coefficiente de expansión termal, Tabla 3.3:

**Tabla 3.3** Coeficiente de expansión térmica [13].

**Coeficiente de expansión térmica**

Rango de temperatura °C	mm / mm / °C $\times 10^{-6}$
38-260	11.6
38-427	13.2
38-538	14.0
38-649	14.3

Tratamiento térmico [13]:

Normalizado: Enfriado al aire 898-926°C

Esferoidización (Recosido): Un recosido isotérmico de acuerdo a los siguientes ciclos.

815°C (3 horas)

734°C (4 horas)

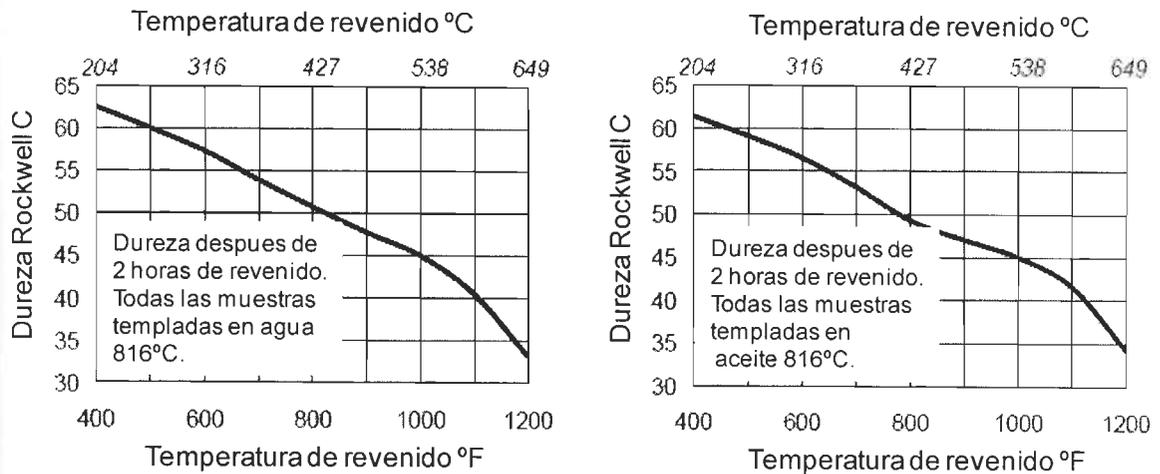
675°C (3 horas)

Enfriamiento lento a 538°C y entonces enfriado al aire.

Dureza máxima de recocido: 207 HBW

Endurecido: templado en agua de 802-829°C ó templado en aceite de 816-824°C.

Revenido: Revenido hasta la dureza deseada de acuerdo a las curvas de recocido en agua y en aceite, Figura 3.2.



**Figura 3.2** Curvas de tratamiento en agua y aceite [13].

**Tabla 3.4** Composición típica química [13].

Composicion	C	Mn	Si	Cr
Típica química	1.05	0.35	0.30	1.50

**Tabla 3.5** Datos típicos de endurecimiento por temple [13].

Profundidad de temple a cada 1.5 mm.

Rockwell C	1	2	3	4	5	6	7	8
	67	66.5	66	64	55	46	45	45

Forjado: Se recomienda un rango de temperaturas entre 1065-1149°C pero que no fuera por debajo de los 926°C. Después de la forja homogenizar a temperatura de 746°C con permanencia de 4 a 6 horas posteriormente enfriar al aire libre [13].

### 3.3 Material de aporte

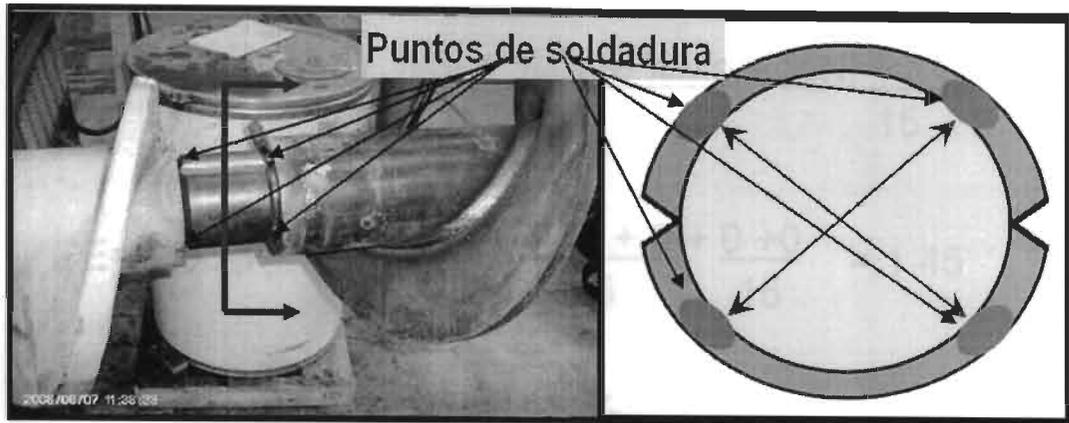
**Tabla 3.6** Propiedades químicas y mecánicas del metal de aporte [14].

Clasificaciones	Homologaciones		Propiedades mecánicas típicas del metal aportado			
<u>SFA/AWS</u>	ABS	3SA, 3YSA	C	0,75	<u>Límite elástico, MPa</u>	
<u>A5.18</u>	BV	S3M 3YM	Si	0,65	>460	
E70C-6M H4		HH (M21)	Mn	1,55	<u>Resistencia a tracción, MPa</u>	
<u>EN ISO 1732-</u>	DB	42.105.09	P	0,025	530-630	
<u>Δ</u>	DNV	N YMS	S	0,030	<u>Alargamiento, A4 %</u>	
T 46 4 M M 2		(H10)	Cr	0,2	24	
H5	GL	4YH10S	Ni	0,5	<u>Alargamiento, A5 %</u>	
		(M21)	Mo	0,2	24	
	LR	3S, 3YS	V	0,08	<u>Charpy V</u>	
	VdTÜV	04901	Nb	0,05	Temperatura de ensayo, °C	Valores de impacto, J
	CE	EN 13479	Cu	0,3	-40	75

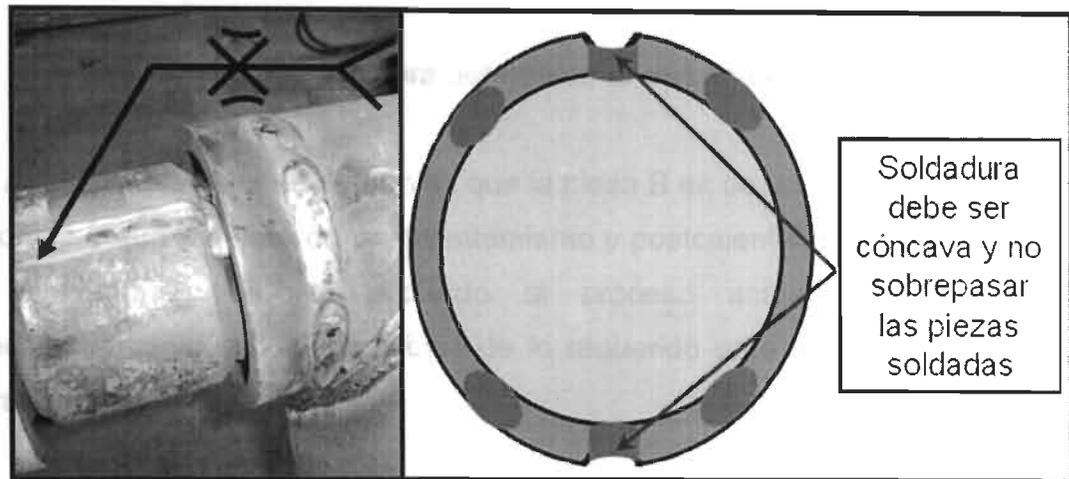
### 3.4 Metodología de unión

La secuencia de proceso de soldadura que actualmente se lleva a cabo de acuerdo a los planos del cliente, así como las recomendaciones del diseñador es la siguiente:

- 1.- Precalentar a 170°C pieza A y mantener temperatura 20 a 30 minutos.
- 2.- Aplicar 4 cordones de 12.7 mm. En pieza A con pieza B, Figura 3.3.
- 3.- Postcalentamiento piezas A y B ya punteadas a 170 °C.
- 4.- Soldar 2 cordones de 25.4 mm. En cada extremo de la unión entre las 2 mitades de la pieza B en forma cóncava, Figura 3.4.



**Figura 3.3** Aplicación de cuatro cordones (Punteo) de 12.7 mm. [15].



**Figura 3.4** Aplicación de dos cordones de 25.4 mm [15].

### 3.5 Análisis del caso

Después de tener el contenido de la información, son tres situaciones que son importantes evaluar y considerar como oportunidades de mejora. La primera de ellas es referente precalentamiento del metal base. Una de las características que se va a evaluar es el carbono equivalente. En el caso de la pieza A es 0.408, para la pieza B se utilizará la fórmula para determinar el carbono equivalente, Figura 3.5.

características de la pieza:

aporte en este contenido

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

$$CE = 1.05 + \frac{0.35 + .30}{6} + \frac{1.50 + 0}{5} + \frac{0 + 0}{15} = 1.45$$

$$CE = 1.45\%$$

**Figura 3.5** Fórmula para determinar el carbón equivalente [2].

Al tener este valor se determina que la pieza B es de un material difícilmente soldable y que requiere de precalentamiento y postcalentamiento en el proceso de soldadura, pero de acuerdo al proceso actual, los rangos de precalentamiento están por debajo de lo requerido para un material de estas características, Tabla 3.7 [2].

**Tabla 3.7** Temperaturas de precalentamiento sugeridas [2].

% Carbon equivalente	Temperatura de precalentamiento sugerido
Hasta 0.45	Opcional
0.45 a 0.60	93°C a 205°C
Arriba de 0.60	205°C a 372°C

La segunda situación que se presenta es el material base, conocido como pieza B, con un contenido de carbono de 1.05%. Pero el material de aporte que se emplea tiene un contenido de carbono de 0.75%, lo cual indica que las

características de la pieza B, en contenido de carbono, es mayor al material de aporte en este contenido.

Y la última característica a tomar en cuenta es la mencionada, en la instrucción de proceso, en la que pide que los cordones de soldadura deban ser cóncavos. Esto no es recomendable debido a los problemas asociados a la presencia de grietas por este tipo de cordones, ya que lo mas recomendable son los cordones de soldadura convexos [11].

# CAPÍTULO 4

## Discusión y conclusiones

- El proceso GMAW es uno de los procesos que tiene mejor aplicación para aceros de media y alta resistencia, entre otros aspectos por el bajo costo por consumibles y equipo.

- Dado su aporte calórico y afectación térmica es uno de los que requieren mayor control para evitar transformaciones de fases y zonas de alta resistencia en las uniones, evitando la generación de grietas, tanto en caliente como en frío, a partir de determinar el efecto que tienen las variables de este proceso con respecto al comportamiento de solidificación, transformación de fases en estado sólido y sus consecuencias con los defectos ya mencionados.

- Para el caso de estudio se determinó que las grietas se generaron por agrietamiento en frío y caliente.

## Bibliografía

- [1] H García (2001) *Inspección de soldadura*, Primera edición, Ediciones Técnicas. México, D.F.
- [2] American Welding Society (2000) *Welding Inspection technology*, fourth edition, USA.
- [3] Memorias del 4°. Congreso internacional en tecnología de la soldadura, manufactura e ingeniería industrial (2008) Impresas por COMIMSA, México.
- [4] Linnert GE, *Welding Metallurgy, Carbon and alloy steels*, volume 2 Technology of American Welding Society, USA.
- [5] Kobelco Welding (2007) *What is heat input and how does it affect the quality of welds*, USA.
- [6] COMIMSA (2008) Manual de curso de tratamientos térmicos, Saltillo, Coahuila, México.
- [7] ESAB CONARCO (2007) *Soldar con arco. Criterios técnicos básicos para una adecuada soldadura de los aceros estructurales*, México.
- [8] Quesada HJ; Zalazar M; Asta EP (2004) Memorias del CONAMET, *Ensayos TEKKEN en un acero ASTM A514 GR B para determinar la temperatura de precalentamiento*, México.
- [9] Laufgang SG (2004) *Tratamiento Térmico de Soldadura*, Termo Soldex S. A, México.

- [10] Kelkar GP (2007) *Weld Cracks – An Engineer’s Worst Nightmare*, WJM Technologies, USA.
- [11] Sabo RS (2005) *The procedure handbook of arc welding*, The Lincoln Electric Company, USA.
- [12] CAB Incorporated (2008) Hoja de datos GS20Mn5, USA.
- [13] Latrobe specialty steel company (2007) Hoja técnica LESCALLOY 52100 VAC-ARC, USA.
- [14] ESAB, <http://products.esab.com/Templates/T041.asp?id=57309>, 2009
- [15] ©Corporacion Terex: INSTPROC-SHM-13 (Hoja de instrucción de proceso).

## Lista de figuras

	N°
1.1 Detalle esquemático proceso GMAW.	2
1.2 Equipo para el proceso de soldadura GMAW.	10
2.2 Equipo para el proceso de soldadura por arco metálico con alambre.	12
2.3 Diagrama TTT.	16
2.4 Diagrama de enfriamiento continuo, curva CCT, correspondiente a un acero del tipo 1.25 Cr-0.50 Mo.	17
2.5 Estructuras martensíticas en aceros, zona afectada por el calor (ZAC), línea de fusión y soldadura.	18
2.6 Gráfica Seferian.	21
2.7 Representación del fenómeno de agrietamiento central.	23
2.8 Representación esquemática de soldadura en capas.	24
2.9 Agrietamiento inducido en la forma del cordón de soldadura.	25
2.10 Superficies en los cordones de soldadura.	29
2.11 Agrietamiento en la zona afectada por el calor.	30
2.12 Representación esquemática de agrietamiento transversal.	34
3.1 Partes de eje extractor de minerales.	37
3.2 Curvas de tratamiento térmico en agua y aceite.	40
3.3 Aplicación de cuatro cordones (Punteo) de 12.7 mm.	42
3.4 Aplicación de dos cordones de 25.4 mm.	42

## Tablas

	N°
3.1 Composición química pieza A	38
3.2 Propiedades mecánicas pieza A	38
3.3 Coeficiente de expansión térmica	39
3.4 Composición típica química.	39
3.5 Datos típicos de endurecimiento por temple.	40
3.6 Propiedades químicas y mecánicas del metal de aporte.	41
3.7 Temperaturas de precalentamiento sugeridas.	43