



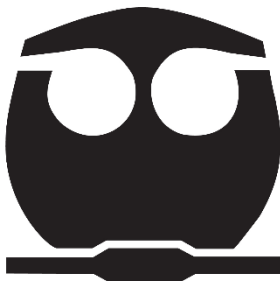
**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE QUÍMICA**

**ESTUDIO DE LA SOLDABILIDAD EN PIEZAS DE GRAN
TAMAÑO DE ACERO 9840 UTILIZANDO SOLDADURA
POR ARCO ELECTRICO (SMAW).**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO**

PRESENTA

BENÍTEZ ROSAS JUAN ALBERTO



CDMX

AÑO 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: PROFESOR: SERGIO GARCÍA GALÁN
VOCAL: PROFESOR: JUAN CARLOS CONTRERAS GUZMÁN
SECRETARIO: PROFESOR: ITZEL REYES CHAPARRO
1ER. SUPLENTE: PROFESOR: AGUSTÍN RUIZ RAMÍREZ
2° SUPLENTE: PROFESOR: GERARDO ARAMBURO PÉREZ

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

FACULTAD DE QUÍMICA, EDIFICIO “D” DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA. LABORATORIO DE POSGRADO.

ASESOR DEL TEMA:

M. en C. SERGIO GARCÍA GALÁN

SUPERVISOR TÉCNICO:

M. en M. GERARDO ARAMBURO PÉREZ

SUSTENTANTE:

BENÍTEZ ROSAS JUAN ALBERTO

Índice general

Resumen.	1
Capítulo 1. Marco teórico.	3
Generalidades de la soldadura.	3
Soldadura por arco eléctrico.	6
Soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido (SMAW).	7
Características de los electrodos revestidos.	8
Metalurgia en la soldadura.	11
Tensiones residuales.	16
Tratamientos térmicos para soldadura.	18
Distribución de las diferentes zonas de la soldadura.	19
Condiciones para una buena calidad de soldadura.	21
Soldabilidad.	22
Caracterización microestructural y mecánica del material base, material de aporte y de las distintas zonas afectadas.	27
Capítulo 2. Objetivos.	30
Objetivo general.	30
Objetivos particulares.	30
Capítulo 3. Desarrollo experimental.	31
Adquiriendo la habilidad de soldar.	31
Preparación del acero 9840.	32
Ensayo no destructivo de líquidos penetrantes.	32
Preparación de las muestras.	33
Obtención de micro y macroestructura.	34

Ensayos de micro y macrodureza.	34
Ensayo de tensión.	35
Capítulo 4. Resultados y análisis de resultados.	36
Control de las variables del proceso.	36
Práctica con electrodos E-6013.	36
Compatibilidad química del electrodo.	38
Ensayos de líquidos penetrantes.	39
Caracterización metalográfica.	42
Macroestructura.	42
Microestructura.	47
EDS.	52
Propiedades mecánicas.	55
Microdureza Vickers.	55
Dureza Rockwell.	61
Pruebas de tensión.	64
Ensayo de impacto.	71
Conclusiones.	73
Bibliografía.	74

Índice de imágenes.

Figura 1. Clasificación de los procesos de soldadura.....	3
Figura 2. Esquema de equipo de soldadura por arco eléctrico [18].	7
Figura 3. Esquema del proceso SMAW [3].....	7
Figura 4. Esquema de un electrodo [4].	8
Figura 5. Esquema sobre el significado de cada número en la clasificación de la AWS.....	10
Figura 6. Designación del último número en la nomenclatura AWS [18].	10
Figura 7. Esquema para un electrodo de baja aleación [2].	11
Figura 8. Composición química de los electrodos para aceros de baja aleación [2].	11
Figura 9. Ejemplo de crecimiento epitaxial [14].	13
Figura 10. Tipos de pileta. a) Velocidad baja. b) Velocidad alta [14].	14
Figura 11. Relación entre las temperaturas experimentadas en la ZAC y su ubicación en el diagrama de fases Fe-Fe ₃ C [16].	15
Figura 12. Aporte y distribución del calor aportado por el proceso de soldadura. .	17
Figura 13. Zonas afectadas en el proceso de soldadura SMAW [11].	19
Figura 14. Transformaciones de acuerdo con las diferentes temperaturas a las que se llega en el proceso de soldadura.	20
Figura 15. Diagrama de Graville [4].	25
Figura 16. Estudios por realizar para la evaluación de la soldabilidad.	27

Figura 17. Diagrama de pruebas a realizar para el análisis completo de la unión soldada [4].	27
Figura 18. Muestra de cómo realizar el barrido de microdureza [5].	28
Figura 19. Planta de energía y careta de protección utilizadas para soldar.	31
Figura 20. Electrodo E-9018-B3.	31
Figura 21. Ensayo de líquidos penetrantes. a) limpieza, b) aplicación de penetrador, c) aplicación de revelador.	33
Figura 22. Tipos de cordones realizados. a) Cordones sobre placas, b) Cordón de unión.	33
Figura 23. Microdurometro Vickers.	35
Figura 24. Tipo de unión realizada en las piezas de tensión.	35
Figura 25. Evolución en la búsqueda de las variables para generar los cordones de soldadura.	37
Figura 26. Inspección de cordones con electrodo E-6013.	39
Figura 27. Inspección de dos cordones de soldadura con electrodo E-9018-B3. .	40
Figura 28. Inspección de un cordón para relleno con electrodo E-9018-B3.	41
Figura 29. Inspección en cortes transversales de cordones con electrodo E-9018-B3.	42
Figura 30. Macroestructura de la pieza sin precalentamiento obtenida con el microscopio estereográfico.	43
Figura 31. Macroestructura de la pieza precalentada a 120 °C obtenida con el microscopio estereográfico.	44
Figura 32. Macroestructura de la pieza precalentada a 150 °C obtenida con el microscopio estereográfico.	45

Figura 33. Macroestructura de la pieza de unión precalentada a 120 °C obtenida con el microscopio estereográfico lado derecho. MB=material base, IN=interfase, CO=granos columnares, DN=dendritas.....	46
Figura 34. Macroestructura de la pieza de unión tipo “v” precalentada a 120 °C obtenida con el microscopio estereográfico lado izquierdo. MB=material base, IN=interfase, CO=granos columnares, DN=dendritas.	46
Figura 35. Microestructura de la pieza sin precalentamiento en MEB. a) Material de aporte, b) ZAC.	47
Figura 36. Microestructura en la zona de interfase de la pieza sin precalentamiento en MEB.	48
Figura 37. Microestructura de la pieza precalentada a 120 °C en MEB. a) Material de aporte, b) ZAC.	48
Figura 38. Microestructura de la zona de interfase en la pieza precalentada a 120 °C en MEB.	49
Figura 39. Microestructura de la pieza precalentada a 150 °C en MEB. a) Material de aporte, b) ZAC.	50
Figura 40. Microestructura de la zona de interfase en la pieza precalentada a 150 °C en MEB.	50
Figura 41. Microestructura en la zona de interfase de la pieza de unión precalentada a 120 C en la placa con mayor espesor en MEB. a) 200x, b)500x. MA=material de aporte, IN=interfase, MB=material base.	51
Figura 42. Microestructura en la zona de interfase de la pieza de unión precalentada a 120 C en la placa con menor espesor en MEB. a) 200x, b)500x. MA=material de aporte, IN=interfase, MB=material base.	52

Figura 43. Microanálisis realizado en la pieza sin precalentamiento en las diferentes zonas de interés obtenida por EDS.	53
Figura 44. Microanálisis realizado en la pieza precalentada a 120 °C en las diferentes zonas de interés obtenida por EDS.	53
Figura 45. Microanálisis realizado en la pieza precalentada a 150 °C en las diferentes zonas de interés obtenida por EDS.	54
Figura 46. Microanálisis realizado en la pieza de unión precalentada a 120 °C en las diferentes zonas de interés obtenida por EDS.	54
Figura 47. Variación de la microdureza en las distintas zonas en la pieza soldada sin precalentamiento.	56
Figura 48. Variación de la microdureza en las distintas zonas en la pieza soldada con precalentamiento de 120 ° C.	57
Figura 49. Variación de la microdureza en las diferentes zonas en la pieza soldada con precalentamiento de 150 °C.	58
Figura 50. Variación de la microdureza en la pieza de unión precalentada a 120 °C placa con mayor espesor.	60
Figura 51. Variación de la microdureza en la pieza de unión precalentada a 120 °C placa con menor espesor.	61
Figura 52. Ejemplos de los barridos de dureza Rockwell realizados en las muestras.	62
Figura 53. Barrido vertical de HRC en las distintas zonas de la soldadura en la pieza precalentada a 120 °C.	62
Figura 54. Barrido vertical de HRC en las distintas zonas de la soldadura en la pieza precalentada a 150 °C.	63
Figura 55. Barrido horizontal de HRC en las distintas zonas de la soldadura en la pieza de unión precalentada a 120 °C.	64

Figura 56. Primera muestra de tensión. a) 10 aumento. b)20 aumentos.	66
Figura 57. Segunda muestra de tensión. a) 10 aumento. b)20 aumentos.	66
Figura 58. Ejemplo de bisel generado en las piezas [20].	67
Figura 59. Placa principal y probetas de tensión.	67
Figura 60. Material base sin carburos tomada en microscopio óptico a 200 aumentos.	68
Figura 61. Material base con carburos tomada en microscopio óptico a 200 aumentos.	69
Figura 62. Fractura de la pieza sin precalentamiento en el ensayo de tensión.....	70
Figura 63. Fracturas de las piezas precalentadas a 200 °C en el ensayo de tensión.	70
Figura 64. Fractura de la pieza sin precalentamiento en el ensayo de impacto....	71
Figura 65. Fractura de la pieza precalentada a 200 °C en el ensayo de impacto.	72

Índice de tablas.

Tabla 1. Composición química nominal del electrodo E-9018-B3.....	38
Tabla 2. Composición química nominal del acero 9840.	38
Tabla 3. Microdurezas en la pieza sin precalentamiento.	55
Tabla 4. Microdurezas de la pieza precalentada a 120 ° C.	56
Tabla 5. Microdurezas de la pieza precalentada a 150 ° C.	58
Tabla 6. Microdurezas de la pieza de unión precalentada a 120 °C placa con mayor espesor.	59
Tabla 7. Microdureza de la pieza de unión precalentada a 120 °C placa con menor espesor.	60

Resumen.

El proceso de soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido (SMAW por sus siglas en inglés que significan *shielded metal arc welding*) se realiza con el aporte de material mediante la fusión del electrodo. Existen diversos factores que influyen en el diseño del proceso de soldadura, pero los más importantes se enfocan en la elección adecuada del electrodo utilizado durante el proceso y las condiciones de pre y post tratamiento, esto con el fin de obtener una unión que cumpla con los estándares y evitar defectos como zonas con alta tensión residual, fisuras o formación de precipitados que afectan directamente las propiedades mecánicas del material base y de la unión.

Para los aceros aleados se deben tomar consideraciones antes y durante el proceso de soldadura debido a que los contenidos de elementos aleantes como el Ni, Cr y Mo, dificultan el proceso de unión ya que disminuyen la soldabilidad.

La soldabilidad es la capacidad de un material para ser soldado bajo ciertas condiciones impuestas en una estructura específica y apropiada. Es necesario emplear un conjunto de técnicas complementarias para analizar la calidad visual, mecánica y microestructural de los cordones de soldadura y de esta forma tener un panorama global sobre la soldabilidad de la aleación y de ser necesario realizar los ajustes en el proceso.

El presente trabajo tiene como objetivo el estudio del efecto del tratamiento de precalentamiento en el acero 9840 sometido a un proceso de soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido, esto debido a que este acero contiene porcentajes importantes de níquel (0.85 a 1.15%wt), cromo (0.7 a 0.9%wt) y molibdeno (0.3 %wt) lo que provoca que su soldabilidad en condiciones normales se reduzca.

Todas las piezas estudiadas en este trabajo fueron obtenidas en el laboratorio por lo que la habilidad de soldar a partir de la práctica con placas de acero dulce y posteriormente con el acero 9840 es de suma importancia.

Se generaron cordones de soldadura sobre placas de acero 9840 y uniones tipo junta entre placas del mismo material en condiciones normales (temperatura ambiente como referencia) y en condiciones de precalentamiento de las placas a una temperatura 120 y 150 °C y así, poder verificar el efecto del tratamiento.

Las muestras fueron sometidas a una inspección visual y ensayos no destructivos de líquidos penetrantes con lo que se verificó la calidad superficial de los cordones. Posteriormente los cordones se cortaron transversalmente para realizar la caracterización macro y microestructural y observar las fases presentes en la microestructura.

En conjunto se realizaron ensayos mecánicos de micro y macrodureza para conocer la distribución de durezas en las zonas en la soldadura. Además, se realizaron ensayos de tensión e impacto para verificar como varían las propiedades mecánicas con respecto al tratamiento de precalentamiento.

Con el uso del microscopio electrónico de barrido (MEB) se obtuvieron microanálisis por medio de la técnica de espectrometría dispersiva de energía (EDS) para observar si la distribución de los elementos en las diferentes zonas de la soldadura era homogénea o no.

Con los resultados obtenidos en este trabajo se puede concluir que las temperaturas seleccionadas para el tratamiento de precalentamiento mejoran la calidad de la soldadura obtenida por el proceso SMAW.

Capítulo 1. Marco teórico.

Generalidades de la soldadura.

Se entiende por soldadura a la unión de dos o más materiales, de tal forma que conformen una sola pieza. En términos más técnicos la soldadura es una coalescencia localizada, la cual es producida por un calentamiento a una temperatura adecuada, con o sin aplicación de presión y con o sin el uso del metal de aporte [3]. Se entiende por coalescencia a la acción con la cual se logra la unión de dos o más materiales.

Con el paso del tiempo, las exigencias de la industria y los avances de la tecnología han permitido que las técnicas de soldadura evolucionen generando cada vez más tipos de soldadura que cumplan con ciertos requerimientos específicos [1]. En la actualidad podemos clasificar los tipos de soldadura dependiendo la fuente de energía utilizada y los cuatro grandes grupos son: Soldadura eléctrica, química, mecánica y óptica. En el siguiente cuadro se ejemplifican algunos de los procesos utilizados:

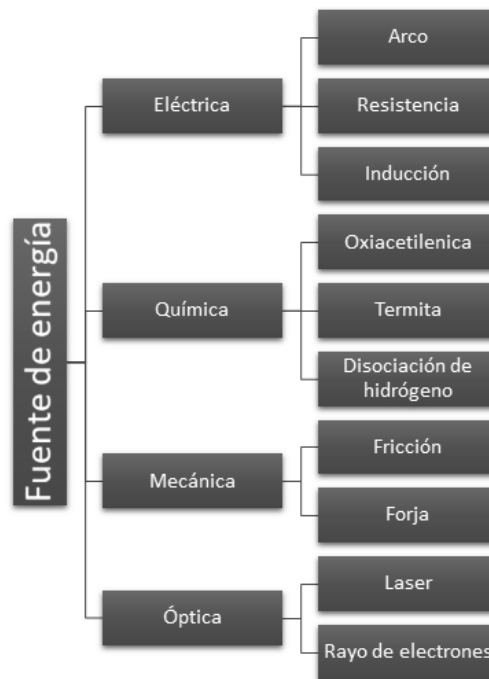


Figura 1. Clasificación de los procesos de soldadura.

Cada uno de estos procesos tiene variaciones significativas en su ejecución y a continuación se darán los aspectos generales de cada uno de ellos.

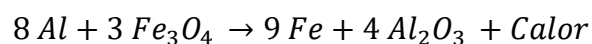
Soldadura por Arco: La energía se obtiene a partir de una descarga relativamente grande de energía eléctrica ocurrida a través de una columna gaseosa ionizada llamada plasma. Esta categoría a su vez se subdivide en varias ramas que dependerán de los consumibles utilizados como lo son el proceso SMAW (*shielded metal arc welding*), TIG (*tungsten inert gas*), SAW (*submerged arc welding*), entre otros.

Soldadura por Resistencia: En esta se ponen en contacto las piezas a soldar y se hace pasar entre ellas una corriente eléctrica, la resistencia al paso de la corriente que generan los materiales es la responsable de generar el calor suficiente que junto con la presión aplicada a las piezas produce la unión. Los procesos más utilizados serían la soldadura por punto, soldadura por costura y la soldadura por resalte.

Soldadura por Inducción: Al excitar una bobina con corriente alterna, de alta frecuencia o introduciendo en esta un metal conductor se inducen corrientes eléctricas en el metal dando como resultado el calor necesario para generar la unión debido a la resistencia al paso de la corriente del metal.

Soldadura por Oxiacetilénica: De todos los gases disponibles, el acetileno en contacto con el oxígeno proporciona la llama de mayor temperatura la cual puede llegar a los 3500 °C. En este proceso la unión se realiza a partir de fundir los materiales en el punto de la unión y se utiliza material de aporte para llenar la separación que usualmente existe entre las dos piezas.

Soldadura por Termita: En este proceso se tiene una mezcla de aluminio en polvo y óxido de hierro en una proporción de 1 a 3 respectivamente, produciendo hierro que fluye a una temperatura de 2750 °C. La reacción que ocasiona el proceso es la siguiente:



Este proceso se utiliza preferentemente para maquinaria pesada o en trabajos en donde las secciones por soldar son muy grandes.

Soldadura por Disociación de hidrógeno: Se mantiene un arco de corriente alterna entre dos electrodos de tungsteno. El gas de hidrógeno es disociado en el arco, cuando este se pone en contacto con la base de metal se combina, generando importantes cantidades de calor. El gas hidrógeno alrededor de la soldadura provee la protección contra el oxígeno y Nitrógeno de la atmósfera. Esta soldadura es de alta calidad y es usada para aceros de alta aleación, usándose también para piezas muy delgadas.

Soldadura por Fricción: Se produce utilizando el calor generado por la fricción obtenida entre un elemento que se mantiene rotando y un elemento estacionario sujetos a una fuerza de contacto. Existen tres modalidades:

- Velocidad de rotación relativamente lenta con una alta fuerza de contacto.
- Velocidad de rotación alta y una fuerza baja de contacto.
- Utilización de un volante que se desconecta de la fuente de movimiento, antes de iniciar la unión (Soldadura por inercia).

Soldadura por Forja: Las partes que son soldadas son llevadas a un estado pastoso por medio de un calentamiento independiente del proceso y la soldadura se completa por medio de golpes a presión. Se utiliza en la fabricación de tuberías. Es de los métodos más antiguos de soldadura.

Soldadura por Laser: La soldadura con rayo láser (LBW, de *laser beam welding*, en inglés) usa un rayo láser de alto poder como fuente de calor, y produce una soldadura por fusión. Como el rayo se puede enfocar en un área muy pequeña, tiene una alta densidad de energía y, por consiguiente, puede penetrar espesores considerables. Este proceso es adecuado especialmente en la industria automotriz, la soldadura de componentes de transmisiones es su aplicación más difundida. Se aplica en piezas delgadas para componentes electrónicos.

Soldadura por Haz de electrones: La característica principal de este proceso es la capacidad de concentrar una mayor cantidad de energía en zonas reducidas. Esta elevada densidad de energía se consigue mediante la concentración de un haz de electrones de alta velocidad, el impacto de estos electrones sobre la pieza incrementa la temperatura. El proceso se realiza en una cámara de vacío para evitar la dispersión de los electrones.

Soldadura por arco eléctrico.

Es uno de los procesos de más amplia aceptación por ser de los más económicos y prácticos al momento de la unión de dos metales. El soldador selecciona (de acuerdo con factores como composición química, espesor de la pieza, tipo de unión) un electrodo, con la tierra del equipo de soldadura sujeta la pieza de trabajo y modifica el amperaje de salida con lo que se crea un arco eléctrico entre el electrodo y la pieza [1,2]. En seguida el electrodo se mueve a lo largo de las líneas de unión del metal a soldar dando, el tiempo necesario para que el metal contenido en el electrodo llegue a fundirse. El metal fundido procede a depositarse en la junta, uniendo las fronteras de la pieza al solidificar.

Existen varios procedimientos de soldadura por arco, de los cuales la soldadura por arco de carbón es la primera técnica moderna de soldadura donde se utilizaba un electrodo de carbón puro y como este no se consumía en el transcurso del proceso era necesario la adición de material de aporte, actualmente ha pasado a ser un proceso utilizado ampliamente para el corte o ranurado de metales. Para mejorar los resultados ofrecidos por el proceso anterior, esta técnica evolucionó rápidamente y se desarrolló la soldadura por arco metálico [4]. Al principio los electrodos constaban de una varilla de metal desnudo, pero esto acarrea problemas al tratar de estabilizar el arco, por lo que fue necesario la creación de un recubrimiento (comúnmente llamado fundente) el cual facilitaba el mantenimiento del arco eléctrico a lo largo de toda la unión, este cambio condujo al proceso conocido como soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido (SMAW, por sus siglas en inglés). Al calentarse el fundente reacciona químicamente formando una barrera protectora en torno al arco y esto cubre al metal fundido impidiendo que gases como oxígeno y nitrógeno en conjunto con el metal fundido formen óxidos y nitruros que debilitarían la unión.

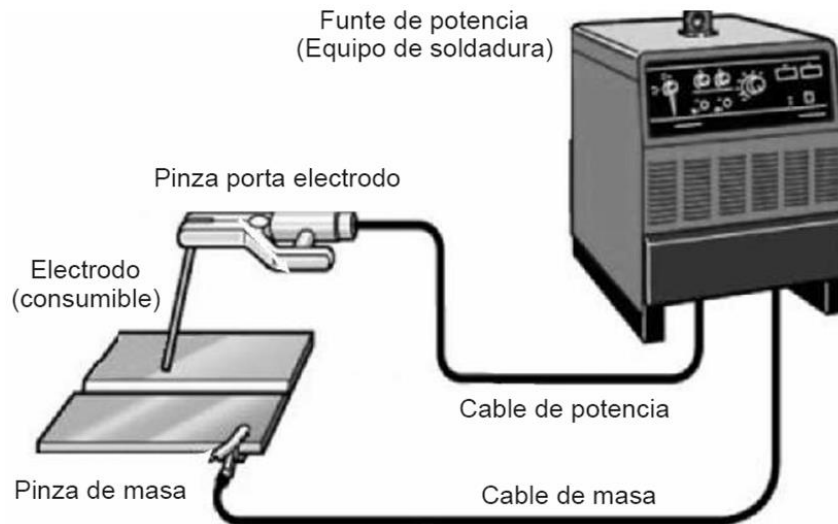


Figura 2. Esquema de equipo de soldadura por arco eléctrico [18].

Soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido (SMAW).

La soldadura por arco eléctrico con electrodos revestidos es un proceso en el que la fusión del metal se produce gracias al calor generado por un arco establecido entre el extremo de un electrodo y el metal base de la unión a soldar.

El material de aporte se obtiene por la fusión del electrodo en forma de pequeñas gotas y la atmosfera de protección se genera por la descomposición del recubrimiento en forma de gases y en forma de escoria líquida que flota sobre el baño de fusión y, posteriormente, solidifica [1].

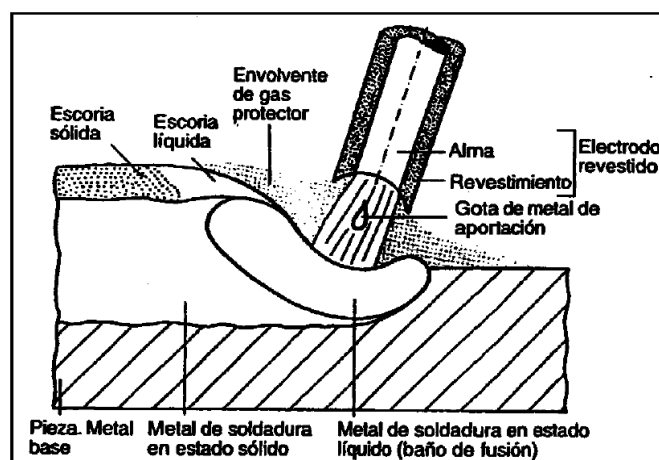


Figura 3. Esquema del proceso SMAW [3].

Es uno de los procesos de mayor uso, especialmente en soldaduras de producción cortas, trabajos de mantenimiento y reparación, así como en construcciones de campo. La mayor parte de aplicaciones se dan con espesores entre 3 y 38 mm (0.12 y 1.49 in).

El proceso es aplicable a aceros al carbono, aceros de baja aleación, aceros inoxidables, fundiciones y metales no ferrosos como aluminio, cobre, níquel y sus aleaciones cambiando las condiciones del proceso principalmente el electrodo utilizado.

Los sectores de mayor aplicación son la construcción naval, de máquinas, estructuras, tanques y esferas de almacenamiento, puentes, recipientes a presión y calderas, refinerías de petróleo, oleoductos, gasoductos y en cualquier otro tipo de trabajo similar [10].

Características de los electrodos revestidos.

El elemento fundamental de este proceso es el electrodo, que produce el arco, protege el baño de fusión y que, al consumirse, produce el aporte del material que une al material fundido con el metal base, construyendo la soldadura.

El electrodo revestido está formado por:

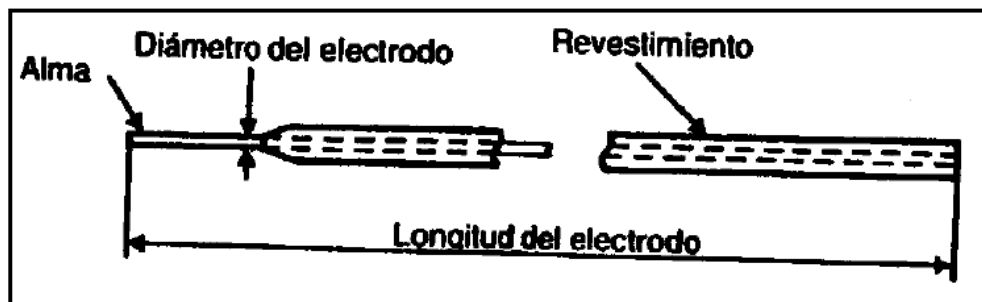


Figura 4. Esquema de un electrodo [4].

- Un núcleo metálico, denominado alma. Es un alambre de sección circular uniforme que sirve como material de aporte. Su composición química varía, y su selección se hace de acuerdo con el material de la pieza a soldar [1].
- El revestimiento es un cilindro concéntrico de espesor uniforme que envuelve el alma del electrodo. Está compuesto por diferentes sustancias químicas que caracterizan el electrodo. Cumple las siguientes funciones:

1. Dirige el arco, conduciendo a una fusión equilibrada y uniforme.
2. Protegen el metal fundido impidiendo la entrada del oxígeno y del nitrógeno del aire, que sería perjudicial para la soldadura. Para ello,
 - Produce gases que estabilizan el arco.
 - Produce una escoria que flota en el metal fundido ayudando a su limpieza, cuando solidifica genera escoria que controla la velocidad de enfriamiento. La escoria protege el metal fundido desde el primer momento de la formación de las gotas. [2]

Se dispone de una gran diversidad de electrodos, cada uno de ellos es seleccionado, dependiendo el material a soldar, de acuerdo con el material de que está constituido su núcleo, así como por la composición del recubrimiento y además por su diámetro. Muchas de las características de operación de los electrodos son atribuidas al revestimiento ya que por lo general el núcleo es del mismo tipo (AISI 1010) para la serie de electrodos más comunes. La AWS. (*American Welding Society*) ha normalizado su diseño y utilización y en la especificación ha adoptado una serie de 4 o 5 números siguiendo a la letra E que significa que es un electrodo para soldadura por arco. Los primeros dos dígitos representan la resistencia a la tracción en miles de PSI, la penúltima cifra fue asignada para la posición en que se debe utilizar (plana, horizontal, vertical y sobre cabeza) y la última cifra tiene varios usos ya que nos indica el tipo de corriente, tipo de escoria, tipo de arco, penetración y presencia de compuestos químicos en el recubrimiento [3,4].

El siguiente esquema ejemplifica lo anterior:

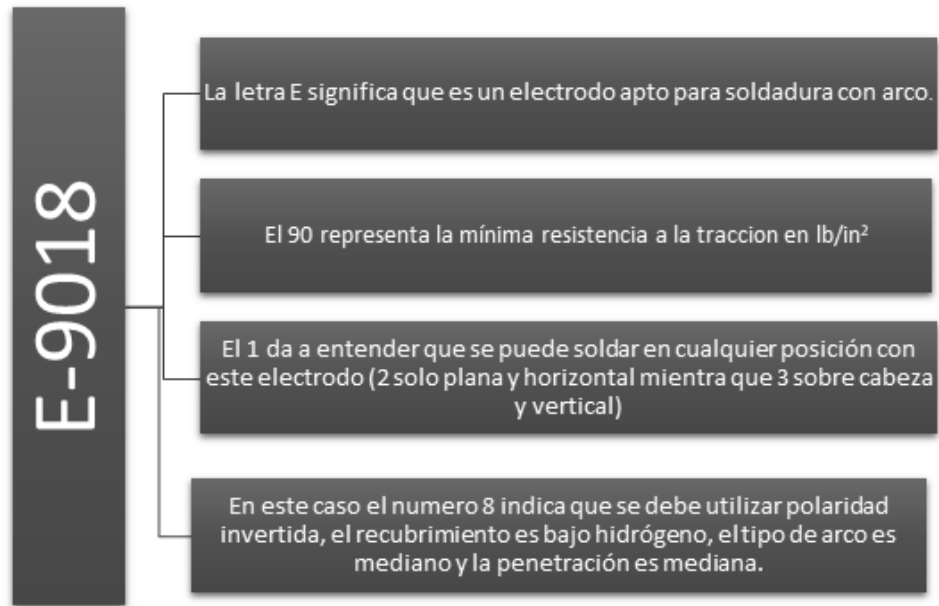


Figura 5. Esquema sobre el significado de cada número en la clasificación de la AWS.

Debido a que el último número representa varias condiciones considerables del electrodo en la Figura 6 se desglosa cada uno de ellos.

ULTIMA	E-XX10	E-XX11	E-XX12	E-XX13	E-XX14	E-XX15	E-XX16	E-XX17	E-XX18
Tipo de corriente	CDPI e+ Polaridad invertida	CA o CD e+ Polaridad invertida	CA o CD Polaridad Directa e-	CA o CD e+ - Ambas Polaridades	CA o CD e+ - Ambas polaridades	CD e+ Polaridad invertida	CA o CD e+ Polaridad invertida	CD e+ Polaridad invertida	CA o CD e+ Polaridad invertida
Tipo de revestimiento	b Orgánico	Orgánico	Rutilo	Rutilo	Rutilo	Bajo Hidrógeno	Bajo Hidrógeno	Bajo Hidrógeno	Bajo Hidrógeno
Tipo de arco	Fuerte	Fuerte	Mediano	Suave	Suave	Mediano	Mediano	Suave	Mediano
Penetración	c Profunda	Profunda	Mediana	Ligera	Ligera	Mediana	Mediana	Mediana	Mediana

Figura 6. Designación del último número en la nomenclatura AWS [18].

En el caso donde el acero utilizado sea de baja aleación es necesario que los electrodos utilizados asemejen la composición química del material a soldar ya que si esto no ocurre puede dar paso a presentar imperfecciones que resulten en una unión defectuosa. Para lo anterior se creó una línea de electrodos especiales los cuales tienen una denominación adicional que consta de una letra al final de la clasificación, estos sufijos estándar de la A.W.S son añadidos para indicar adiciones

específicas de elementos de aleación, por ejemplo un electrodo revestido para soldadura con arco que tenga una clasificación E-7015-A1, es un bajo hidrógeno para todas las posiciones, corriente directa polaridad invertida y que contiene un porcentaje de molibdeno entre 0.40 a 0.65% en peso (promedio 0.50%). En la Figura 7 se muestran las denominaciones más comunes.

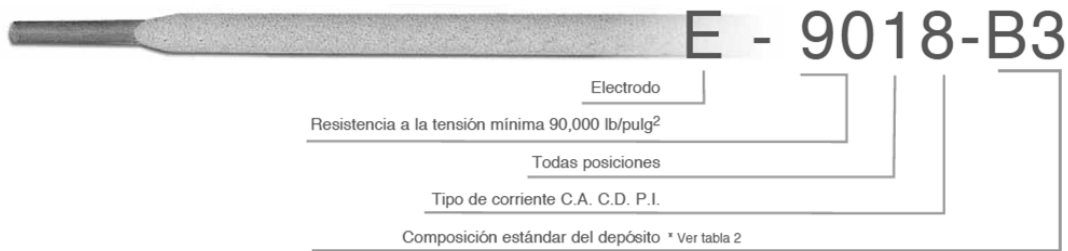


Figura 7. Esquema para un electrodo de baja aleación [2].

ELECTRODO	C CARBONO	Mn MANGANESO	Si SILICIO	P FÓSFORO	S AZUFRE	Cr CROMO	Mo MOLIBDENO	Ni NÍQUEL
9016 B3	0.05 a 0.12	0.9	0.6	0.03	0.03	2.00 a 2.50	0.90 a 1.20	----
9018 B3	0.05 a 0.12	0.9	0.8	0.03	0.03	2.00 a 2.50	0.90 a 1.20	----
7018 A1	0.12	0.9	0.8	0.03	0.03	----	0.40 a 0.65	----
8018 B2	0.05 a 0.12	0.9	0.8	0.03	0.03	1.00 a 1.50	0.40 a 0.65	----
8018 D3	0.12	1.0 a 1.8	0.8	0.03	0.03	----	0.40 a 0.65	0.9
8018 B6	0.05 a 0.10	1.0	0.9	0.03	0.03	4.0 a 6.0	0.45 a 0.65	0.40

Figura 8. Composición química de los electrodos para aceros de baja aleación [2].

Además de verificar la composición química de los electrodos, así como los aspectos técnicos, es necesario checar el diámetro a utilizar ya que de esto dependerá factores como la cantidad de material disponible para el depósito y el poder de penetración.

Metalurgia en la soldadura.

Esta parte del estudio de la soldadura se enfoca en el análisis de los procesos de calentamiento de la pieza a soldar, la fusión tanto del electrodo como de la zona de la interfase, la solidificación de la unión soldada y enfriamiento de la pieza terminada hasta la temperatura ambiente. Este proceso es uno de los métodos más utilizados actualmente para la unión de materiales metálicos y a la vez es el más complejo

desde el punto de vista metalúrgico, ya que intervienen todo tipo de fenómenos durante la generación del cordón de soldadura.

Estos sucesos son sumamente rápidos, si los comparamos con lo que sucede en un proceso común en metalurgia. La estructura de un cordón de soldadura, es el resultado de diferentes pasos, los cuales comienzan con las reacciones en estado líquido y terminan con las reacciones en el estado sólido. En el momento en el que comienza la solidificación se forman diferentes estructuras cristalográficas, después se dan las transformaciones termomecánicas las cuales solo se pueden realizar en un estado sólido para llegar al resultado final.

El objetivo del proceso de soldadura es llegar a una estructura final que proporcione ciertas propiedades mecánicas adecuadas para el uso de la pieza final. Esto se logra a través de las variables de operación. Por el tipo de proceso utilizado se tienen dos tipos de estructuras debido a la naturaleza de los dos fenómenos más importantes en el proceso que son la solidificación del metal de aporte y el enfriamiento del sólido cercano a la zona de fusión [14].

Estructura primaria: La estructura primaria es el resultado de la fundición de los metales. Los metales a soldar pueden ser diferentes y el metal de aporte se escoge teniendo en cuenta las especificaciones finales de la soldadura, ya que gracias a este se pueden incrementar o disminuir ciertas propiedades mecánicas. Para comprender las estructuras cristalinas es necesario tener en cuenta diferentes aspectos que se dan antes y durante la solidificación de la soldadura, como lo son las reacciones metal-gas, las reacciones con fases líquidas no metálicas, como las escorias o los fundentes y las reacciones en estado sólido producidas durante el proceso de solidificación de la soldadura.

El primer fenómeno ocurre cuando comienza el proceso de soldadura al fundirse el material de aporte, en este momento se generan los primeros núcleos y el número de estos empieza a aumentar conforme va solidificando, y a medida que el proceso se desarrolla, la rapidez a la cual se generan los núcleos aumenta, pero al mismo tiempo dichos núcleos empiezan a crecer, lo que produce que en un cierto momento estén tan juntos que este proceso pasará a ser mucho más lento.

El segundo fenómeno representa el crecimiento de los núcleos, en este punto ya no se generan nuevos núcleos si no que los ya existentes aumentan su tamaño aprovechando el metal líquido que aún los rodea, la competencia de crecimiento es uniforme debido a que los núcleos poseen el mismo tamaño por lo que crecen de manera regular [14].

La solidificación en soldaduras es la transformación de líquido a sólido que está gobernada por un proceso combinado de nucleación y crecimiento. El tamaño, orientación y distribución de los granos producidos define las propiedades mecánicas y la estructura final al solidificar.

El crecimiento de los núcleos se da con la misma orientación cristalina que los granos de metal base parcialmente solidificados en la intercara. Este fenómeno recibe el nombre de crecimiento epitaxial (Figura 9). La solidificación epitaxial es el mecanismo común a todos los procesos de soldadura por fusión, posibilitando la coalescencia buscada para tener continuidad entre el metal base y el metal de aporte.

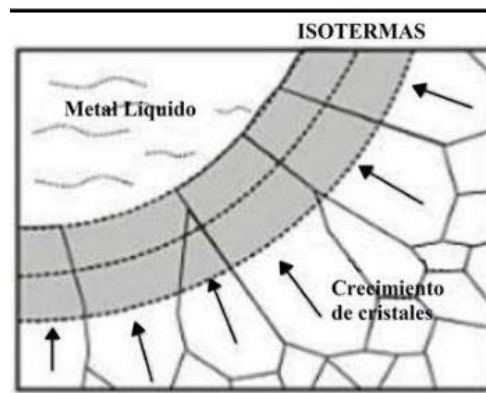


Figura 9. Ejemplo de crecimiento epitaxial [14].

Este crecimiento depende también de la pileta líquida¹ generada durante el cordón de soldadura, en donde la velocidad de avance y la temperatura son factores

¹ se entiende por pileta líquida al baño de metal líquido que se va depositando al fundirse el electrodo.

esenciales, si la velocidad es baja, la pileta tiende a tomar una forma elíptica, mientras que, si la velocidad aumenta, la pileta tiende a alargarse en forma de gota.

En resumen, la forma de la pileta líquida determina la dirección de crecimiento de los granos, así como la velocidad de crecimiento y el gradiente térmico en el líquido. Cuando la pileta de fusión tiene forma de gota, el gradiente térmico máximo permanece casi invariable en su dirección en todos los puntos del frente de solidificación, cuando la pileta de fusión es elíptica, la dirección de gradiente máximo cambia continuamente desde el borde hacia el centro del cordón (Figura 10).

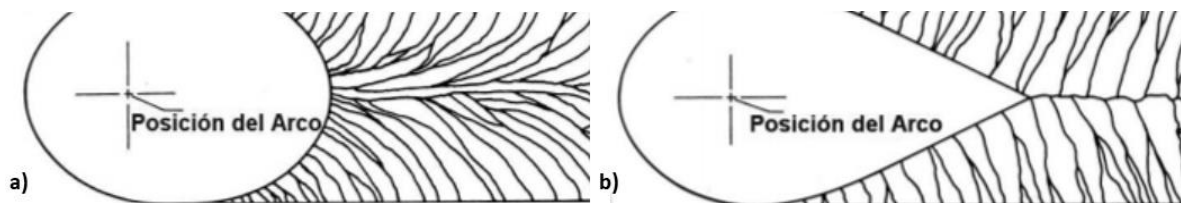


Figura 10. Tipos de pileta. a) Velocidad baja. b) Velocidad alta [14].

Estructura secundaria: Se producen transformaciones de fase en estado sólido que dan origen a la llamada microestructura secundaria. Estas transformaciones son importantes debido a que pueden alterar las propiedades mecánicas de la unión soldada.

Las velocidades de enfriamiento involucradas propician las condiciones para que se den las transformaciones de fase no sean de equilibrio. Por esta razón, no es posible utilizar los diagramas de fase de equilibrio, se recurre entonces a los diagramas TTT (temperatura-transformación-tiempo). Estos diagramas son específicos de cada material ya que se alteran dependiendo ciertos factores como la composición química [10,14].

Otro aspecto que se debe tener en cuenta en la estructura secundaria es el enfriamiento en la zona afectada por el calor (ZAC). La respuesta del área próxima a la línea de fusión en una junta soldada depende de la naturaleza del material soldado y del proceso empleado. Como se ve en la Figura 11 tenemos zonas donde la temperatura no es lo suficientemente alta como para tener transformaciones de fase, pero se pueden dar otro tipo de fenómenos como recristalización o crecimiento de grano, en cambio en otras zonas cercanas al cordón la temperatura es tan alta

que se llega a transformar a austenita por lo que ahí si es posible tener transformaciones de fase de acuerdo a los diagramas TTT.

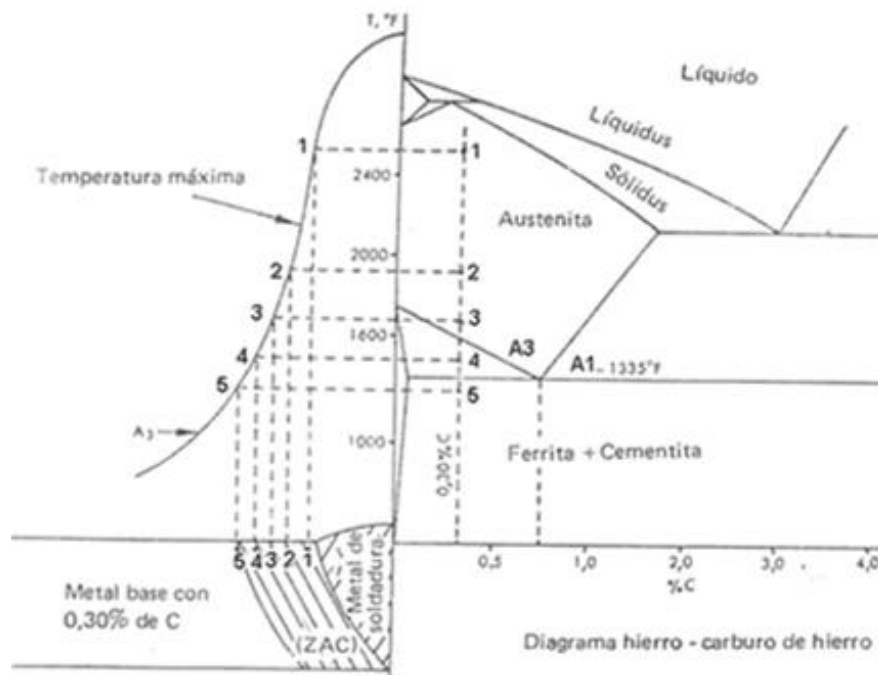


Figura 11. Relación entre las temperaturas experimentadas en la ZAC y su ubicación en el diagrama de fases Fe-Fe₃C [16].

En estas zonas parciales de la ZAC se pueden presentar múltiples estructuras con propiedades diferentes entre sí que dependen de la velocidad de enfriamiento. Las condiciones de soldadura influyen en el enfriamiento, de acuerdo con los siguientes conceptos:

La energía de arco: una mayor energía (Joules/pulgada) provoca menores velocidades de enfriamiento. El uso de electrodos de menor diámetro, una menor corriente de soldadura y una mayor velocidad de avance, son factores para reducir la energía de arco y con ello incrementar las velocidades de enfriamiento.

El espesor del metal base: por lo general un metal base de mayor espesor se enfría más lentamente que otro más delgado. Este efecto está relacionado con la masa de la pieza.

Temperatura del metal base (precalentamiento): la temperatura del metal base, al iniciar la soldadura, tiene fuerte efecto sobre las velocidades de enfriamiento en toda la zona afectada por el calor y en el cordón de soldadura; a mayor precalentamiento corresponden menores velocidades de enfriamiento.

El precalentamiento es un factor importante para obtener una ZAC óptima. Esta operación consiste en el calentamiento de la junta previo a la soldadura, su principal efecto es reducir la velocidad de enfriamiento de la unión soldada y esto permite controlar la microestructura final de la zona ZAC, pero presenta la desventaja de aumentar su extensión.

Para finalizar es necesario tener un buen postcalentamiento el cual consiste en mantener la soldadura a una temperatura mayor a la del ambiente por un lapso de tiempo determinado para aumentar la difusión de hidrógeno. Se busca es disminuir la velocidad de enfriamiento de la junta para que así no se presente la fisuración por hidrógeno, que pueden presentarse en el cordón de soldadura o en la ZAC.

Tensiones residuales.

Las tensiones residuales pueden ser un aspecto de relevancia en la integridad estructural de componentes en servicio, ya que presentan una importante influencia sobre la resistencia a la fatiga, entre otros mecanismos de falla. La formación de tensiones residuales en uniones soldadas se debe a la presencia de campos no-uniformes de deformaciones no-elásticas, como las deformaciones plásticas y térmicas, mientras se efectúa la soldadura [17].

En los procesos de soldadura el aporte de energía está focalizado en una zona concreta, lo que provoca una transferencia de calor. Esta transmisión de calor en los materiales metálicos provoca una distribución de temperaturas y un ciclo térmico característico en la unión soldada. Este ciclo térmico es el primer origen de los cambios micro estructurales, tensiones y deformaciones que se producen y que afectan el comportamiento en servicio de la unión soldada de forma importante, debido a que los campos de distribución de temperaturas que se obtienen son los que determinan las tensiones residuales.

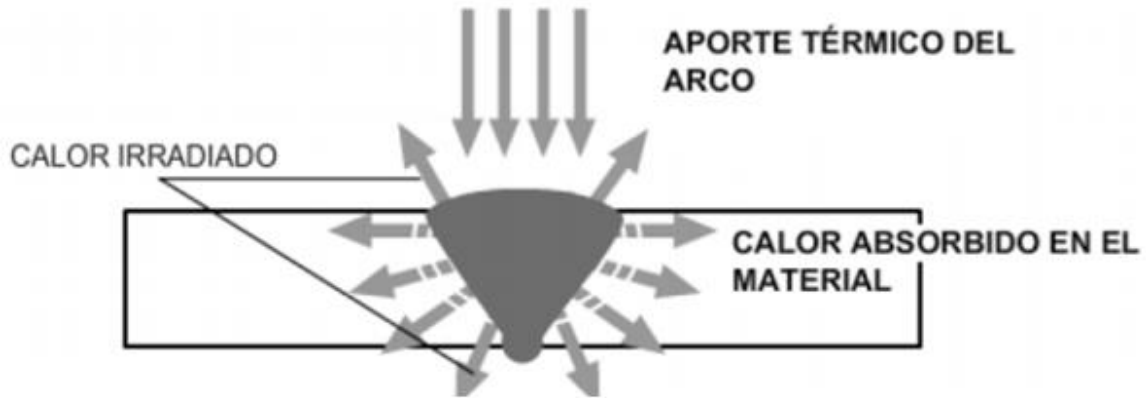


Figura 12. Aporte y distribución del calor aportado por el proceso de soldadura.

La temperatura se distribuye uniformemente por todo el material, desde el punto de fusión alcanzado en el lugar donde se está soldando, hasta la temperatura inicial en las zonas no afectadas por el calor. Estos niveles se llaman isotermas y tienen idealmente forma de elipses, cada elipse representa la línea que une todos los puntos que tienen la misma temperatura en un determinado momento. La forma y el tamaño de estas isotermas dependen de la conductividad térmica del material base y de la velocidad de avance del electrodo que a su vez depende de cada proceso de soldadura.

Durante el avance del cordón se produce una dilatación para cada incremento de temperatura y una contracción para cada enfriamiento del metal, lo que produce a su vez un juego de fuerzas internas de tracción y compresión.

El cordón depositado se contrae inevitablemente en el momento de la solidificación, creando tensiones residuales iniciales por la solidificación. Adicionalmente con el enfriamiento a temperatura ambiente habrá un incremento de las tensiones residuales por la contracción debido al efecto inverso a la dilatación térmica [15].

Las tensiones residuales pueden superar el límite elástico en algunos puntos de los cordones de soldadura y la fractura es en general frágil e inesperada. La combinación de esfuerzos residuales en diferentes direcciones sobrecarga al acero y le producen una fisura sin la deformación normal que suele darse en un elemento sin tensiones residuales.

El riesgo de tensiones residuales se deberá evitar desde el diseño de la estructura, planificando la secuencia más adecuada, evitando los cruces de cordones, buscando soluciones que distribuyan los esfuerzos en lugar de concentrarlos en puntos críticos. La importancia de la adecuada distribución de tensiones radica en que:

- Las tensiones residuales de la soldadura no son visibles
- Las tensiones residuales de la soldadura se pueden presentar en varias direcciones
- Las tensiones residuales de la soldadura pueden ocasionar grietas y fracturas frágiles
- Las tensiones residuales de la soldadura son especialmente peligrosas en tramos cortos con rigidez externa y en espesores gruesos de materia

Tratamientos térmicos para soldadura.

Los tratamientos térmicos realizados antes o después de la soldadura tienen por objetivo conseguir una unión sin heterogeneidades (como fragilidad o tensiones residuales altas) tanto operacionales como metalúrgicos y con propiedades mecánicas adecuadas a las condiciones de servicio. Los tratamientos térmicos de soldadura son:

- **Pre calentamiento:** consiste en calentar las piezas antes de realizar el proceso de soldadura. Este tratamiento modifica el ciclo térmico en el sentido de elevar las temperaturas alcanzadas (facilita la fusión del material, aumenta el tamaño de la zona afectada térmicamente) y disminuir la velocidad de enfriamiento (disminuye el peligro de formación de estructuras frágiles, facilita la posterior difusión de hidrógeno y disminuye el valor de las tensiones residuales).
- **Post calentamiento:** consiste en impedir que la pieza una vez soldada se enfríe por debajo de 250-300 °C, manteniendo esta temperatura durante un tiempo determinado (2 horas aproximadamente). El objeto de este tratamiento es permitir la difusión de hidrógeno.

- Tratamiento térmico post-soldadura: consiste en realizar un tratamiento posterior con el fin de mejorar la tenacidad y eliminar tensiones residuales. Este tratamiento permite igualmente la difusión de hidrógeno.

Distribución de las diferentes zonas de la soldadura.

En la soldadura se tienen diferentes zonas de interés las cuales deben ser estudiadas adecuadamente para identificar los fenómenos que ocurren durante la soldadura, solidificación del material de aporte y la posterior etapa de enfriamiento. Las zonas de estudio se muestran en la Figura 12:

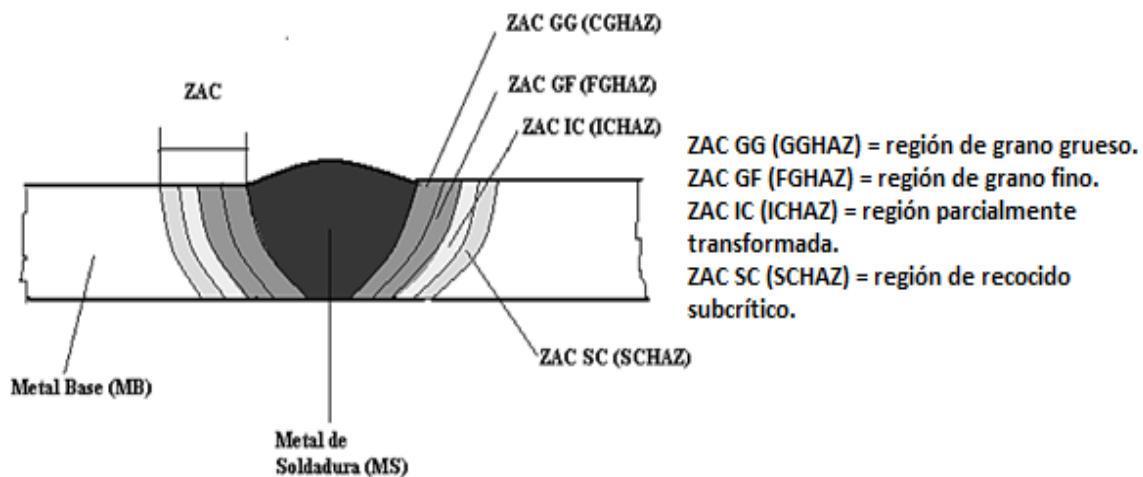


Figura 13. Zonas afectadas en el proceso de soldadura SMAW [11].

La ZAC se subdivide en diferentes zonas dependiendo de las transformaciones en estado sólido que se originan en cada una de ellas.

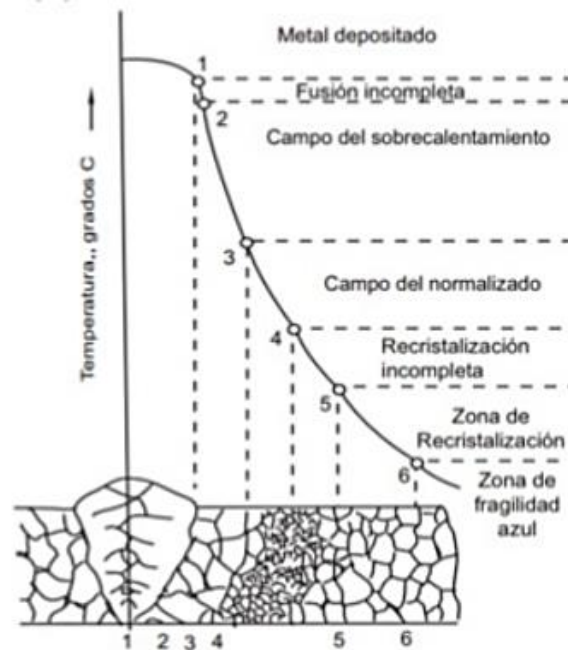


Figura 14. Transformaciones de acuerdo con las diferentes temperaturas a las que se llega en el proceso de soldadura.

La zona adyacente a la línea de fusión está caracterizada por una microestructura de granos gruesos donde la temperatura alcanzada está por arriba de la crítica superior del acero (A_{c3}). El efecto del grano grueso hace más susceptible la propagación de una fisura ya que la tenacidad se reduce en esta región. Además, dependiendo del aporte térmico, la velocidad de enfriamiento y la composición química del acero se pueden formar microconstituyentes duros o frágiles que son sensibles a la aparición de fisuras.

A la región de grano grueso le sigue una región de transformación de fase que determina una microestructura de grano fino, en general, de buenas propiedades mecánicas. Finalmente tiene lugar una región subcrítica con transformaciones parciales, similares a las del recocido subcrítico de un acero, cuyo límite es la aparición de material base no afectado. Las alteraciones estructurales que ocurren en el área afectada por el calor varían con el contenido de C y algunos de los elementos aleantes en el acero.

La ZAC muestra cambios de dureza, sobre todo en aceros sensibles al tratamiento térmico. El incremento de la dureza aumenta la fragilidad y la reducción de la ductilidad. En aceros con bajo contenido de carbono y elementos aleantes la zona

cercana a la soldadura no se ve tan afectada en su resistencia, en cambio, aceros al carbono o aleados con cromo, molibdeno, níquel, manganeso, es posible encontrar cierto tipo de estructuras fuera del equilibrio y estos cambios ocasionan que esta zona tenga cambios en cuanto a propiedades mecánicas se refiere.

Es necesario señalar que al aplicar varios cordones de soldadura se produce un efecto de refinamiento de la microestructura del cordón como consecuencia de un calentamiento por encima de la temperatura de transformación, por la acción del material depositado por encima. Este efecto de tratamiento térmico produce una recristalización con refinamiento de grano, mejorando notablemente la tenacidad de la soldadura.

Condiciones para una buena calidad de soldadura.

Para una buena calidad de soldadura se necesitan considerar una serie de parámetros los cuales intervienen directamente al momento de soldar como lo son:

- **Diámetro del electrodo:** En general, se deberá seleccionar el mayor diámetro posible que asegure los requisitos de aporte térmico y que permita su fácil uso, en función de la posición de la unión, el espesor del material y el tipo de unión, que son los parámetros de los que depende la selección del diámetro del electrodo. Se deberá emplear:
 - Electrodo de poco diámetro (2; 2,5; 3,2; 4 mm) en: punteado, uniones de piezas de poco espesor, cordones únicos, soldaduras en posición cornisa, vertical y bajo techo, y cuando se requiera que el aporte térmico sea bajo.
 - Electrodo con mayores diámetros para: uniones de piezas de espesores medios y gruesos, soldaduras en posición plana y recargues.
- **Intensidad de corriente:** Cada electrodo, en función de su diámetro, posee un rango de intensidades en el que puede utilizarse. Si se manejan intensidades por encima de este rango, se producirían proyecciones, intensificación de los efectos del soplo magnético, e incluso grietas. La intensidad por utilizar depende de la posición al soldar y del tipo de unión.

- Longitud del arco: La longitud del arco a utilizar depende del tipo de electrodo, su diámetro, la posición de soldadura y la intensidad de corriente. En general, debe ser igual al diámetro del electrodo, excepto cuando se emplee el electrodo básico, que deberá ser igual a la mitad de su diámetro. Es conveniente mantener siempre la misma longitud de arco, con objeto de evitar oscilaciones en la tensión e intensidad de la corriente y con ello una penetración varia.
- Velocidad de desplazamiento: La velocidad de desplazamiento durante la generación del cordón debe ajustarse de tal forma que el arco adelante ligeramente el baño de fusión. Cuanto mayor es la velocidad de desplazamiento menor es la anchura del cordón, menor es el aporte térmico y la velocidad de enfriamiento será mayor. Si la velocidad de desplazamiento es excesiva se producen mordeduras, se dificulta el retiro de la escoria, y se favorece el atrapamiento de gases (produciéndose poros).
- Precalentamiento: Consiste en llevar la pieza a una temperatura determinada, antes de iniciar la soldadura. Se consigue obtener dos efectos, que mejoran la ejecución de una buena soldadura:
 - Al estar caliente toda la placa o pieza, se evita que las zonas frías absorban violentamente el calor de la zona soldada, enfriándola rápidamente y, en consecuencia, produciendo zonas duras y frágiles.
 - Al estar caliente toda la placa al término de la soldadura, el enfriamiento de toda la pieza es uniforme produciéndose en forma lenta, ya que no existe absorción de calor de la zona soldada por las zonas alejadas al cordón.

Soldabilidad.

La soldabilidad es la capacidad de un material para ser soldado bajo ciertas condiciones impuestas y resultar en una microestructura específica y apropiada, sin presentar transformaciones de fase perjudiciales, tensiones o deformaciones que puedan ocasionar curvaturas.

Se define como una propiedad que mide la capacidad del material de dejarse unir en forma técnica y económica con los procesos y técnicas de soldadura mediante procedimientos adecuados que aseguren la calidad del depósito de soldadura

acorde con las especificaciones establecidas en el diseño. El grado de soldabilidad está determinado en gran manera por la sanidad del material y la facilidad de soldarse sin necesidad de recurrir a procedimientos previos, durante y post soldadura.

La soldabilidad de un material constituye una propiedad muy compleja y en muchas ocasiones queda condicionada a variaciones metalúrgicas y sus propiedades. Esto quiere decir que muchas de las ocasiones que se estudia esta propiedad los resultados son más que nada cualitativos y de no tener un buen resultado en condiciones normales (sin aplicar un calentamiento) se recomienda realizar un tratamiento pre, durante y post soldadura.

Para realizar un estudio de manera que dé resultados de mayor impacto es necesario estudiar la soldabilidad desde tres aspectos:

- **Soldabilidad metalúrgica:** Es la capacidad de los materiales de no presentar transformaciones fase en las diferentes zonas de la soldadura o variaciones en las propiedades físico-químicas. Un ejemplo se presenta en el caso de los aceros aleados donde existe la posibilidad de formar estructuras como martensita y en los aceros inoxidable austeníticos, que, al precipitarse los carburos de Cr, disminuye su resistencia a la corrosión.
- **Soldabilidad operativa:** Responde a la operación de soldadura, en lo que respecta a cuestiones tecnológicas y de ejecución de las uniones soldadas por cualquier proceso de soldadura, se refiere a si el proceso de soldadura debe ir acompañado de otros procesos los cuales aseguren la buena calidad de la soldadura. Se tiene el caso del aluminio, aceros aleados al cromo, en donde los óxidos que forman dificultan el proceso de soldadura y se debe por ello recurrir al uso de limpieza, fundentes y técnicas auxiliares.
- **Soldabilidad constructiva:** Se refiere a las propiedades físicas del material base, tales como dilatación y contracción que provocan deformaciones y tensiones, las cuales pueden generar agrietamientos de la unión soldada,

como ocurre en el caso de las fundiciones de hierro que por su poca plasticidad no tiene capacidad de absorber deformaciones y hay que recurrir a tratamientos térmicos de pre y postcalentamiento para evitar disminuir la aparición de este tipo de estos defectos.

En general se puede decir que la soldabilidad es:

- Buena soldabilidad cuando cumple con los 3 aspectos anteriores.
- Soldabilidad regular o condicionada cuando no cumple con alguno de ellos, pero que por medio de soluciones tecnológicas se puede obtener una unión soldada de calidad.
- Mala soldabilidad cuando no cumple con dos o más de los aspectos citados y no se puede resolver para la obtención de buenas propiedades mecánicas y químicas en la soldadura.

Como podemos ver la soldabilidad es una propiedad compleja de los materiales que incluye variables de tipo de diseño, proceso, condiciones superficiales y requerimientos en servicio. Además, estas condiciones se modifican en gran medida al llevar las pruebas de laboratorio a un proceso en condiciones reales por lo que estas pruebas nos dan solo una idea inicial en la comparación de los materiales, procedimientos y procesos de soldadura. Y por lo regular lo que se hace en estudios de soldabilidad es comparar las nuevas aleaciones o procesos de soldadura con los ya establecidos por lo que los resultados obtenidos suelen ser cualitativos. Por lo general las pruebas realizadas tratan de simulaciones acerca del efecto de la temperatura en las diferentes zonas del metal base o pruebas que ponen a prueba la resistencia a la fractura de la unión y saber qué tipo de fractura se presenta en la falla.

Para los aceros se tiene un parámetro que determina la facilidad que se tendrá en un proceso de soldadura SMAW para lo cual es necesario el cálculo del carbono equivalente (CE) que se calcula con la siguiente fórmula: NOTA: el porcentaje utilizado en la fórmula es másico.

$$EC \ 1 \dots \quad CE = \%C + \frac{(\%Mn+\%Si)}{6} + \frac{(\%Cr+\%Mo+\%V)}{5} + \frac{(\%Ni+\%Cu)}{15} \quad [19]$$

Esta ecuación (Ec. 1) relaciona todos los elementos de aleación contenidos en el acero a trabajar. Como regla general, un acero se considera soldable si el carbono equivalente según la fórmula del International Institute of Welding es menor a 0,4%. Un valor mayor a este estaría indicando cómo los elementos de aleación presentes en el acero afectan las transformaciones características favoreciendo la formación de microestructuras susceptibles a fisuración por hidrógeno en la ZAC. El carbono equivalente provee información acerca del tipo de microestructura esperada en la ZAC en función de la velocidad de enfriamiento desde una temperatura máxima.

Si bien resulta un parámetro atractivo para evaluar la soldabilidad de distintos aceros, por sí sólo no es suficiente. Primero debido a que la soldabilidad no es gobernada exclusivamente por la composición química del acero siendo el espesor de la junta un factor a considerar en el momento de seleccionar temperaturas de precalentamiento y/o tratamientos térmicos post soldadura. La soldabilidad también se ve afectada por la historia térmica del material y tensiones mecánicas desarrolladas antes, durante y después de realizada la unión. También, posee un rol importante la adecuada elección del electrodo.

El diagrama de Graville (Figura 15) evalúa solamente la influencia de la composición química de un acero encontrando en el tres zonas:

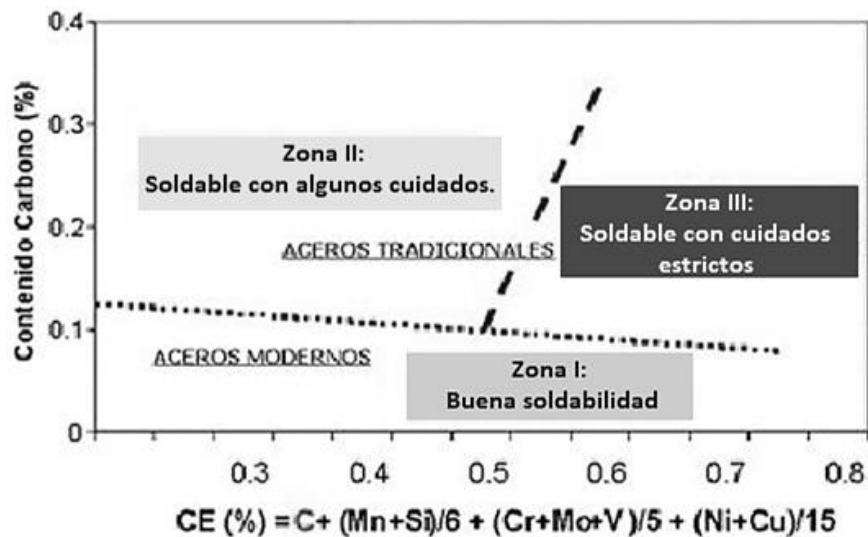


Figura 15. Diagrama de Graville [4].

Zona I: Aceros de bajo carbono y bajo endurecimiento no susceptibles a fisuras.

Zona II: Aceros con mayor porcentaje de Carbono y bajo endurecimiento, el riesgo a fisuras en la ZAC puede ser evitado mediante el control de la velocidad de enfriamiento, por medio del aporte térmico o en menor extensión el pre calentamiento.

Zona III: Aceros con elevado porcentaje de carbono y alto endurecimiento y en todas las condiciones de soldadura pueden producir microestructuras susceptibles a fisuras.

Desde el punto de vista de la selección de los parámetros de soldadura este diagrama indicaría que si por su composición química un acero se ubica en la zona II su soldadura debe involucrar algunos cuidados como son el uso de electrodos con recubrimiento bajo hidrógeno y pre calentamiento, mientras que si un acero es ubicado en la Zona III se deben aplicar cuidados excesivos como son el uso de electrodos con recubrimiento bajo hidrogeno o atmósferas protectoras, pre calentamiento y tratamientos térmicos post soldadura.

En el estudio de la soldabilidad intervienen varias técnicas de análisis (químico, mecánico, metalúrgico) con el fin de tener una perspectiva global acerca del proceso y sus variables. En la Figura 16 se presenta un diagrama que contiene estudios realizados en la evaluación sobre la soldabilidad:

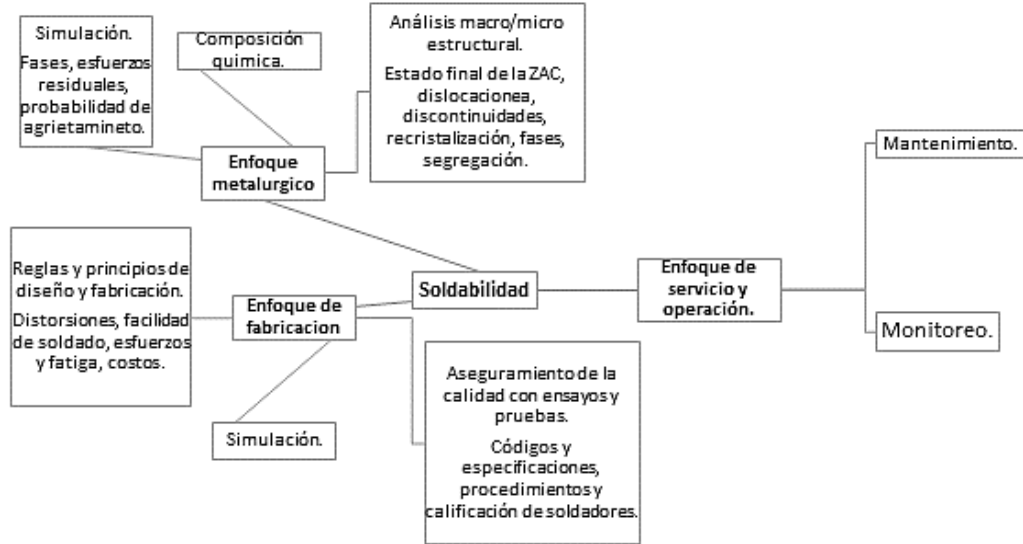


Figura 16. Estudios por realizar para la evaluación de la soldabilidad.

Caracterización microestructural y mecánica del material base, material de aporte y de las distintas zonas afectadas.

En esta fase se preparan las muestras, se realizan soldaduras, ensayos y pruebas mostradas en la Figura 17, requeridas para la caracterización global de la soldadura, así como la determinación del comportamiento mecánico de la unión y estudio microestructural profundo en las regiones de soldadura especialmente en la ZAC.

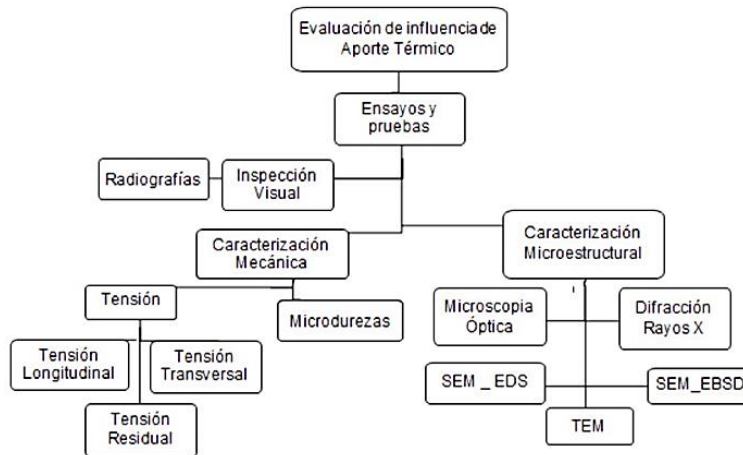


Figura 17. Diagrama de pruebas a realizar para el análisis completo de la unión soldada [4].

Para realizar un buen estudio de soldabilidad se realizan actividades previas a la preparación de las muestras como lo son:

- Ensayos de soldadura para encontrar las condiciones de voltaje, amperaje, velocidad de avance y altura de arco adecuadas.
- Verificación de la preparación del soldador a cargo.
- Revisión del equipo a utilizar para que este en las mejores condiciones.
- Caracterización del material base.

Una vez que se obtuvieron las muestras los siguientes pasos serán:

- Ensayos no destructivos: se realiza con la finalidad de encontrar discontinuidades en la unión soldada que afecten las propiedades mecánicas.
- Caracterizar el depósito: para sustentar la composición química del depósito realizado.
- Barridos de microdureza: para identificar el comportamiento en toda la junta soldada permiten identificar los máximos y mínimos de dureza, homogeneidad y su relación con la posición en cada una de las regiones de soldadura.

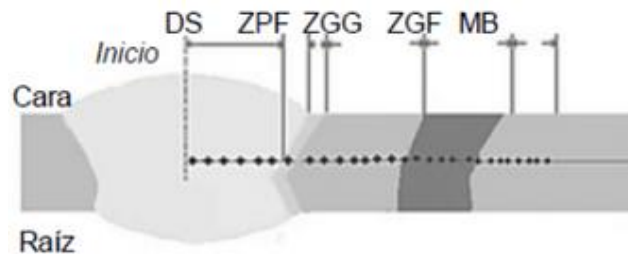


Figura 18. Muestra de cómo realizar el barrido de microdureza [5].

- Análisis metalográfico por microscopía óptica (MO): se analizan áreas grandes e identifican partículas de segunda fase estadísticamente representativas, identificando el tamaño y estado del grano.
- Análisis microestructural con técnicas de microscopía electrónica de barrido (MEB): Esta etapa permite la obtención de imágenes con la señal de electrones secundarios (SE) y retrodispersados (BSE) para estudiar la estructura de granos y subgranos en las regiones de soldadura, así como la identificación de precipitados y partículas de segunda fase.

- Espectrometría dispersiva de energía (EDS): se pueden obtener microanálisis de composición química por EDS con rayos x, en alta resolución para realizar una caracterización de los precipitados y la variación y composición química en la interface y regiones de soldadura. Se puede detectar pérdidas de elementos aleantes e identificar fases en la frontera del grano causantes de fisuración y el desencadenamiento de la corrosión transgranular.
- Difracción de electrones retrodispersados (EBSD): para análisis de texturas y cambios microestructurales en la ZAC que permitan medir el nivel de recristalización en las juntas soldadas para luego correlacionar estos datos con la dureza.
- Análisis microestructural con técnicas de calorimetría diferencial de barrido (DSC): permite caracterizar térmicamente las reacciones de precipitación y analizar la energía de activación durante la recuperación o recristalización de la ZAC.
- Análisis de difracción: Esta fase permite la identificación de fases y textura de grano por medio de un difractómetro de rayos X.

Capítulo 2. Objetivos.

Objetivo general.

Estudiar el efecto del tratamiento de precalentamiento en un proceso de soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido sobre la micro, macroestructura de un acero 9840 y su influencia en las propiedades mecánicas.

Objetivos particulares.

- Establecer un rango de temperatura de precalentamiento, así como las condiciones de operación adecuadas para realizar los cordones de soldadura.
- Verificar la calidad superficial de los cordones de soldadura aplicando la técnica de líquidos penetrantes.
- Establecer si el tratamiento de precalentamiento modifica las propiedades mecánicas en la zona ZAC con barridos de micro y macro dureza.
- Determinar el estado micro y macroestructural de las muestras realizando un análisis metalográfico por medio de microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido.
- Analizar la distribución de elementos en las diferentes zonas afectadas por el proceso de soldadura, así como la formación de segundas fases o precipitados a través de la técnica de espectrometría dispersiva de energía.
- Comparar las propiedades mecánicas entre piezas soldadas sin ningún tratamiento y piezas sometidas al tratamiento de precalentamiento mediante ensayos mecánicos de tensión e impacto.

Capítulo 3. Desarrollo experimental.

Adquiriendo la habilidad de soldar.



Figura 19. Planta de energía y careta de protección utilizadas para soldar.

Una vez que se adquirió la habilidad para soldar las placas de prueba, se buscaron electrodos que fueran compatibles con el tipo de acero a soldar (9840) de acuerdo con la composición química de estos, la elección más adecuada fueron los electrodos E-9018-B3 con un diámetro de 1/8", esto de acuerdo con el catálogo de la empresa INFRA®. Estos electrodos cuentan con un revestimiento bajo hidrógeno y se encuentran sellados al vacío para conservar sus propiedades protectoras.



Figura 20. Electrodo E-9018-B3.

Debido a que la composición química del metal de aporte y revestimiento además de que el diámetro de los electrodos eran diferentes a los utilizados al principio se realizó una segunda ronda de práctica para adecuar las condiciones de soldeo.

Preparación del acero 9840.

Ya que el acero a utilizar venía en lingotes de colada se realizaron cortes longitudinales, utilizando una cortadora de disco, para generar placas. Al no tener cortes completamente parejos se laminaron las placas con el objetivo de que estas tuvieran un espesor lo más parecido posible y estuvieran completamente parejas. Algunos de los pedazos sobrantes de los lingotes sirvieron para fijar las condiciones de soldeo adecuadas (selección del amperaje y electrodo a utilizar).

Con la ayuda de la página “Pre-heat calculator” la cual es un soporte para la soldadura con arco eléctrico se calculó la temperatura mínima de precalentamiento conociendo factores como el carbono equivalente de la aleación, el grosor de las placas, el amperaje, el voltaje y el tiempo utilizado para soldar, así como el tipo de recubrimiento del electrodo a utilizar (bajo hidrógeno). Dando como resultado un valor de temperatura de precalentamiento mínimo de 100 °C. Todo lo anterior mencionado se realizó una vez adquirida la habilidad para soldar.

Ensayo no destructivo de líquidos penetrantes.

Se realizaron los ensayos de líquidos penetrantes en los últimos cordones de práctica generados con el fin de verificar la cantidad de defectos presentes. Como primer paso y debido a la presencia de óxidos en la superficie del cordón se hizo una limpieza utilizando un cepillo de alambre y un solvente orgánico. Terminada la limpieza se deja evaporar el solvente durante 3 minutos para que después se aplique el penetrador y se deje actuar durante 10 min. Por último, es necesario retirar el exceso de penetrador por lo que se realizó nuevamente una limpieza con solvente y pasados 3 minutos se aplicó el revelador.

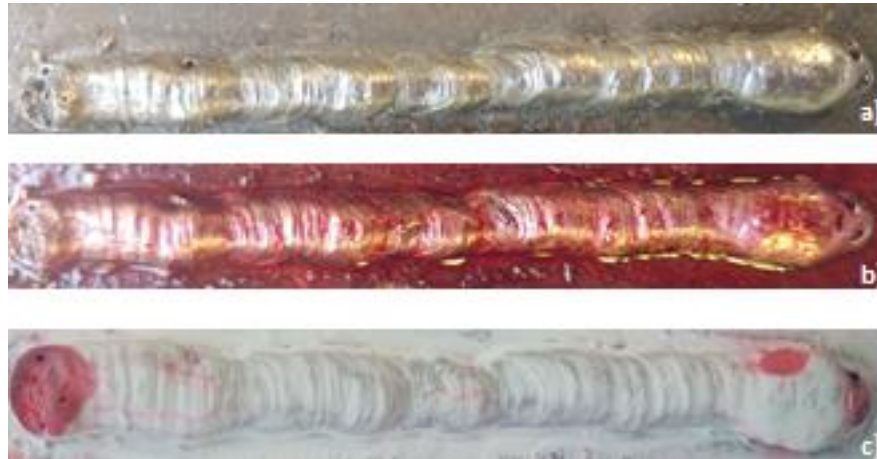


Figura 21. Ensayo de líquidos penetrantes. a) limpieza, b) aplicación de penetrador, c) aplicación de revelador.

Preparación de las muestras.

Con la temperatura de precalentamiento definida se prepararon placas de acero 9840, la primera de ellas se soldó sin aplicar el precalentamiento, la segunda placa fue introducida a una mufla hasta que la temperatura fuera de 120 °C para después generar un cordón de soldadura sobre ella, por último, de la misma forma se precalentó una tercera placa en la mufla, pero en este caso a la temperatura de 150 °C y posteriormente se trazó un cordón de soldadura sobre ella.

También se generó un cordón de unión entre placas de acero 9840, a las cuales se les realizó un bisel simple, a su vez fueron precalentadas a 120 °C y más adelante se unieron aplicando un cordón de relleno.

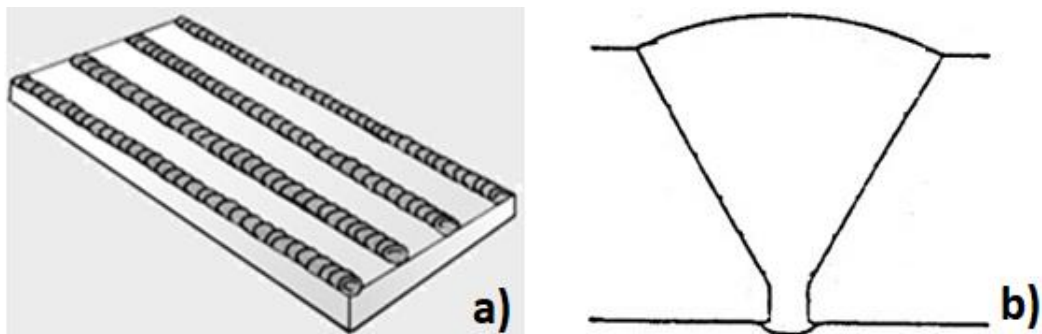


Figura 22. Tipos de cordones realizados. a) Cordones sobre placas, b) Cordón de unión.

Al terminar todos los cordones de soldadura se procedió a analizarlos metalográficamente. Para esto se realizaron cortes transversales con un disco de SiC de las placas para analizar la parte interior de la soldadura. La preparación metalográfica se realizó mediante un desbaste mecánico utilizando lijas de carburo de silicio (SiC) del grado 80 al 2000. Después las muestras se pulieron con un paño fino y alúmina de 1 y 0.3 μm . Debido a que las piezas presentaban porosidad en el material base las piezas se metieron en un baño sónico en alcohol etílico absoluto durante 30 minutos para retirar la alúmina residual. Por último, se reveló la microestructura atacando químicamente las piezas con una combinación de reactivos (Nital 4 y Cloruro Férrico en una proporción 2:1).

Obtención de micro y macroestructura.

Al finalizar la etapa de desbaste mecánico, se atacaron las piezas con Nital 3 hasta obtener la micro y macroestructura, se tomaron imágenes en el microscopio estereográfico con el fin de obtener la macroestructura de las soldaduras en las zonas de interés a diferentes aumentos.

Para obtener la microestructura de las piezas fue necesario utilizar un microscopio óptico y un microscopio electrónico de barrido (MEB), este último para analizar con mayor detalle las distintas zonas, además de identificar posibles precipitados o segundas fases que tuvieran un efecto negativo en la soldadura del acero 9840. Además de obtener las imágenes de la microestructura fue necesario analizar la composición química local por medio de EDS para identificar como se distribuyen los elementos químicos y la posible pérdida de algunos elementos al momento de aplicar la soldadura.

Ensayos de micro y macrodureza.

Después de ser identificadas todas las zonas afectadas por la soldadura por MEB se nivelaron las piezas esto para eliminar irregularidades en la superficie y que los valores de dureza fueran los correctos. Ya niveladas las superficies se tomó la microdureza realizando un barrido para determinar la variación de la dureza en las diferentes zonas y relacionarlo con la microestructura, para esto se utilizó el microduremetro Vickers con 980.7 mN de fuerza y un tiempo de 20 sec. Se tomaron tres mediciones en cada una de las zonas.



Figura 23. Microdurometro Vickers.

Posteriormente se realizaron los barridos de dureza Rockwell de manera horizontal y vertical utilizando la escala de HRC con un indentador de punta de diamante y una carga de 150 Kg.

Ensayo de tensión.

Para esta parte se realizaron cordones de unión en placas de acero 9840, debido al grosor de las mismas fue necesario realizar tres pasadas (se depositaron tres cordones de soldadura uno sobre el otro) para cubrir todo el grosor. El ensayo se realizó en un equipo INSTRON modelo 4206. Antes de colocar las piezas en las mordazas, a cada una de las probetas se les realizó una preparación en la zona de agarre para mejorar la superficie de anclaje y evitar deslizamientos. Posteriormente se ajustaron a las mordazas, se colocó un extensómetro de 1" y se realizó la prueba a una velocidad de 0.5 mm/s.

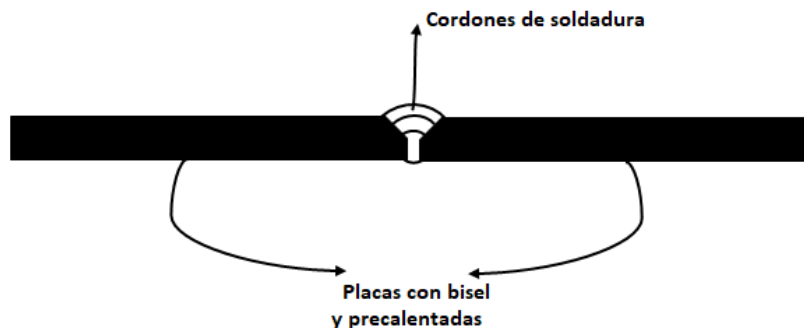


Figura 24. Tipo de unión realizada en las piezas de tensión.

Capítulo 4. Resultados y análisis de resultados.

Control de las variables del proceso.

Práctica con electrodos E-6013.

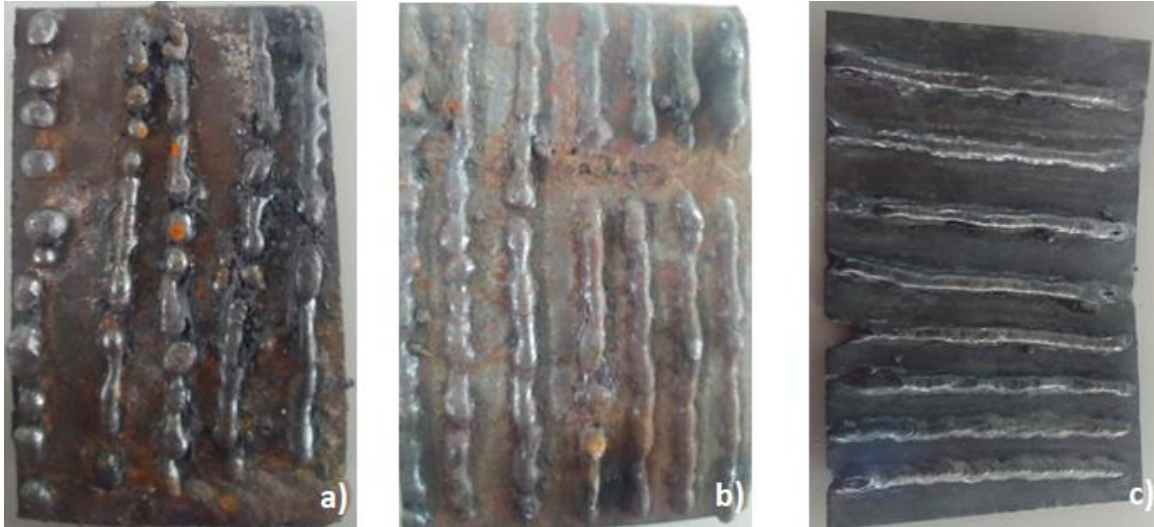
En la Figura 25 se aprecian algunas de las placas utilizadas para practicar cordones de soldadura. El objetivo de esta parte es encontrar las condiciones operativas adecuadas para realizar el proceso.

Es apreciable la mala calidad de las soldaduras en el inciso a, debido a que mantener el arco eléctrico activo es difícil y por lo tanto se pierde la continuidad del cordón (Figura 25-a), esto sumado a una mala selección de amperaje dan como resultado gotas dispersas en lugar de cordones.

Una vez que el amperaje de trabajo es corregido los cordones realizados ya tenían una mayor continuidad era posible conservar el arco eléctrico en una distancia mayor, el siguiente paso fue homogeneizar la altura de los cordones y esto se logra conservando la velocidad a la cual se genera el depósito ya que si la velocidad disminuye la altura aumenta debido a que se deposita una mayor cantidad de material y viceversa. En la Figura 25-b se observa cómo después de corregir las variables antes mencionadas los cordones presentan una misma dirección y continuidad, pero siguen presentando irregularidades.

Para evitar aspectos como que el electrodo se pegara a las placas o la aparición de salpicaduras se corrigió el amperaje de salida en la fuente de energía. Cabe mencionar que se estuvo trabajando con polaridad invertida ya que la tierra tenía la terminal negativa y la terminal positiva era el electrodo.

Para terminar en la Figura 25-c se tienen cordones continuos, con la misma altura a lo largo de todo el cordón y sin defectos apreciables a simple vista, esto se logró debido al manejo de las variables del proceso.



*Figura 25. Evolución en la búsqueda de las variables para generar los cordones de soldadura.
a) Mala calidad, b) Calidad media, c) Buena calidad.*

En este punto se cambiaron las láminas delgadas de acero al carbono por pedacería de acero 9840, proveniente de los sobrantes de las placas generadas para las soldaduras posteriores. En conjunto se reemplazaron los electrodos E-6013 por los electrodos para acero de baja aleación E-9018-B3. Fue necesario realizar ensayos con estos nuevos electrodos ya que debido al diámetro y recubrimiento diferente las condiciones de operación cambiaron situándose de 100 A a 120 A, esto combinado con una menor velocidad de avance.

Como parte final de la práctica se realizaron ensayos del tratamiento, precalentando placas de acero 9840 hasta las temperaturas de 120 y 150 °C (monitoreadas con un termopar) y realizando cordones de soldadura con las condiciones establecidas. Estos sirvieron para acostumbrarse al proceso completo ya que al estar caliente la placa hay dificultades para acomodarla antes de poder soldarla, además que, al sacar la pieza de la mufla, trasladarla al lugar de trabajo y acomodarla la temperatura disminuye por lo que se estableció que las piezas deben tener una temperatura entre 15 a 20 grados por encima de las temperaturas establecidas una vez que salen de la mufla para tener un margen adecuado y realizar el proceso con éxito.

Compatibilidad química del electrodo.

El primer punto que se debe considerar para tener una buena soldadura es la composición química del electrodo ya que esto puede derivar en tener cierto tipo de microconstituyentes o fases indeseables en el caso de una mala elección. La elección adecuada del electrodo es complicada debido a que la variedad de electrodos disponibles es escasa para soldar aceros aleados.

Debido a lo antes mencionado se determinó utilizar un electrodo E-9018-B3, el cual asemeja la composición química del acero 9840. En las tablas 1 y 2, se presentan las composiciones químicas del material base y del electrodo:

Tabla 1. Composición química nominal del electrodo E-9018-B3.

Elemento	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo
%	0.05 a 0.12	0.9	0.8	0.03	0.03	2 a 2.5	0.9 a 1.2

Tabla 2. Composición química nominal del acero 9840.

Elemento	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo
%	0.38 a 0.43	0.7 a 0.9	0.20 a 0.35	0.04	0.04	0.85 a 1.15	0,7 a 0.9	0.3

Es evidente la falta de níquel en la composición química del electrodo, pero esto puede ser compensado con los porcentajes de alto contenido de cromo y molibdeno, ya que estos elementos tienen un efecto similar en los fenómenos ocurridos durante el proceso de soldadura. Cabe mencionar que no solo se buscó en el catálogo de la empresa seleccionada, sino que fueron consultadas varias empresas, sin embargo, la gama de electrodos para aceros de baja aleación es escasa o nula.

El recubrimiento de bajo hidrógeno resultó el adecuado para el proceso debido a dos parámetros: al descomponerse durante el proceso la atmosfera generada provee de una mayor protección al metal depositado evitando que gases penetren en él, el otro beneficio es que este recubrimiento produce una capa de escoria con

un mayor grosor (comparado con el electrodo E-6013) la cual reduce la velocidad de enfriamiento.

Ensayos de líquidos penetrantes.

En la Figura 26 se encuentra el ensayo con líquidos penetrantes en una de las últimas placas de prueba con electrodos E-6013, esto sirvió para determinar que los cordones no tenían defectos en la superficie. Esto porque aunado a una inspección visual donde se verificó que tuvieran una dirección establecida, continuidad y una altura apropiada los cordones no presentaron indicaciones relevantes, aunque algunos de los cordones presentaban indicaciones reveladas por el penetrador solo se trataba de porosidades que se ubicaban al final del cordón de soldadura.

Esto es normal, debido a que por ser el final del cordón el electrodo se levanta para romper el arco eléctrico e impedir que una mayor cantidad de material se siga depositando, aunque con esto también se interrumpe la atmósfera protectora generada por la descomposición del recubrimiento del electrodo por lo que gases como oxígeno y nitrógeno de la atmósfera se disuelven en el metal líquido. Al solidificar, la solubilidad de estos gases disminuye y son expulsados del metal creando burbujas que al juntarse provocan la porosidad indicada en color rojo.



Figura 26. Inspección de cordones con electrodo E-6013.

En la Figura 27 se tienen dos cordones de soldadura realizados con electrodos E-9018-B3. La primera diferencia apreciable, con respecto a los cordones

generados con el electrodo E-6013, es que el ancho del cordón se incrementó debido a que el diámetro del electrodo de baja aleación era mayor. Otra diferencia clara fue que el recubrimiento de bajo hidrógeno del nuevo electrodo genera una capa de escoria de mayor grosor y esta solo se podía retirar cuando la soldadura estaba completamente fría, a diferencia de la escoria del electrodo E-6013 donde una vez aplicado el cordón la escoria se podía retirar fácilmente. Esto es resultado de que el recubrimiento bajo hidrógeno permite tener una mayor protección del metal fundido en el baño metálico para evitar la aparición de porosidad en la soldadura y disminuye la velocidad de enfriamiento del cordón evitando la aparición de fisuras al momento de la solidificación. En estos cordones solo se encontraron indicaciones no relevantes que muestran porosidad al final del cordón por los motivos que se explicaron anteriormente.



Figura 27. Inspección de dos cordones de soldadura con electrodo E-9018-B3.

El cordón de relleno en la Figura 28 no reveló indicaciones que exhiban falta de material de aporte ya que el sangrado de penetrador sería aún más evidente y al igual que los otros cordones la única indicación visible fue la porosidad al final del cordón de soldadura. Sin embargo, no es posible, con esta técnica de ensayo no destructivo, saber si la penetración del material es la adecuada (el estado de la raíz) debido a que los líquidos penetrantes solo proporcionan información acerca de los defectos superficiales. Sería conveniente utilizar una técnica no destructiva diferente como es el caso del ultrasonido o radiografía para verificar este aspecto.

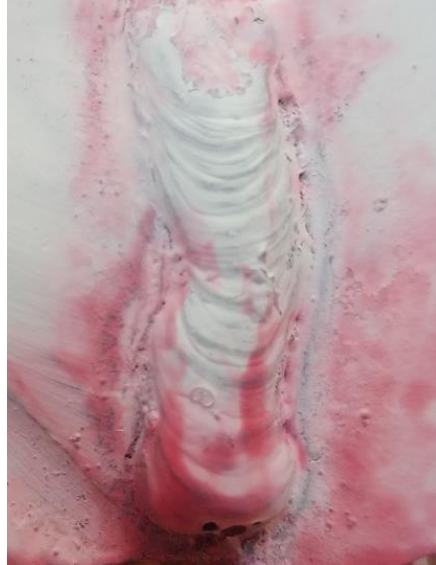


Figura 28. Inspección de un cordón para relleno con electrodo E-9018-B3.

En los cortes transversales de la Figura 29 no se detectó ninguna indicación por medio de esta técnica lo que indica que la soldadura se realizó adecuadamente y que la atmósfera protectora, así como la escoria generada durante el proceso de fusión actuaron eficazmente protegiendo el metal de aporte proveniente del electrodo, previniendo defectos y controlando la solidificación.

Es necesario mencionar que las indicaciones encontradas en las probetas no son significativas por lo que en una revisión de calidad a partir de esta técnica estos cordones de soldadura pasarían la inspección de acuerdo a la norma ASME sección 5 artículo 6².

² Se rechaza la pieza en caso de que las indicaciones encontradas sean de tamaño mayor a 1.5 mm para indicaciones lineales y 5 mm en el caso de indicaciones redondas.

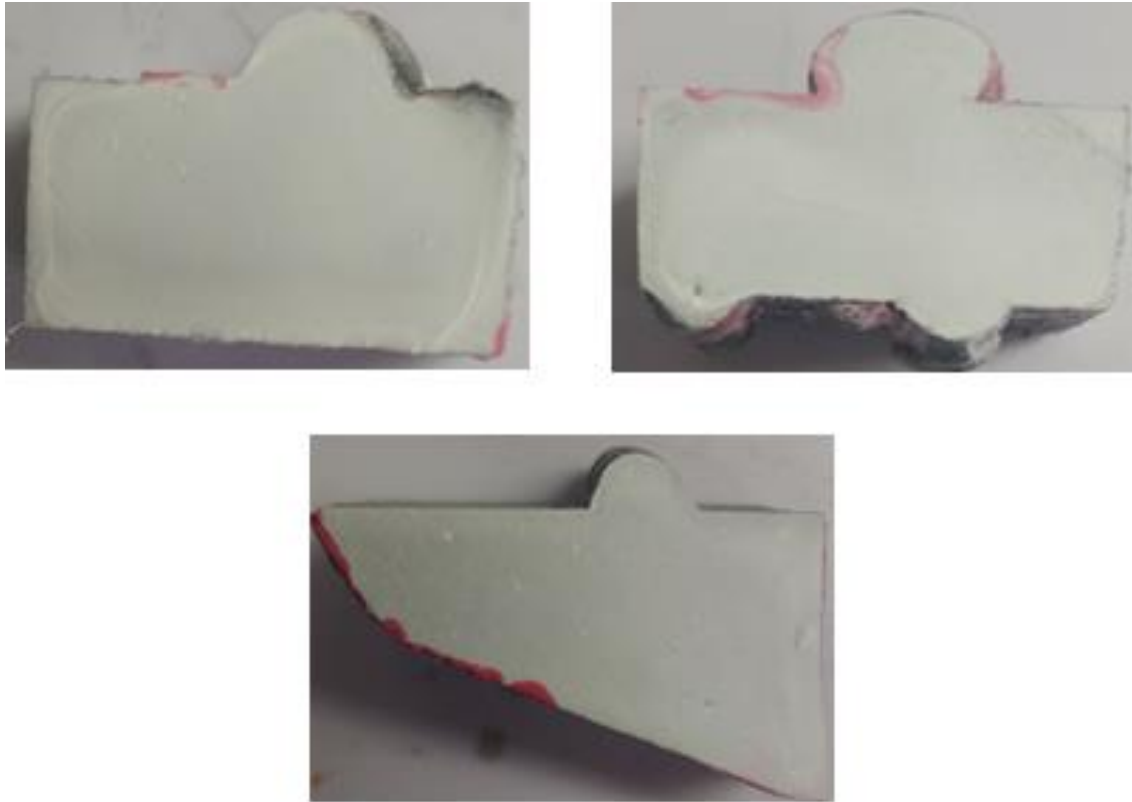


Figura 29. Inspección en cortes transversales de cordones con electrodo E-9018-B3.

Caracterización metalográfica.

Macroestructura.

En la Figura 30 se presenta la macroestructura de la pieza sin precalentamiento, en ella se aprecia el crecimiento de los granos columnares en la soldadura (material de aporte) estos se encuentran direccionados hacia la parte superior del cordón debido a que en la interfase soldadura-medio es donde se extrae el calor generado por el arco eléctrico de manera preferencial ya que el metal base se encuentra a la misma temperatura. Estos granos columnares son finos debido a que la extracción de calor fue rápida durante la solidificación. En el metal base se observan dendritas ya que este material viene directamente de colada. En el caso de la interfase es posible apreciar que esta se encuentra completamente recta mostrando que la compatibilidad entre ambos materiales (metal de aporte y material base) es baja, incluso por aspectos del choque de temperatura tan brusco los bordes del metal de aporte se contraen debido a que empieza a solidificar de manera rápida y no permite que el material de aporte fluya generando puntos de alta tensión. Los puntos

blancos localizados en el metal base son microporosidades dispersas y este defecto es propio del proceso de fundición del acero 9840.

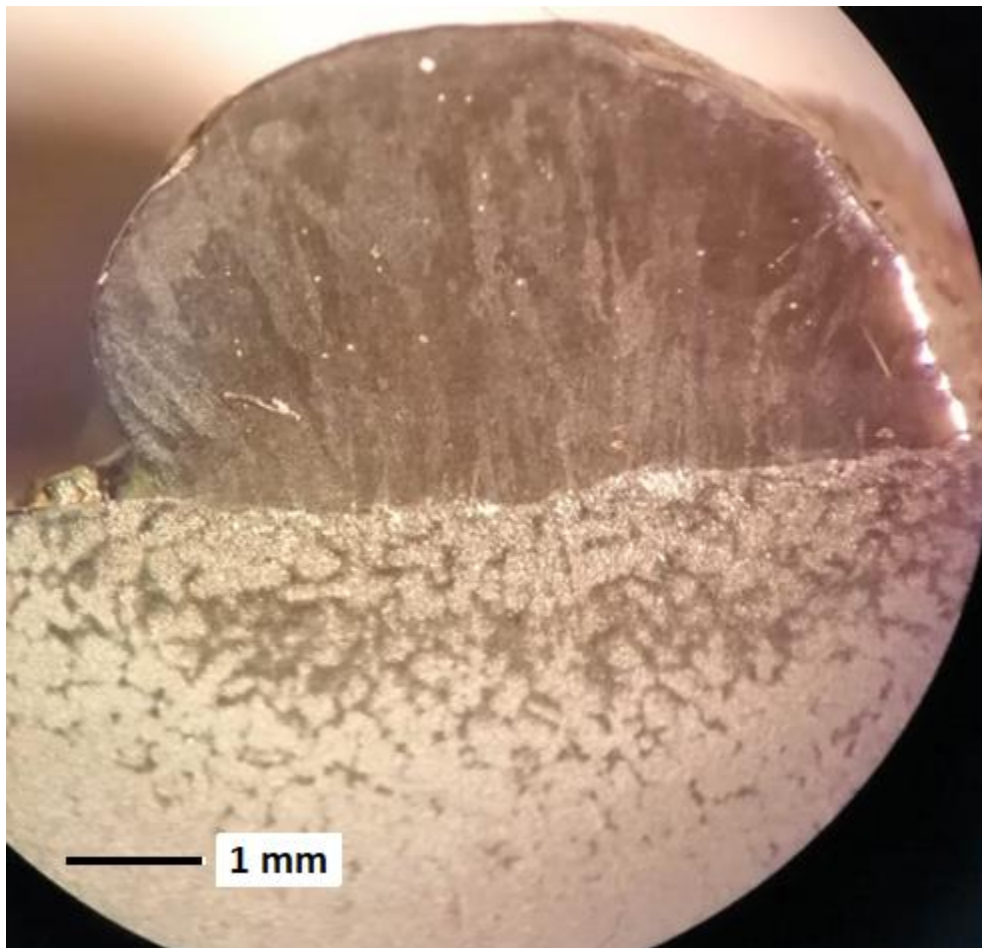


Figura 30. Macroestructura de la pieza sin precalentamiento obtenida con el microscopio estereográfico.

En la Figura 31. Macroestructura de la pieza precalentada a 120 °C obtenida en el microscopio estereográfico., esta sigue presentado una interfase plana, aunque en ciertos puntos empieza a presentar pequeñas curvaturas lo que es un indicativo de que el precalentamiento mejora la unión de la pieza. También se aprecia la dirección de los granos columnares en la parte del material de aporte.



Figura 31. Macroestructura de la pieza precalentada a 120 °C obtenida en el microscopio estereográfico.

En la Figura 32 se presenta la imagen de la muestra precalentada a 150 °C, en ella se aprecia que la interfase ya no es tan plana como en los casos anteriores, ya que esta abarca una cierta porción del material base lo que indica una mayor unión entre el material de aporte y el material base. Debido a lo anterior el precalentamiento cumplió con su función y aunque se podría seguir aumentando la temperatura para tener un mejor comportamiento este ya no sería tan significativo, además, podrían intervenir procesos de oxidación a altas temperaturas en el material base y esto afectaría la calidad de las piezas generadas y aunado a esto el tema económico de los costos de producción aumentarían debido a que el mantener las piezas a esa temperatura implicaría un mayor consumo de energía eléctrica.

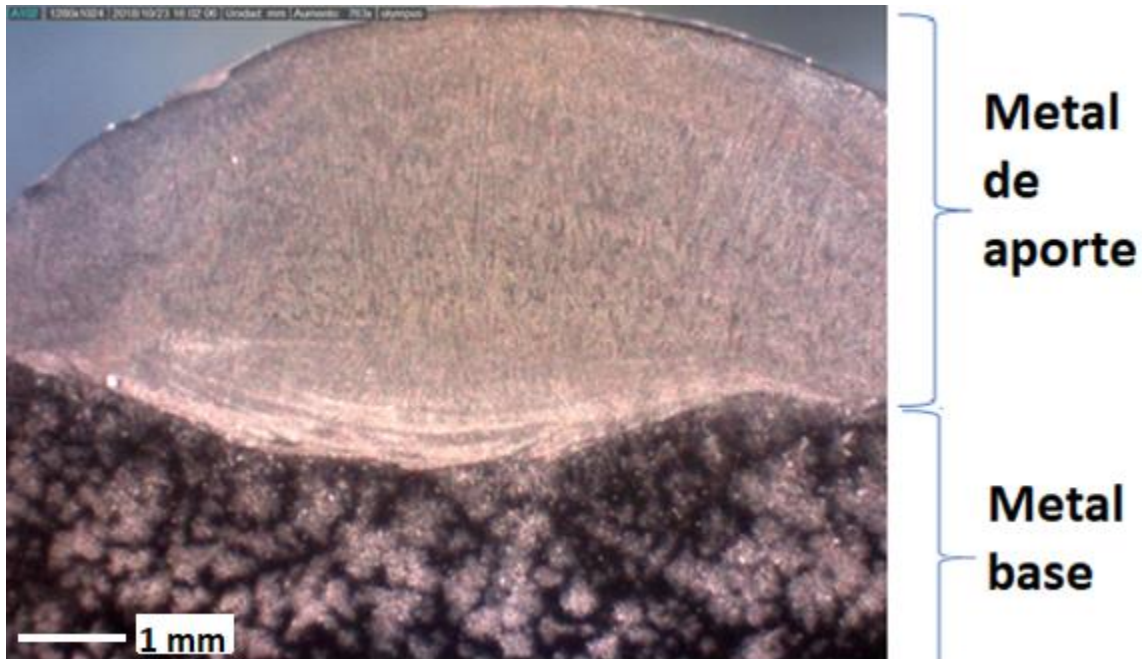


Figura 32. Macroestructura de la pieza precalentada a 150 °C obtenida con el microscopio estereográfico.

En la pieza de unión tipo “v” o unión de junta es precalentada a 120 °C los granos columnares tienen dos extractores de calor (las dos placas) por lo que se tienen dos diferentes orientaciones que chocan en la parte media de la unión donde estos granos pierden la orientación y en lugar de tener granos columnares se tienen granos equiaxiales como se puede ver en las Figura 33 y Figura 34. En estas figuras también se aprecia como es que no se alcanzó a rellenar la raíz de la soldadura (parte inferior del cordón). Puede deberse a varios factores como que el electrodo se apunta hacia a una de las dos placas por lo que el calor es direccionado, también se puede deber a que la velocidad de avance es rápida o que la distancia del arco eléctrico era mayor a lo requerido y el material de aporte no es capaz de fluir hasta el fondo.

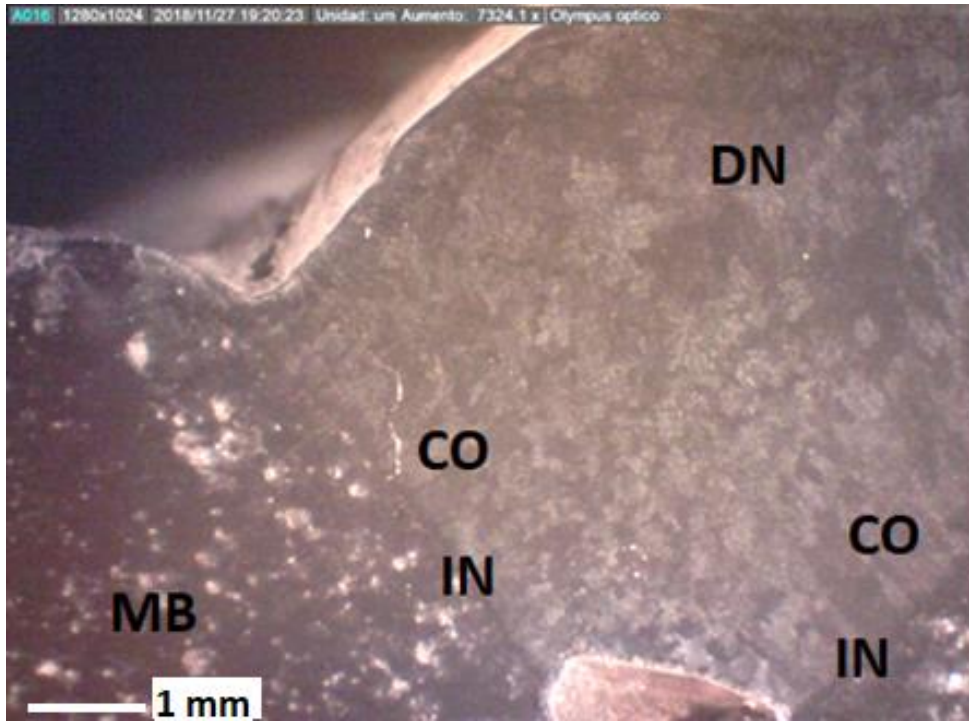


Figura 33. Macroestructura de la pieza de unión precalentada a 120 °C obtenida con el microscopio estereográfico lado derecho. MB=material base, IN=interfase, CO=granos columnares, DN=dendritas.

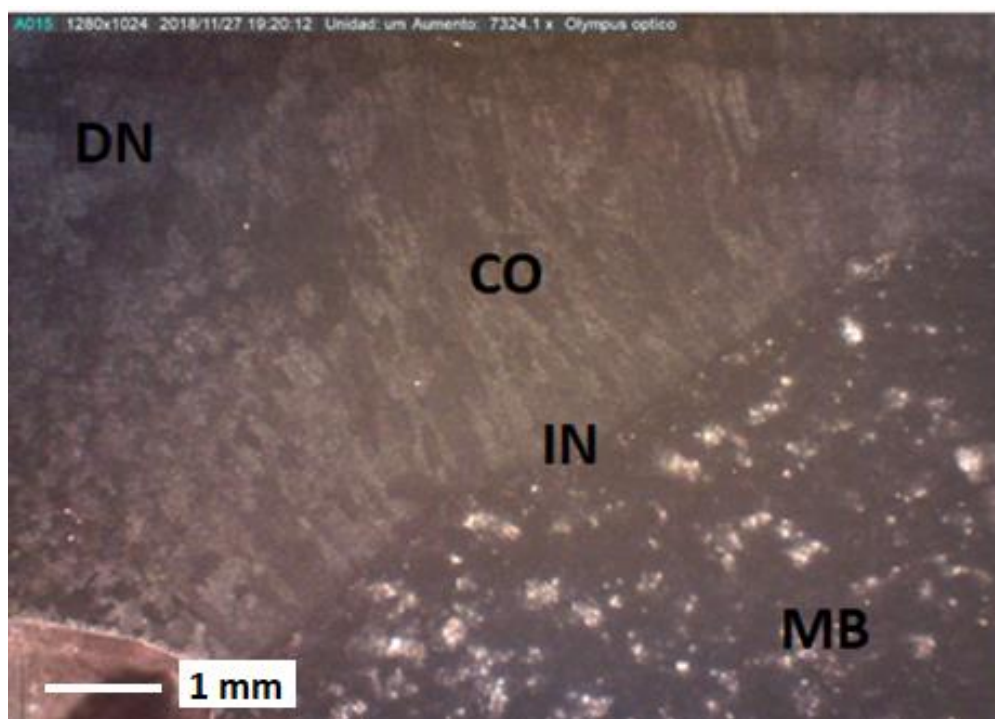


Figura 34. Macroestructura de la pieza de unión tipo "v" precalentada a 120 °C obtenida con el microscopio estereográfico lado izquierdo. MB=material base, IN=interfase, CO=granos columnares, DN=dendritas.

Microestructura.

En el MEB se obtuvieron y analizaron las imágenes de la pieza sin precalentamiento de las Figura 35 y Figura 36. En la Figura 35 se encuentran dos zonas de la soldadura, el material de aporte (Figura 35-a) donde los granos columnares tienen la orientación preferencial hacia la parte superior donde se encontrarían con la capa de escoria que está en contacto con el medio ambiente y la zona afectada por el calor (Figura 35-b), hay presencia de bainitas siendo esta la fase más oscura y la fase clara corresponde a la austenita retenida, aunque existen partes donde el ataque químico no fue parejo.

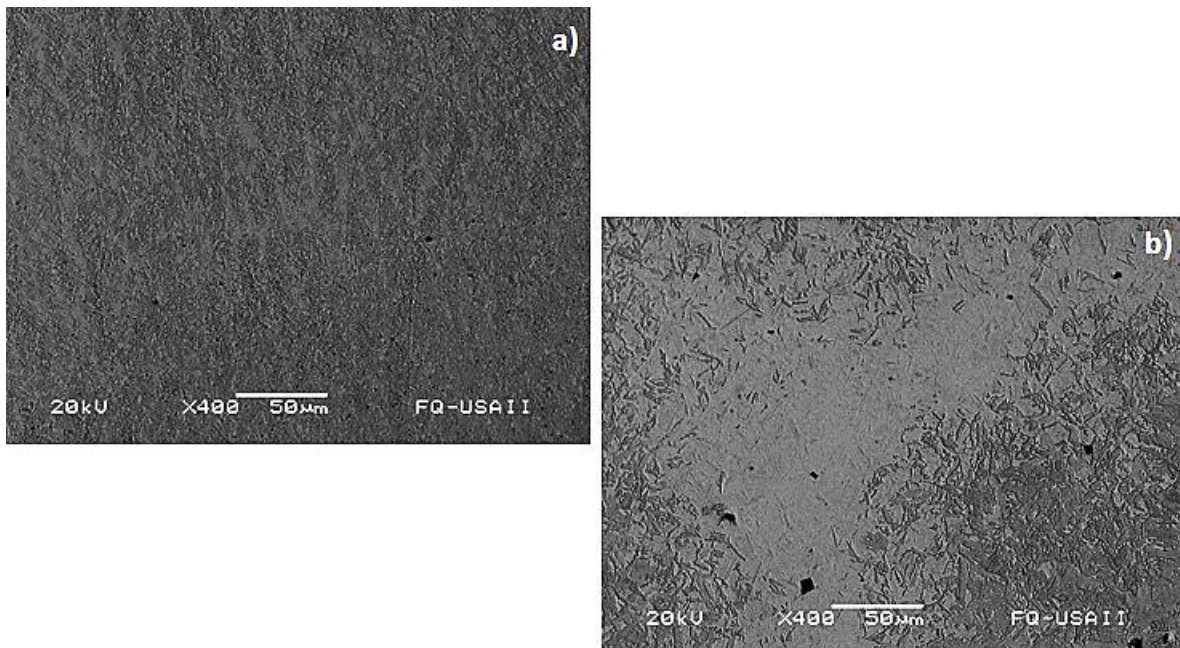


Figura 35. Microestructura de la pieza sin precalentamiento en MEB. a) Material de aporte, b) ZAC.

La Figura 36 presenta la zona de interfase de la pieza sin precalentamiento, se puede observar la presencia de bainitas, esto debido a que la parte del material base que está en contacto con el material de aporte llega a una temperatura tal que alcanza a austenizarse y el enfriamiento al aire es lo suficientemente rápido para generar este tipo de microestructura. Estas son diferentes a las que se presentan en el material base y en la ZAC por la diferencia en la velocidad de enfriamiento de acuerdo a su cercanía con la fuente calor (arco eléctrico).

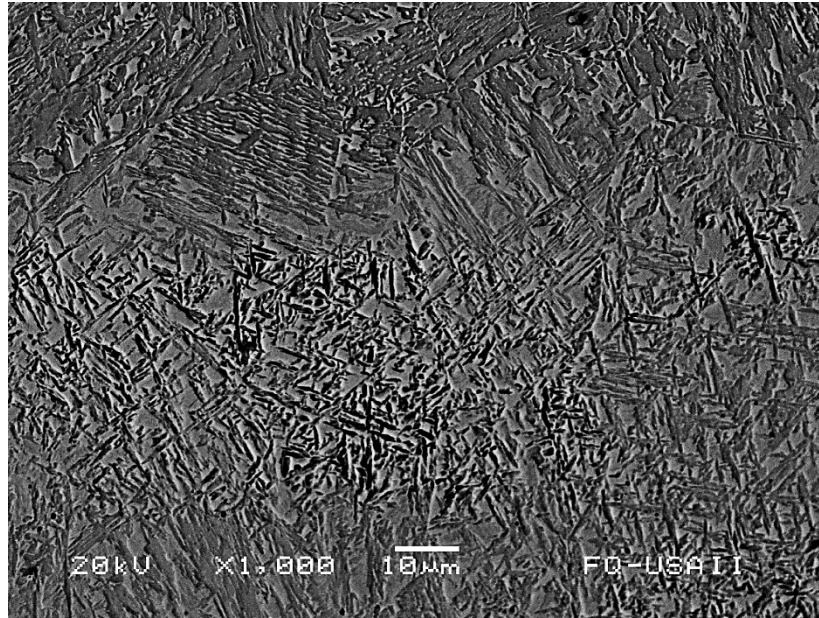


Figura 36. Microestructura en la zona de interfase de la pieza sin precalentamiento en MEB.

La Figura 37 contiene las diferentes zonas de la pieza precalentada a 120 °C, presenta granos columnares direccionados en la parte del material de aporte (Figura 37-a) y la presencia de bainita en la ZAC (Figura 37-b) ya que, por el contenido de Cr, Ni y Mo en la composición química del acero 9840 la templabilidad aumenta y se pueden obtener este tipo de microestructuras con un enfriamiento al aire.

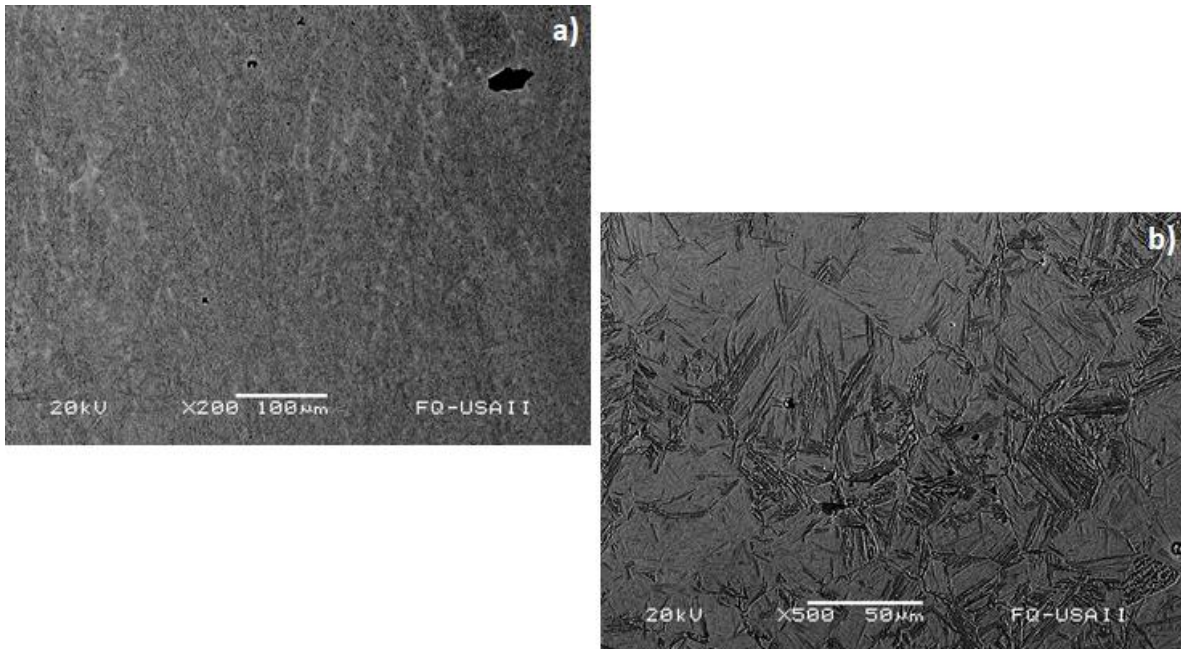


Figura 37. Microestructura de la pieza precalentada a 120 °C en MEB. a) Material de aporte, b) ZAC.

La gran diferencia entre la pieza sin precalentamiento y la pieza precalentada a 120 °C se puede observar en la Figura 38, en donde la interfase entre la zona columnar del material de aporte y la zona bainítica del material base se encuentran completamente unidas.

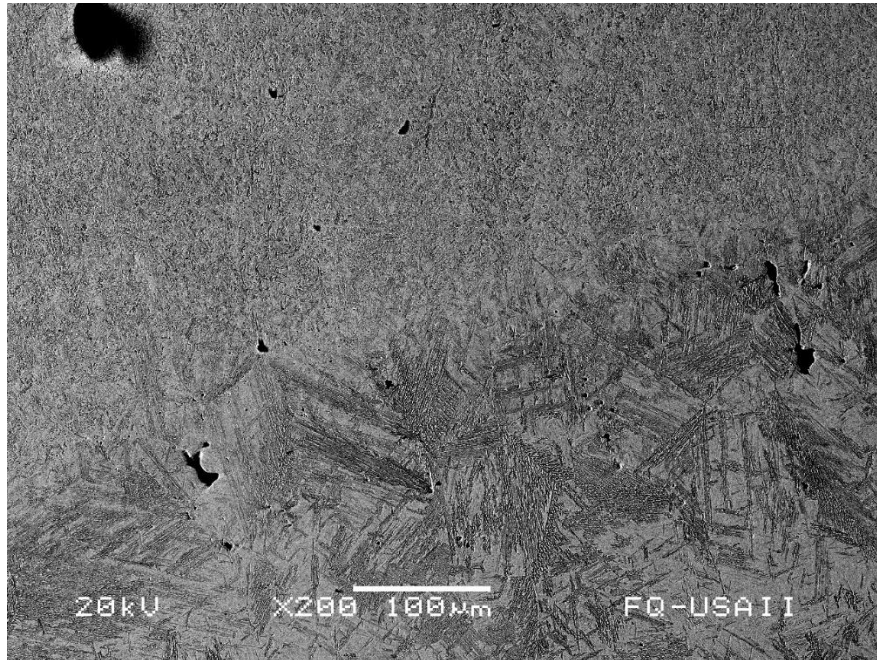


Figura 38. Microestructura de la zona de interfase en la pieza precalentada a 120 °C en MEB.

Con el precalentamiento de 150 °C se obtiene una ZAC que presenta bainita (Figura 39), pero en esta la microestructura se observa más gruesa debido a que esta pieza tiene la menor velocidad de enfriamiento, esto tendrá un impacto directo en la propiedad de dureza.

Debido a que todos los procesos de extracción de calor se realizan de manera más lenta las microestructuras que se obtienen son más homogéneas y por ende las tensiones en la soldadura serán menores.

En la Figura 40 se muestra el cambio de la microestructura de granos columnares en el material de aporte a las bainitas en el material base en particular en la ZAC, con esta temperatura de precalentamiento de 150 °C, se tiene la menor velocidad de enfriamiento que generará granos columnares de mayor dimensión y

microestructuralmente podemos esperar que el cambio de propiedades entre el material de aporte y la ZAC será menos abrupto.

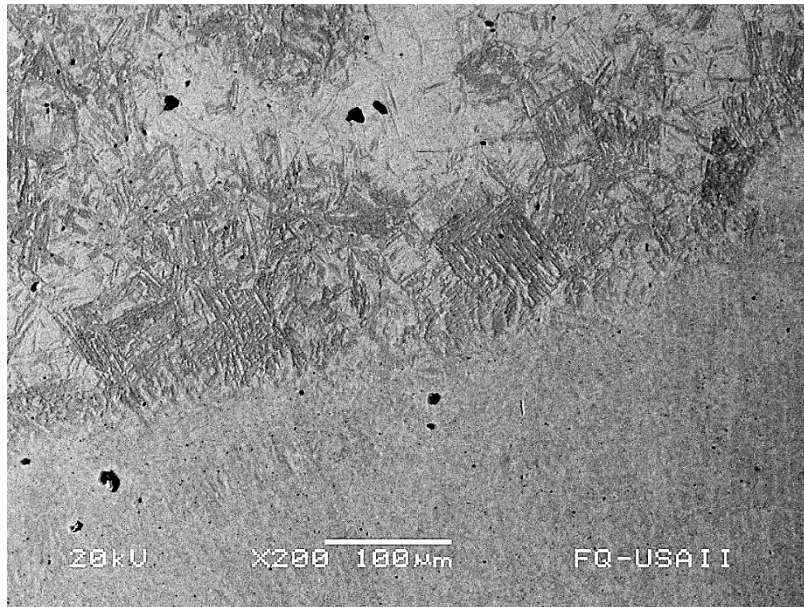


Figura 39. Microestructura de la pieza precalentada a 150 °C en MEB. a) Material de aporte, b) ZAC.

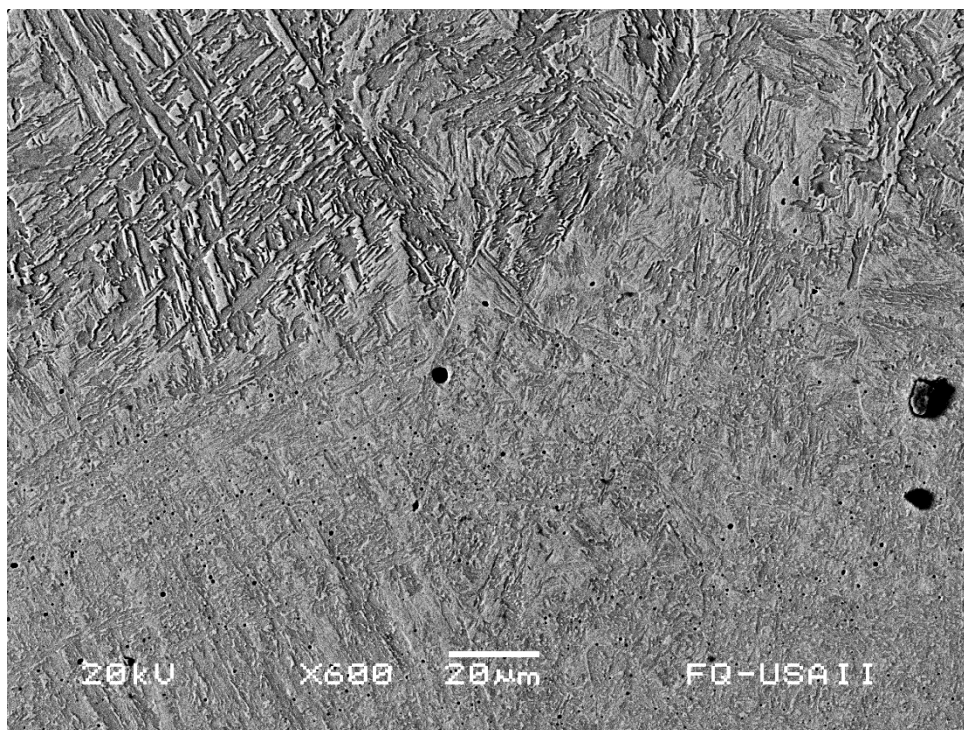


Figura 40. Microestructura de la zona de interfase en la pieza precalentada a 150 °C en MEB.

En las Figura 41 y Figura 42 y se encuentran las imágenes tomadas en el MEB de la pieza de unión tipo “v”, en este caso solo se le prestó atención a la zona de la interfase de ambas placas debido a que el estado tanto del material de aporte como del material base es el mismo presentado en la Figura 35. En este caso es necesario aclarar que las placas soldadas no eran del mismo espesor y por lo tanto una tiene una mayor masa que la otra. Bajo estas condiciones en la Figura 41 la interfase de la placa con mayor masa presenta una mejor transición que la de la placa pequeña (Figura 42). Esto se debe a dos factores uno es que la posición del electrodo direcciona la energía proporcionada por el arco eléctrico apuntando hacia la placa con mayor masa, este aspecto tendría que ver con el proceso de soldadura al momento de generar el depósito, y el otro factor relacionado con este fenómeno es que a mayor masa tiende a absorber una mayor cantidad de calor por lo que la zona de interfase de la placa con mayor masa tiene una velocidad de extracción de calor menor.

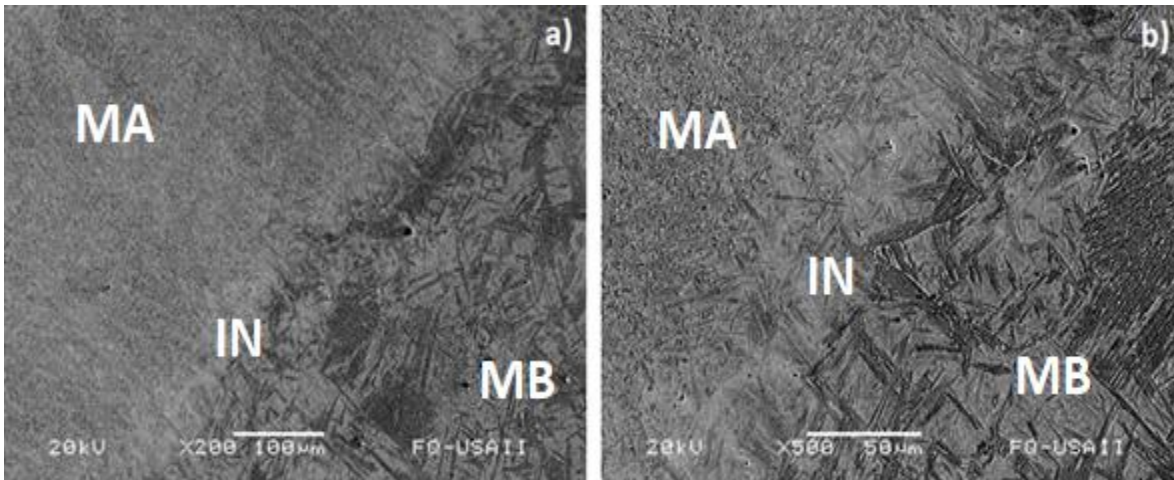


Figura 41. Microestructura en la zona de interfase de la pieza de unión precalentada a 120 C en la placa con mayor espesor en MEB. a) 200x, b)500x. MA=material de aporte, IN=interfase, MB=material base.

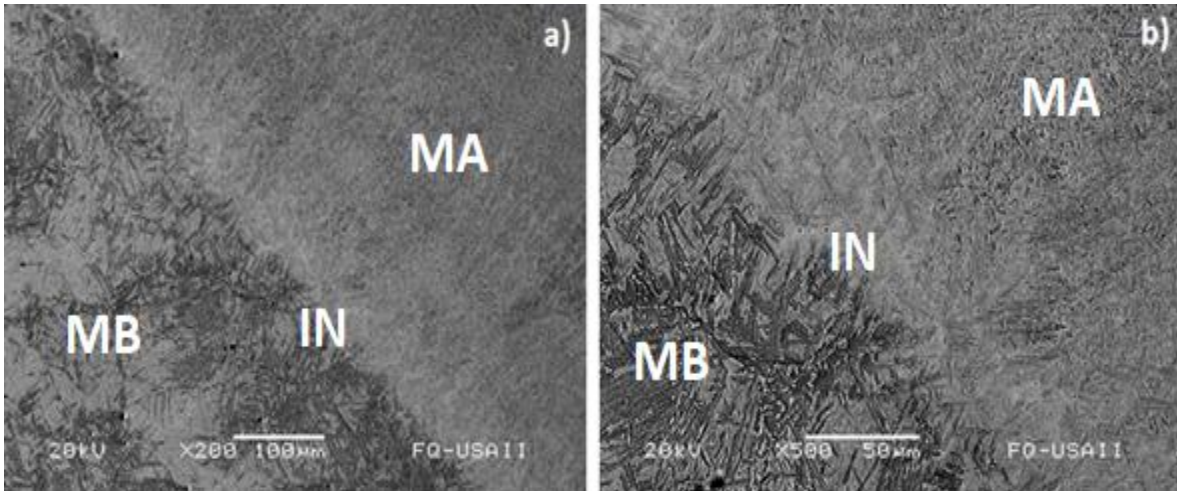


Figura 42. Microestructura en la zona de interfase de la pieza de unión precalentada a 120 C en la placa con menor espesor en MEB. a) 200x, b)500x. MA=material de aporte, IN=interfase, MB=material base.

EDS.

Utilizando esta técnica fue posible observar que ningún elemento contenido en el electrodo se perdió debido al proceso de soldadura ya que el microanálisis realizado en la zona del material de aporte coincide con la composición nominal del electrodo en el caso de la Figura 45.

Un fenómeno que se observa en las Figura 43, Figura 44 y Figura 46 es que el molibdeno solo se encuentra en la zona de interfase debido a que el contenido de este elemento se reduce en las zonas cercanas tanto del material base como del material de aporte y aumenta en la interfase. Este efecto se debe a que el molibdeno se segrega en la primera zona donde solidifica que es la interfase por la rapidez de enfriamiento tan alta y no alcanza a difundir, por este efecto el contenido de este elemento no es homogéneo.

Este efecto se elimina cuando se eleva la temperatura del calentamiento del material base ya que como se muestra en la Figura 45 el contenido del molibdeno ya es homogéneo en la zona del material de aporte, la interfase y el material base.

En el caso del Ni solo se encuentra en el material base, pero eso ya era de esperarse debido a que el electrodo no contenía níquel y a diferencia del molibdeno este no migra hacia la interfase.

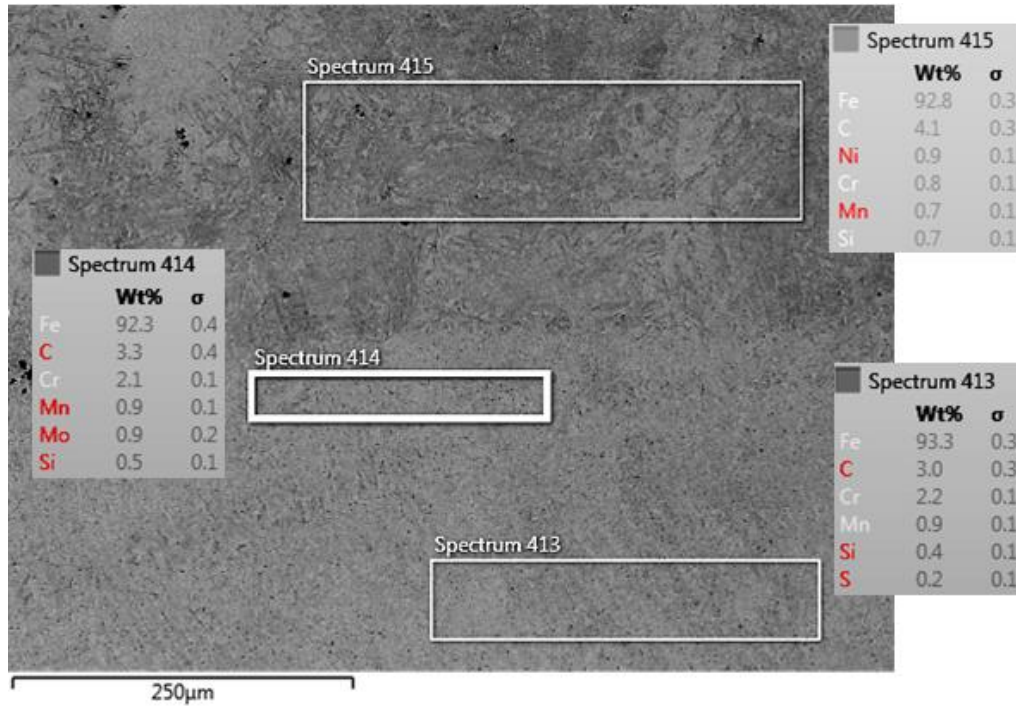


Figura 43. Microanálisis realizado en la pieza sin precalentamiento en las diferentes zonas de interés obtenida por EDS.

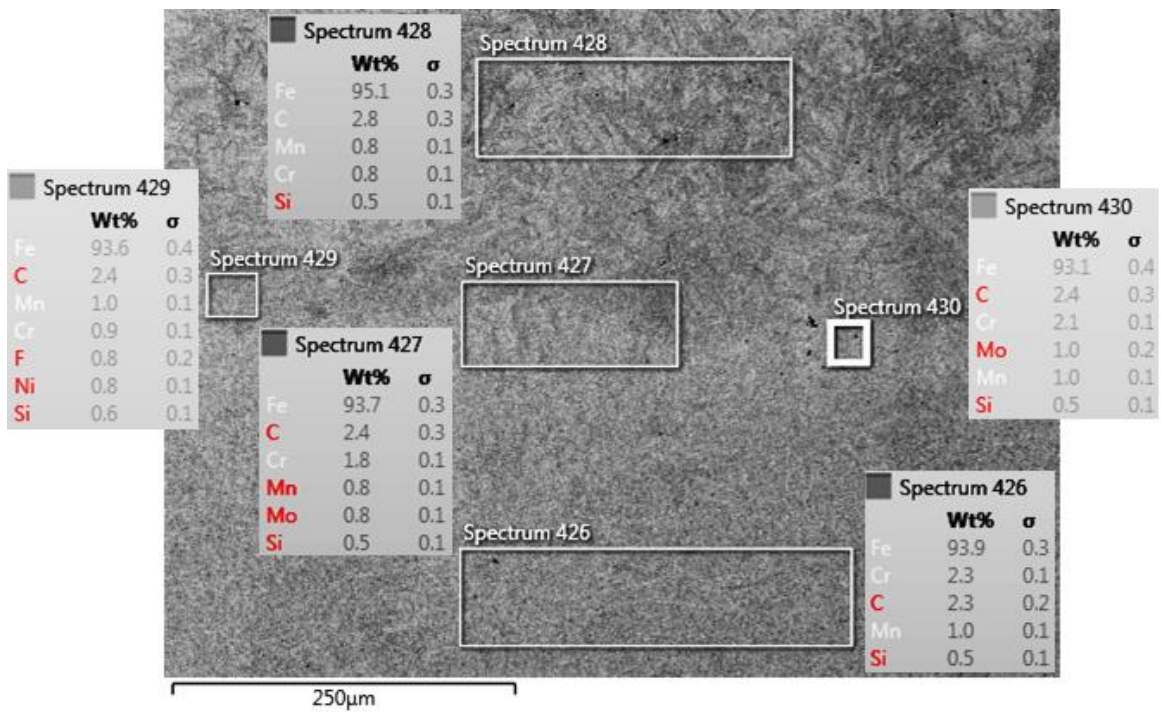


Figura 44. Microanálisis realizado en la pieza precalentada a 120 °C en las diferentes zonas de interés obtenida por EDS.

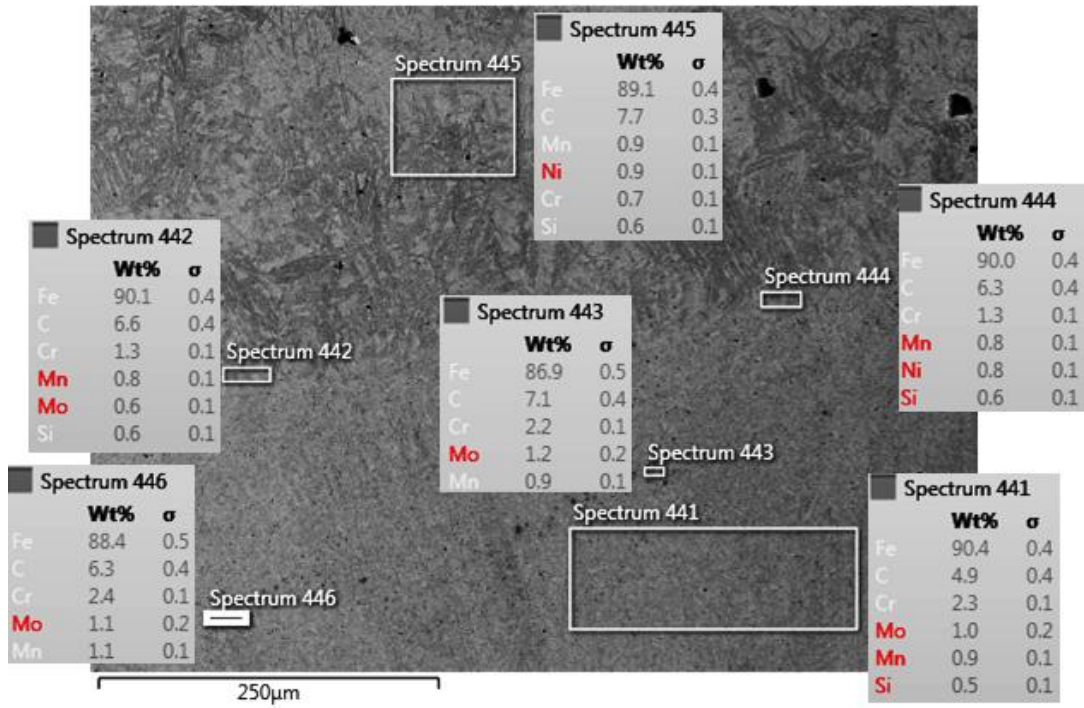


Figura 45. Microanálisis realizado en la pieza precalentada a 150 °C en las diferentes zonas de interés obtenida por EDS.

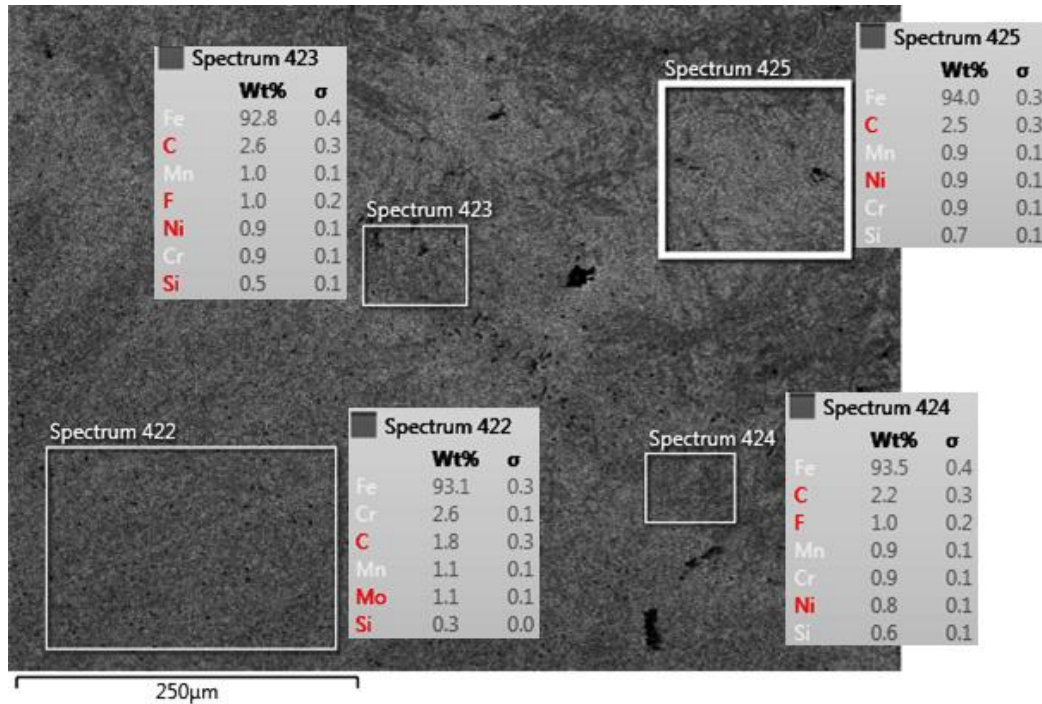


Figura 46. Microanálisis realizado en la pieza de unión precalentada a 120 °C en las diferentes zonas de interés obtenida por EDS.

Propiedades mecánicas.

Microdureza Vickers.

En la Figura 47 se aprecia el barrido de microdureza en las diferentes zonas de la muestra sin precalentamiento. En esta gráfica existe un cambio entre los valores en la microdureza entre la zona del material de aporte y la interfase. Esto debido a que se tiene cambios de dirección en la microestructura en la zona de interfase y esta genera el incremento de la dureza debido al choque térmico que tiene el metal depositado con el metal base. Las zonas afectadas por el calor presentan una dureza menor que la zona de interfase ya que se presenta un acomodo de los granos y una recristalización por lo que la dureza disminuye.

Tabla 3. Microdurezas en la pieza sin precalentamiento.

Zonas	Evaluación	Microdureza	Promedio
Corona	1	370	376
	2	396	
	3	362	
Interfase	4	526	523
	5	513	
	6	530	
ZGG	7	430	447
	8	459	
	9	452	
ZGF	10	490	484
	11	477	
	12	484	
Metal base	13	409	401
	14	399	
	15	395	

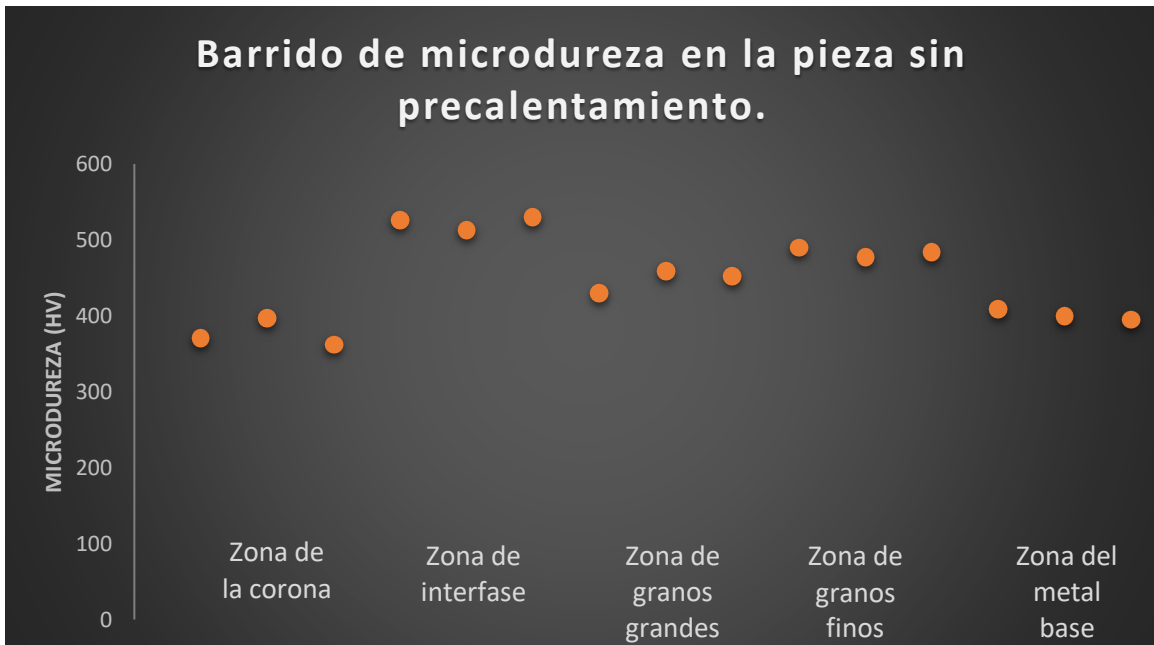


Figura 47. Variación de la microdureza en las distintas zonas en la pieza soldada sin precalentamiento.

Se tiene un cambio apreciable en la Figura 48 en la microdureza de la pieza precalentada a 120 °C ya que los valores de dureza se encuentran en un menor rango de valores en la interfase y la ZAC esto se debe a que el precalentamiento ayuda a la eliminación de tensiones durante el enfriamiento de la pieza y se obtiene una velocidad de enfriamiento menor.

Tabla 4. Microdurezas de la pieza precalentada a 120 ° C.

Zonas	Evaluación	Microdureza	Promedio
Corona	1	383	387
	2	405	
	3	372	
Interfase	4	426	450
	5	474	
	6	449	
ZGG	7	410	416
	8	425	
	9	413	
ZGF	10	440	446
	11	432	
	12	467	
Metal base	13	459	470
	14	472	
	15	480	

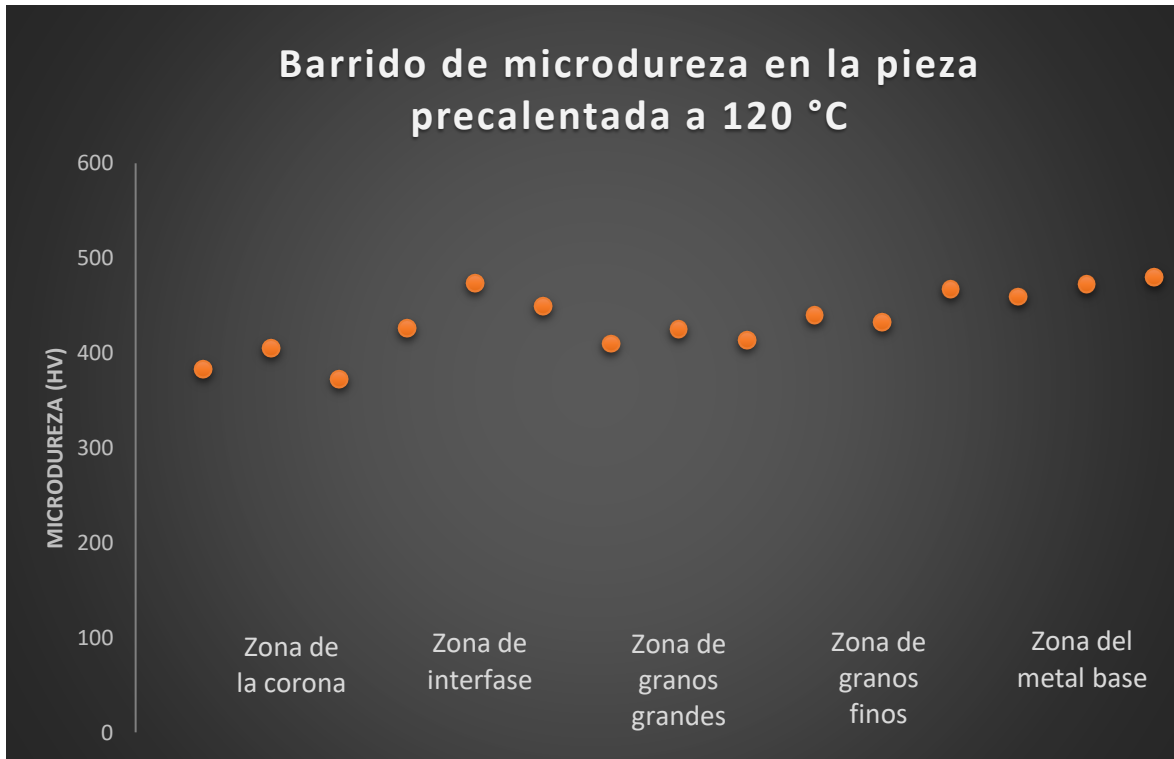


Figura 48. Variación de la microdureza en las distintas zonas en la pieza soldada con precalentamiento de 120 °C.

Los valores de microdureza mostrados en la Figura 49 tiene una mayor homogeneidad en las diferentes zonas ya que al elevar la temperatura de precalentamiento 30 °C el enfriamiento de las placas se lleva a cabo de manera más lenta por lo que las estructuras resultantes tienen oportunidad de reducir las tensiones ya que algunas zonas presentan un menor valor de dureza que en la Figura 48. Algo que no se había mencionado antes fue que la menor dureza generalmente se registra en la zona del material de aporte debido a la presencia de granos columnares a diferencia de la estructura martensítica en las otras zonas lo que afecta directamente a la dureza.

Tabla 5. Microdurezas de la pieza precalentada a 150 ° C.

Zonas	Evaluación	Microdureza	Promedio
Corona	1	356	373
	2	389	
	3	373	
Interfase	4	457	455
	5	472	
	6	436	
ZGG	7	429	426
	8	437	
	9	412	
ZGF	10	457	444
	11	429	
	12	445	
Metal base	13	473	461
	14	465	
	15	445	

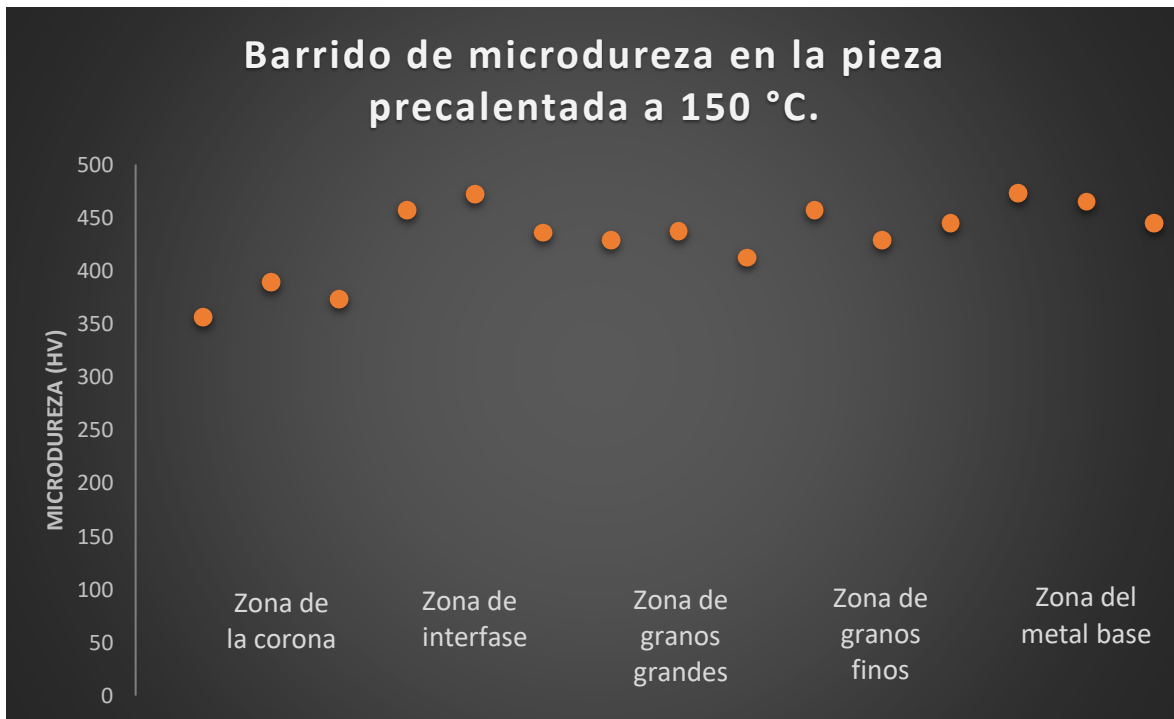


Figura 49. Variación de la microdureza en las diferentes zonas en la pieza soldada con precalentamiento de 150 °C.

Lo último relacionado con esta parte es el análisis de la placa de unión. En las Figura 50 y Figura 51, ya que los perfiles de dureza en ambos lados del cordón presentan diferencias en las zonas estudiadas. Aunque las placas tenían la misma temperatura de precalentamiento el tamaño entre ellas no era el mismo por lo que la de mayor masa absorbió una mayor cantidad de calor proporcionada por el arco eléctrico y la interfase tiene menor distorsión teniendo valores de microdureza con mayor similitud en las distintas zonas afectadas por el calor. Esto también se puede deber a que el electrodo se dirige hacia la placa más ancha por lo que la energía está direccionada.

Tabla 6. Microdurezas de la pieza de unión precalentada a 120 °C placa con mayor espesor.

Zonas	Evaluación	Microdureza	Promedio
Corona	1	395	397
	2	405	
	3	390	
Interfase	4	493	478
	5	462	
	6	479	
ZGG	7	476	466
	8	452	
	9	469	
ZGF	10	502	510
	11	497	
	12	530	
Metal base	13	527	524
	14	512	
	15	534	



Figura 50. Variación de la microdureza en la pieza de unión precalentada a 120 °C placa con mayor espesor.

Tabla 7. Microdureza de la pieza de unión precalentada a 120 °C placa con menor espesor.

Zonas	Evaluación	Microdureza	Promedio
Corona	1	361	361
	2	350	
	3	373	
Interfase	4	420	435
	5	449	
	6	437	
ZGG	7	399	411
	8	412	
	9	423	
ZGF	10	438	442
	11	429	
	12	458	
Metal base	13	450	450
	14	438	
	15	461	



Figura 51. Variación de la microdureza en la pieza de unión precalentada a 120 °C placa con menor espesor.

Dureza Rockwell.

Para corroborar como es que cambia la dureza dependiendo la cercanía a la zona del material de aporte fue necesario realizar un barrido de dureza rockwell debido a que la dureza Vickers nos proporciona un valor de dureza puntual en la microestructura mientras que la dureza rockwell proporciona un valor de dureza general para una zona, además de que hay zonas en la soldadura que no se aprecian de manera adecuada a menos de que se usen aumentos como es el caso de la dureza Vickers. Los perfiles se realizaron de manera longitudinal en el caso de la pieza de unión desde el material base pasando para la soldadura hasta volver al material base.

Surgieron algunos problemas para adquirir los datos de dureza de algunas piezas ya que debido a que la pieza sin precalentamiento no tenía ambas superficies paralelas y la pieza era demasiado pequeña como para realizar un corte se decidió omitirla para evitar tener datos erróneos.

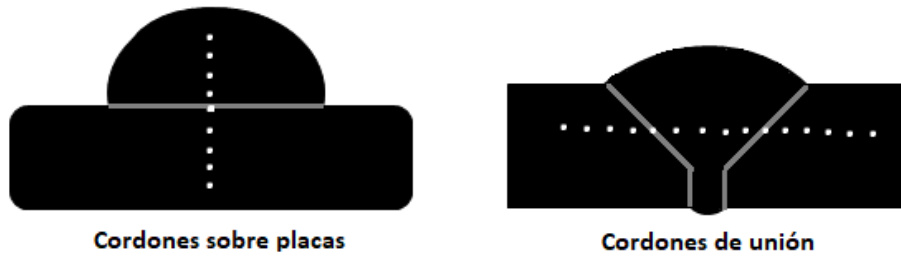


Figura 52. Ejemplos de los barridos de dureza Rockwell realizados en las muestras.

Como se aprecia en la Figura 53 la pieza precalentada a 120 °C tiene un rango de durezas homogéneo, ningún valor se dispara por lo que la transición entre el metal base y la soldadura no presenta tensiones importantes que eleven la dureza en la zona de la interfase, siendo la zona con menor dureza la del material de aporte.

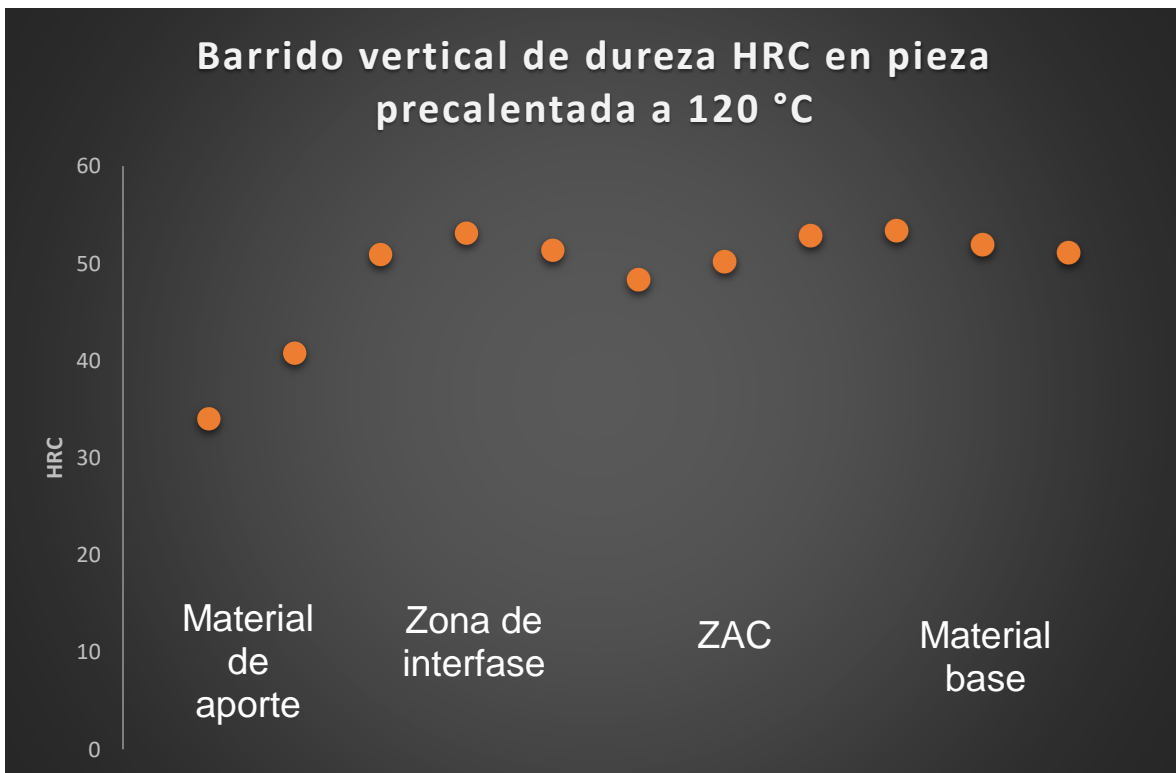


Figura 53. Barrido vertical de HRC en las distintas zonas de la soldadura en la pieza precalentada a 120 °C.

En el caso de la Figura 54 los dos aumentos en dureza son las zonas de interfase ya que esta pieza permitió tomar una mayor cantidad de datos debido a su largo. Como se puede observar los valores registrados en la pieza precalentada a 150 °C son menores comparados con la muestra anterior, esto muestra que la estructura tiene menor cantidad de tensiones residuales y por lo tanto la dureza tiende a

disminuir. Una mayor temperatura de precalentamiento reduce la tensión generada durante el proceso de solidificación y por lo tanto las propiedades mecánicas, en este caso, la dureza en las diferentes zonas de la soldadura se mantiene dentro de un rango, por lo que es homogénea.

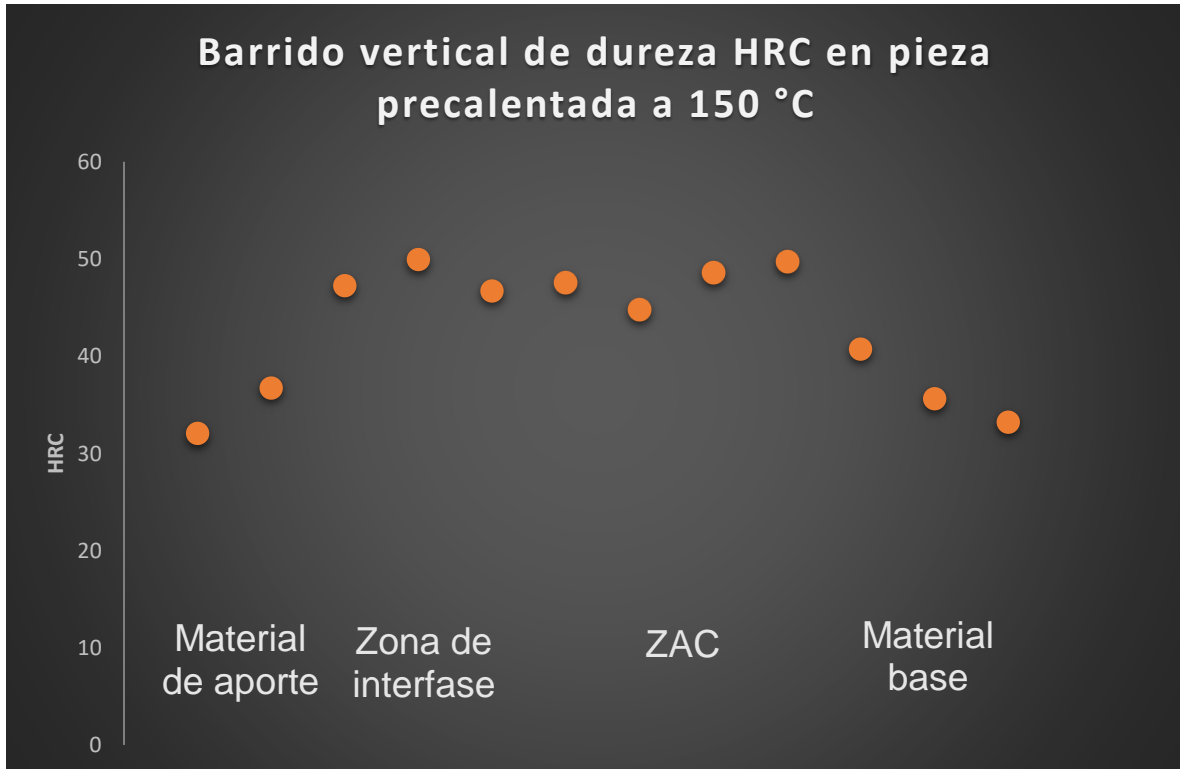


Figura 54. Barrido vertical de HRC en las distintas zonas de la soldadura en la pieza precalentada a 150 °C.

En el caso de la pieza de unión precalentada a 120 °C no se realizó un barrido vertical debido a que solo se evaluaría el material de aporte lo cual no arroja información importante para este trabajo. En cambio, en la Figura 55 se presenta el barrido horizontal, en este se observa como en la zona de la interfase aumenta la dureza y como ya se había visto antes, una de ellas muestra valores más altos debido al direccionamiento del calor al momento de soldar. Sin embargo, no se muestran cambios importantes.

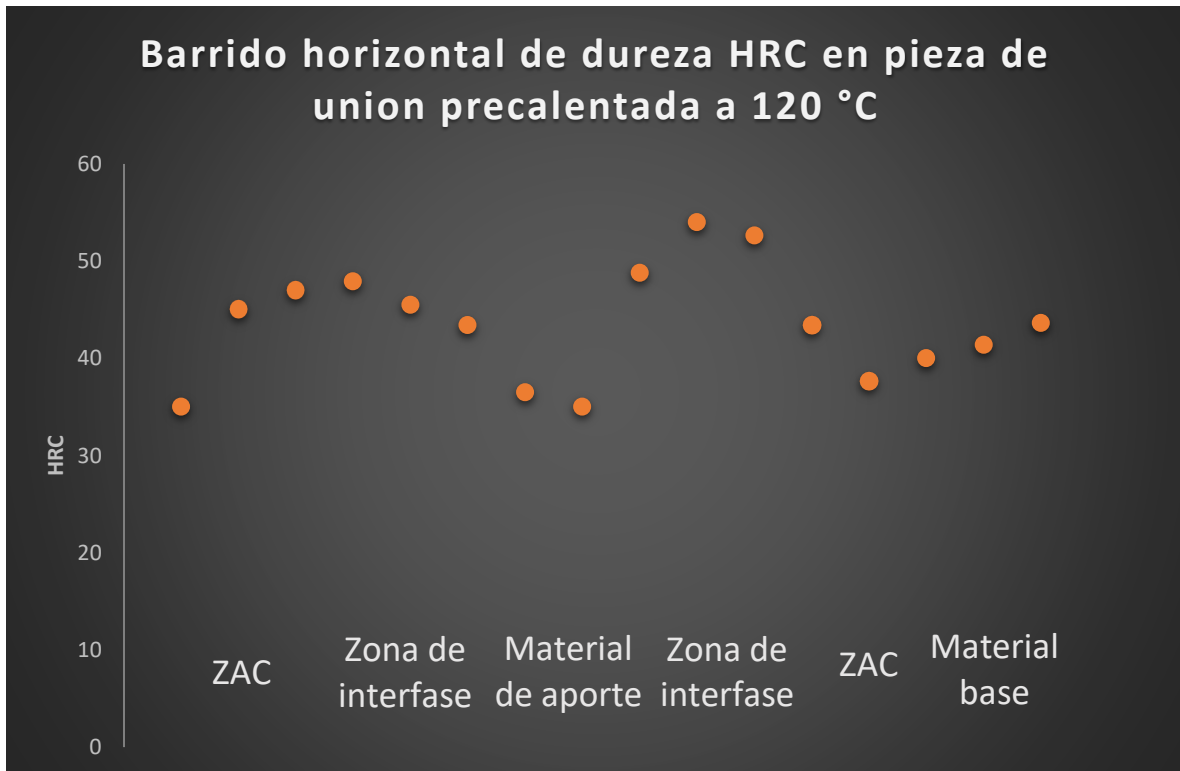


Figura 55. Barrido horizontal de HRC en las distintas zonas de la soldadura en la pieza de unión precalentada a 120 °C.

Pruebas de tensión.

Cabe aclarar que las probetas fabricadas para la prueba de tensión no siguieron ninguna norma en cuanto a dimensiones debido a que maquinárselas de manera adecuada no es posible debido a la dureza del material base y que no se cuenta con la maquinaria adecuada.

Un punto importante a resaltar en la fabricación de las muestras es que por el espesor fue necesario realizar varios pases con el electrodo para rellenar adecuadamente el espacio entre las placas.

Al revisar el estado de la fractura en las Figura 56 y Figura 57 se observó que existía una gran cantidad de poros (círculo rojo) en el material de aporte, esto generó que las grietas se generaran a partir de estos defectos y al existir una gran cantidad fue fácil que la grieta avanzara y ocasionara la falla del material (fractura).

Estos poros pudieron haber sido generados por varios aspectos como:

- Mala calidad de la limpieza entre la aplicación: es posible que una pequeña cantidad de escoria se quede atrapada. Al volver a pasar con el electrodo esta escoria genera gases que se quedan atrapados dentro del material de aporte ya que no alcanzan a salir del baño metálico y al solidificar se generan los poros.
- La distancia entre el electrodo y la pieza fue mayor a la requerida: al incrementarse la separación entre el electrodo y la placa la atmosfera protectora no es capaz de impedir que gases del ambiente penetren en el metal líquido y por lo tanto estos generaron los poros.
- Las propiedades del recubrimiento se han perdido: como se sabe el recubrimiento de los electrodos utilizados se caracteriza por ser de bajo hidrógeno, pero este factor se pierde al no mantener los electrodos en un ambiente controlado (vacío) ya que los electrodos absorben la humedad del ambiente.

Para evitar este tipo de defectos se decidió realizar el relleno de soldadura de una sola pasada disminuyendo la velocidad de avance del electrodo. Esto evitará que se queden residuos de escoria atrapados entre las capas de material de aporte, además existen técnicas de soldadura para rellenos profundos que se pueden implementar en estos casos (por ejemplo: movimientos de media luna al arrastrar el electrodo). En combinación, se puede realizar un tratamiento de horneado de los electrodos para reducir la cantidad de humedad en ellos.

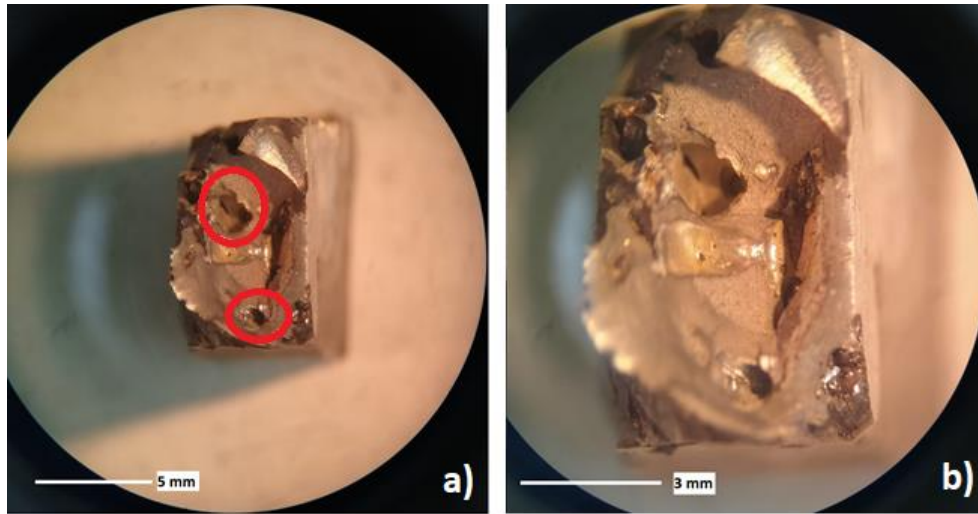


Figura 56. Primera muestra de tensión. a) 10 aumento. b)20 aumentos.

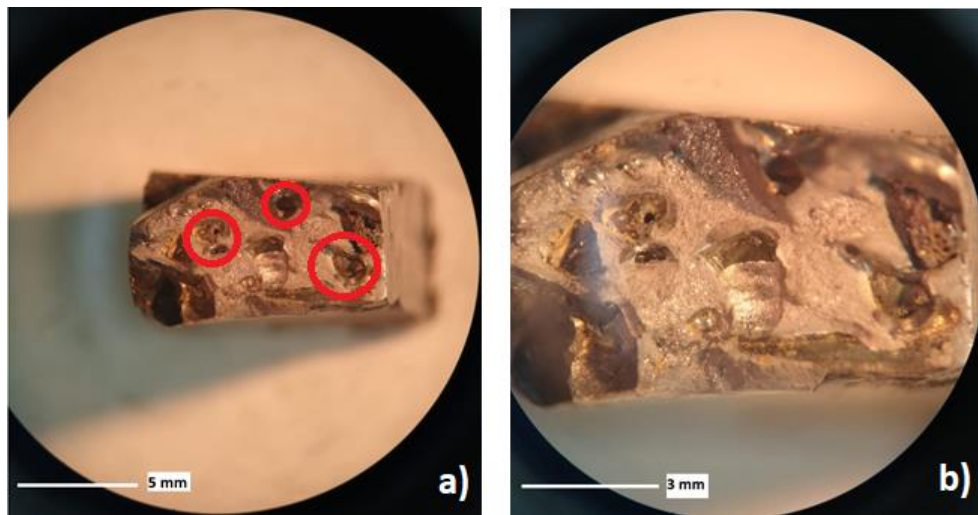


Figura 57. Segunda muestra de tensión. a) 10 aumentos. b)20 aumentos.

Debido a que la fractura en el ensayo de tensión fue afectada por la presencia de la porosidad los datos obtenidos de la gráfica de tensión no son concluyentes.

Para el segundo experimento se obtuvieron placas de tochos de acero 9840, estas se rectificaron con la intención de que tuvieran el mismo espesor en toda su longitud. Se cortaron para generar nuevas probetas de tensión. A cada una de las probetas se les realizó un bisel antes de la soldadura como se muestra en la Figura 58.

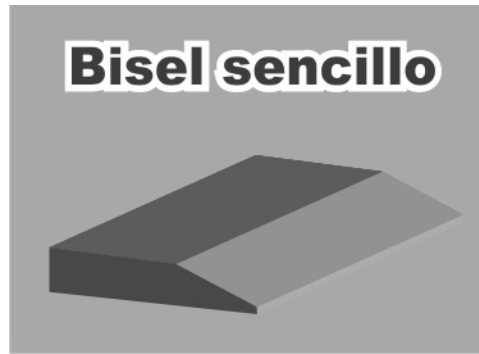


Figura 58. Ejemplo de bisel generado en las piezas [20].

En la Figura 59 se muestra cómo se generaron tres piezas, una en condiciones normales (sin precalentamiento) y dos utilizando una temperatura de precalentamiento de 200 °C. La temperatura de precalentamiento aumento debido a que las piezas tenían un mayor tamaño a las utilizadas con anterioridad y debido a que la temperatura de precalentamiento se modifica con el factor de las dimensiones de las piezas a soldar a esta temperatura aumento.



Figura 59. Placa principal y probetas de tensión.

Al momento de realizar los ensayos de tensión, las muestras fallaron en el material base lejos de la zona de soldadura y de la ZAC por lo que fue necesario revisar el estado microestructural del material base para verificar si este contenía alguna imperfección que originara la fractura. Para esto se tomó una muestra del material

base para verificar su estado de llegada y en la Figura 61 al observarlo en el microscopio óptico se comprobó que la microestructura está constituida por bainita y austenita retenida pero la gran diferencia con el material base utilizado anteriormente (Figura 60) es que en este se observan carburos (círculos rojos), estos son los responsables de que el material base sea un material muy duro pero a la vez frágil como se observa en las imágenes correspondientes a la fractura.

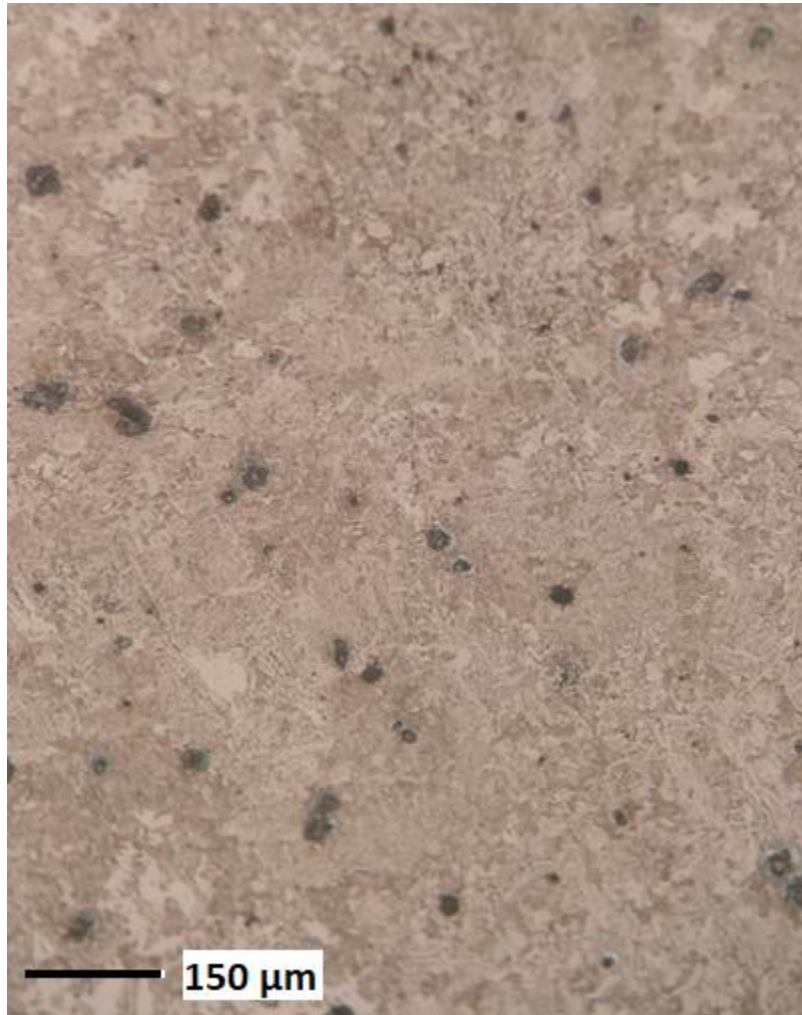


Figura 60. Material base sin carburos tomada en microscopio óptico a 200 aumentos.

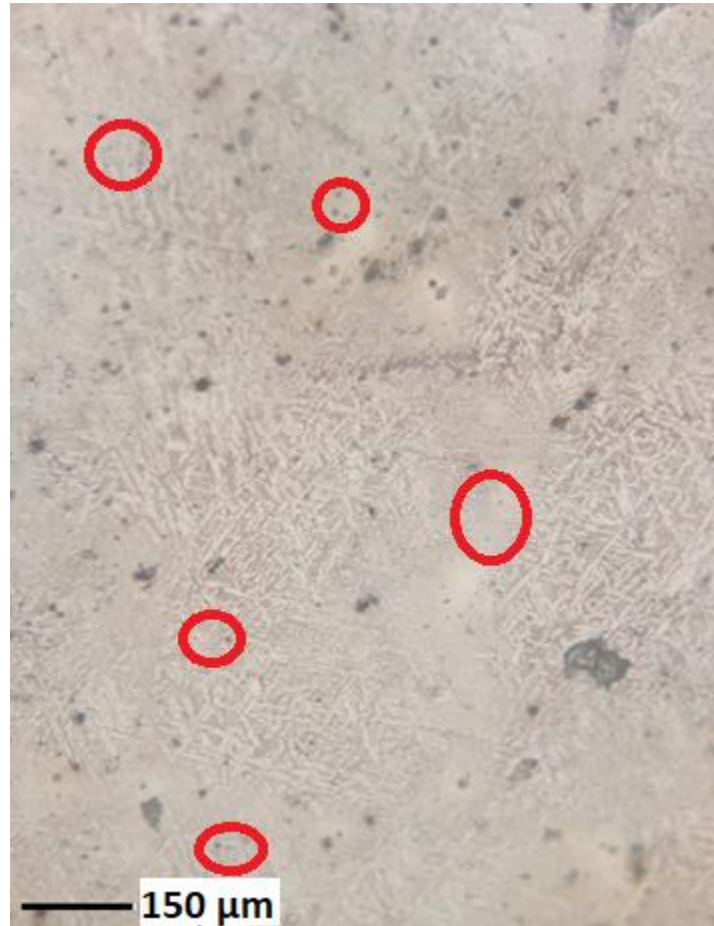


Figura 61. Material base con carburos tomada en microscopio óptico a 200 aumentos.

Con respecto a la fractura presentada en el ensayo de tensión para la pieza sin precalentamiento se originó lejos de la soldadura y de la zona ZAC. La Figura 62 corresponde a la fractura en el material base y tiene comportamiento frágil sin porcentaje de deformación. La coalescencia entre las segundas fases y la matriz bainítica del material crea puntos concentradores de esfuerzos que proporcionan mayor dureza al material, pero se sacrifica la ductilidad, ya que en estos sitios se incrementa la posibilidad de que nucleen grietas que al final desembocaran en la fractura.

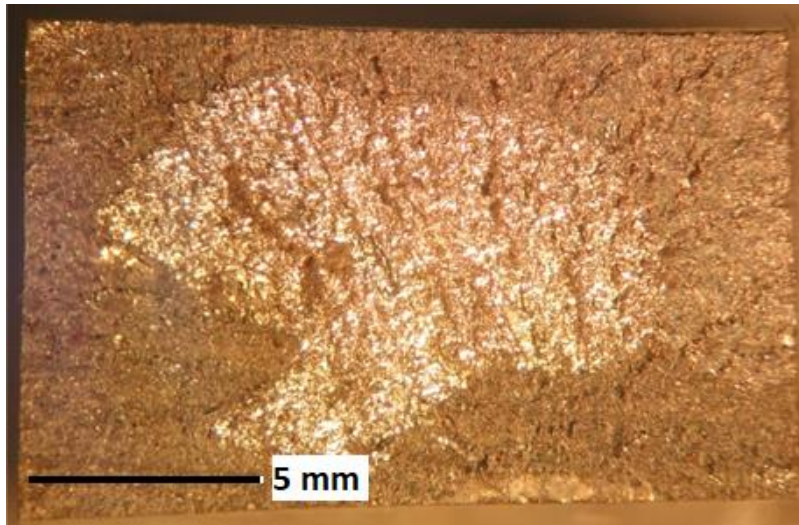


Figura 62. Fractura de la pieza sin precalentamiento en el ensayo de tensión.

Para los ensayos de tensión de las muestras precalentadas a 200 °C la fractura tuvo lugar cerca de la soldadura (ambas en la ZAC). En la Figura 63 las fracturas se catalogan como frágiles, pero tienen entre 10 a 25 por ciento de deformación plástica lo que indicaría ductilidad. Al ver que la fractura se originó en la ZAC esto se convierte en un indicador de que el proceso de soldadura se realizó adecuadamente, así como el tratamiento de precalentamiento aporta un beneficio a las propiedades mecánicas de la unión debido a los cambios con respecto al tamaño de grano que tienen lugar en la ZAC es la zona con mayor probabilidad de fallar.

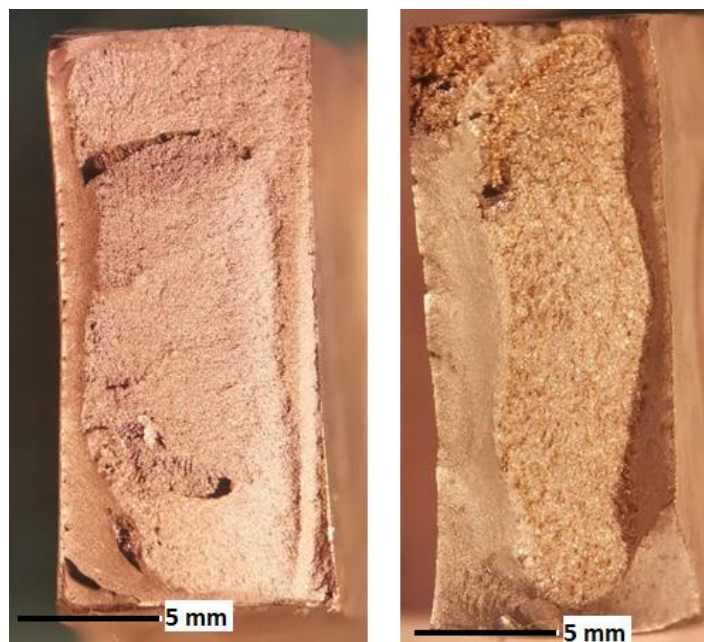


Figura 63. Fracturas de las piezas precalentadas a 200 °C en el ensayo de tensión.

Ensayo de impacto.

Por último, para tener una mayor certeza de que el tratamiento de precalentamiento es efectivo, para el caso del acero 9840, se realizaron pruebas de impacto para saber en qué zona de la soldadura se generaba la grieta.

En la Figura 64 se observa como la fractura en la pieza sin precalentamiento tuvo lugar en la zona del material de aporte lo que indica que la unión no se hizo de manera adecuada. Además, es posible ver que la fractura presenta deformación plástica puesto que el material de aporte es dúctil.



Figura 64. Fractura de la pieza sin precalentamiento en el ensayo de impacto.

Como se aprecia en la Figura 65, la fractura en el caso de ambas probetas precalentadas se dio en la ZAC esto debido a que los cambios microestructurales que se dan en esta parte de la soldadura (cambios en el tamaño de grano y recristalización).



Figura 65. Fractura de la pieza precalentada a 200 °C en el ensayo de impacto.

Conclusiones.

Se puede afirmar que el precalentamiento de piezas de acero 9840, mejora la calidad metalúrgica y mecánica después de realizar el proceso de soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido utilizando electrodos E-9018-B3 con las condiciones de operación de 22 V y 120 A.

El rango de temperaturas utilizadas (120 a 200 °C) es el adecuado ya que se aprecian cambios sustanciales en las diferentes zonas de afectación por el calor comparándolas con la pieza soldada sin precalentamiento.

Al modificar las condiciones de operación (temperatura de precalentamiento, electrodo y amperaje utilizado) en un proceso de soldadura es posible mejorar la soldabilidad de un acero.

El precalentamiento reduce la velocidad de enfriamiento de las piezas soldadas y favorece la distribución homogénea de los elementos químicos entre el metal base y el material de aporte.

Las condiciones de soldadura son adecuadas para el trabajo del acero 9840 ya que la calidad de las soldaduras es buena porque no presentaron defectos como atrapamiento de escoria.

Al precalentar las piezas antes del proceso de soldadura se reducen las variaciones en las propiedades como la dureza en la zona ZAC.

El precalentamiento de las piezas de acero 9840 permite una mejor transición entre el metal de aporte y el material base, lo cual repercute directamente en las propiedades mecánicas mejorando la unión soldada.

Bibliografía.

- [1] Asta, Eduardo. (2007). Introducción a la soldadura de estructuras de acero.
- [2] Empresa Lincoln Electric. (2016). Soldeo manual con electrodos revestidos (SMAW). Págs. 23-40.
- [3] Eliseo Flores, Carlos. (2008). Soldadura con arco eléctrico (SMAW). Universidad Rafael Landívar. Págs. 3-6.
- [4] Niebles, Enrique. (2013). Metodología para el estudio de la soldabilidad en uniones soldadas. Universidad Autónoma del Caribe. Colombia. Págs. 6-12.
- [5] Honeycombe, Sir Robert. Steels: Microstructure and properties. Butterworth Heinemann. EU. Págs. 287-306.
- [6] Linnert, George E. Welding metallurgy: Carbon and alloy steels Vol 2. American welding society. New York. Págs.
- [7] Phillips, Arthur L. Welding handbook: Welding processes. American welding society. Miami. Págs. 23.1-23-9.
- [8] Lancaster, J.F. Metallurgy of welding. Chapman & Hall. New York. Págs. 123-152.
- [9] Fenton, Edward A. Welding inspection. American welding society. New York. Págs. 61-66.
- [10] Horwitz, Henry. Soldadura: aplicaciones y práctica. Representaciones y servicios de ingeniería. México. Págs. 102-132.
- [11] Latzin. La técnica de la soldadura: en la ingeniería de la construcción. Editorial blume. Madrid. Págs. 92-96.
- [12] Kearns, W.H. Welding handbook: resistance and solid-state welding and other joining processes. American welding society. Miami. Págs. 38-55.
- [13] Little, Richard L. Welding and welding technology. McGraw-Hill. New York. Págs. 99-137.

- [14] <http://blog.utp.edu.co/metalografia/capitulo-18-soldadura-metalurgia-de-la-soldadura-procesos-de-soldadura-soldabilidad/> (Acceso 12 de Julio de 2019)
- [15] Ospina Montoya, Alvero León. (1996). Esfuerzos residuales en estructuras soldadas. Universidad Nacional Facultad de minas. Medellín.
- [16] <http://campusvirtual.edu.uy/archivos/mecanicageneral/soldadura/05%20Metalurgia%20de%20la%20soldadura.pdf> (Acceso 12 de Julio de 2019).
- [17] https://academicae.unavarra.es/bitstream/handle/2454/13684/TFM%20Gorka%20Garcia%20Rodero%20Sept_2014.pdf?sequence=1&isAllowed=y (Acceso 13 de Julio de 2019).
- [18] Empresa Soldexa. (2003). Manual de soldadura y catálogo de productos. Págs. 92-95.
- [19] Salgado L, Juan M. (2007). Evaluación de la soldadura industrial en pernos empleando el análisis microestructural. Revista NTHE. Págs. 7-14.
- [20] <http://www.megaluminio.com/es/bisel-canto.php> (Acceso 26 de septiembre de 2019).
- [21] <http://www.gowelding.com/weld/preheat/preheatcalc.htm> (Acceso 02 de septiembre de 2019).
- [22] <https://grupoinfra.com/pagina/producto/286/INFRA-918-B3-1/8%E2%80%9D> (Acceso 30 de septiembre de 2019).