



UNIVERSIDAD MICHOCANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO



INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN METALURGIA Y MATERIALES

MAESTRÍA EN METALURGIA Y CIENCIAS DE LOS MATERIALES

ESTUDIO COMPARATIVO DE LA SOLDADURA DEL ACERO AL CARBONO AISI 1045,
CON Y SIN INTERACCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

Tesis que para obtener el Grado de
Maestro en Metalurgia y Ciencias de los Materiales presenta:

ING. RUBÉN GERARDO LACHINO GARCÍA

Director de Tesis:

DR. RAFAEL GARCÍA HERNÁNDEZ

Morelia, Michoacán. Febrero de 2019

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE TABLAS	x
LISTA DE ABREVIATURAS Y TABLA DE SÍMBOLOS	xi
RESUMEN	xii
ABSTRACT	xiii
CAPÍTULO 1. Introducción	1
Justificación	3
Objetivos	3
Hipótesis	4
CAPÍTULO 2. Revisión bibliográfica	5
2.1 Aceros al carbono	5
2.2 Clasificación de los aceros al carbono	6
2.3 Efecto de los elementos químicos en los aceros al carbono	6
2.3.1 Designación numérica de los aceros	7
2.4 Soldadura de los aceros al carbono	8
2.4.1 Soldadura de aceros con bajo contenido de carbono	8
2.4.2 Soldadura de aceros con medio contenido de carbono	9
2.4.2.1 Pre calentamiento durante la soldadura	9
2.4.2.2 Post calentamiento durante la soldadura	9
2.4.3 Agrietamiento en la zona afectada térmicamente	9

2.5 Concepto de carbono equivalente -----	11
2.6 Metalurgia de la soldadura-----	11
2.6.1 Regiones de una unión soldada -----	12
2.6.2 Zona de fusión -----	13
2.6.3 Zona afectada por el calor -----	14
2.6.3.1 Recristalización y crecimiento de grano -----	16
2.6.3.2. Transformaciones de fase alotrópicas -----	17
2.6.3.3 Reacciones de precipitación -----	18
2.7 Microestructuras presentes en los aceros al carbono -----	18
2.8 Diagramas de transformación del acero AISI 1045 -----	19
2.9 Proceso de Soldadura por Arco Sumergido (SAW) -----	23
2.9.1 Aplicaciones del proceso SAW -----	23
2.9.2 Ventajas del proceso de soldadura SAW -----	24
2.9.3 Desventajas del proceso de soldadura SAW -----	24
2.9.4 Metales de aporte -----	25
2.9.5 Fundentes -----	25
2.9.6 Elementos del equipo de soldadura SAW -----	26
2.9.6.1 Fuente de alimentación -----	27
2.9.6.2 Panel de control -----	27
2.9.6.3 Cabezal -----	27
2.9.7 Parámetros en el proceso SAW -----	28
2.9.7.1 Corriente y polaridad -----	28
2.9.7.2 Voltaje -----	29

2.9.7.3 Velocidad de avance -----	29
2.9.7.4 Diámetro y tipo de electrodo -----	29
2.9.7.5 Tipo de fundente -----	30
2.10 Teoría de los campos electromagnéticos -----	31
2.11 Soldadura con interacción electromagnética-----	33
CAPÍTULO 3. Desarrollo Experimental -----	35
3.1 Soldadura -----	36
3.1.1 Materiales y equipo utilizado-----	36
3.1.2 Corte y preparación de las placas para la unión -----	37
3.1.2.1 Placas para múltiples pasadas-----	37
3.1.2.2 Placas para 1 pasada -----	39
3.1.3 Soldadura de múltiples pasadas -----	40
3.1.3.1 Soldadura multipasadas sin interacción electromagnética -----	41
3.1.3.2. Soldadura multipasadas con interacción electromagnética -----	42
3.1.4 Soldadura de 1 pasada -----	43
3.1.4.1 Soldadura de 1 pasada sin interacción electromagnética. -----	44
3.1.4.2 Soldadura de 1 pasada con interacción electromagnética -----	44
3.2 Preparación de probetas metalográficas -----	44
3.2.1 Desbaste grueso -----	44
3.2.2 Desbaste fino -----	45
3.2.3 Pulido -----	45
3.2.4 Ataque químico -----	45

3.3 Probetas para ensayo de tensión -----	46
3.3.1 Probetas para ensayo de tensión de metal base -----	46
3.3.2 Probetas para ensayo de tensión de la soldadura con multipasadas -----	47
3.3.3 Probetas para ensayo de tensión de la soldadura con una pasada -----	48
3.4 Probetas para prueba de impacto Charpy -----	49
3.4.1 Probetas para prueba de impacto Charpy del metal base -----	50
3.4.2 Probetas para prueba de impacto Charpy de soldaduras de una y múltiples pasadas -----	51
3.5 Pruebas de microdureza-----	52
3.5.1 Pruebas de microdureza en metal base -----	53
3.5.2 Pruebas de microdureza en soldadura con múltiples y una sola pasada -----	54
3.6 Microscopia electrónica de barrido (MEB). -----	55
3.6.1 MEB en la zona afectada térmicamente de la soldadura con una pasada -----	55
3.6.2 Fractografía de probetas de impacto Charpy de soldadura con una pasada -----	55
3.6.3 Fractografía de probetas de ensayo de tensión de soldadura con una pasada -----	56
CAPÍTULO 4. Resultados y discusión -----	57
4.1 Análisis microestructural -----	57
4.1.1 Caracterización microestructural de metal base-----	57
4.1.2 Caracterización microestructural de soldadura de múltiples pasadas -----	58
4.1.2.1 Caracterización microestructural de soldaduras sin interacción electromagnética-----	59
4.1.2.2 Caracterización microestructural de soldaduras campo con electromagnético 3.2 mT ----	63
4.1.2.3 Caracterización microestructural de soldaduras con campo electromagnético 6.4 mT ----	65
4.1.2.4 Medición y análisis de tamaño de grano en la ZAT-----	67

4.1.3 Caracterización microestructural de soldadura de una pasada -----	69
4.1.3.1 Caracterización microestructural de soldaduras sin interacción electromagnética -----	69
4.1.3.2 Caracterización microestructural de soldaduras con campo electromagnético 3.4 mT ----	72
4.1.3.3 Caracterización microestructural de soldaduras con campo electromagnético 4.3 mT-----	73
4.1.3.4 Comparación del tamaño de la ZAT-----	74
4.1.3.5 Comparación del tamaño de grano en la ZAT. -----	76
4.2 Perfiles de microdureza-----	79
4.2.1 Perfiles de microdureza de metal base-----	79
4.2.2 Pruebas de microdureza de soldaduras de varias pasadas -----	80
4.2.3 Pruebas de microdureza de soldaduras de una pasada -----	82
4.3 Resultado de pruebas de impacto Charpy -----	85
4.3.1 Metal base -----	85
4.3.2 Pruebas de impacto Charpy de soldadura de múltiples pasadas -----	85
4.3.3 Pruebas de impacto Charpy de soldadura de una pasada -----	87
4.4 Análisis de los ensayos de tensión -----	88
4.4.1 Ensayo de tensión metal base-----	88
4.4.2 Ensayo de tensión en soldadura de múltiples pasadas -----	89
4.4.3 Ensayo de tensión en soldadura de una pasada -----	91
4.5 Análisis MEB, soldadura de una pasada -----	94
4.5.1 Imágenes MEB en la ZAT -----	94
4.5.2 Análisis fractográfico de las pruebas de impacto Charpy -----	97
CAPÍTULO 5. Conclusiones -----	100

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Diagrama de equilibrio Hierro-Carbono -----	5
Figura 2.2. Tipos de agrietamiento en la soldadura -----	10
Figura 2.3. Regiones formadas en un cordón de soldadura -----	12
Figura 2.4. Esquema con nuevas regiones de un cordón de soldadura -----	13
Figura 2.5. Relación entre el diagrama Fe-C y la microestructura en la ZAT de aceros al carbono ----	15
Figura 2.6. Evolución de la microestructura durante la soldadura de múltiples pasadas en aceros --	17
Figura 2.7. Diagrama TTT del acero AISI 1045 -----	20
Figura 2.8. Micrografía que muestra la ferrita en forma de agujas -----	21
Figura 2.9. Micrografía donde se observa martensita en un acero al carbono -----	21
Figura 2.10. Diagrama CCT del acero AISI 1045 -----	22
Figura 2.11. Esquema de los elementos del proceso de soldadura con arco sumergido (SAW) -----	25
Figura 2.12. Espira por la cual circula una corriente, genera un campo magnético a su alrededor -----	31
Figura 2.13. Líneas de campo magnético alrededor de un alambre recto -----	32
Figura 2.14 Líneas de campo magnético en un alambre circular -----	32
Figura 3.1. Secuencia del proceso de experimentación -----	35
Figura 3.2. Máquina de soldar Miller “Dimension 652” -----	36
Figura 3.3. Dimensiones de las placas para soldar. a) Vista transversal. b) Vista superior -----	38
Figura 3.4. Preparación de unión en “V Simple” -----	39
Figura 3.5. Dimensiones de las placas para soldar. a) Vista transversal. b) Vista superior -----	40
Figura 3.6. Esquema de la forma en que se realizaron las 3 pasadas de soldadura -----	41
Figura 3.7. Imágenes después de haber depositado los cordones de soldadura. a) El fundente forma una capa de escoria protectora. b) Apariencia del cordón después de retirar la escoria -----	41
Figura 3.8. Esquema del arreglo de las bobinas para generar la interacción electromagnética -----	42
Figura 3.9. Fotografía del arreglo de las bobinas con las placas para unión -----	43
Figura 3.10. Dimensiones de la probeta de tensión del metal base -----	46

Figura 3.11. La muesca hecha en la probeta de tensión, coincide con la ZAT generada en la soldadura-----	47
Figura 3.12. Dimensiones de las probetas para tensión, de las soldaduras de múltiples pasadas ----	47
Figura 3.13. Macrografía de una probeta de tensión con soldadura de varias pasadas -----	48
Figura 3.14. La muesca generada en la probeta de tensión coincide con la ZAT de la soldadura -----	48
Figura 3.15. Macrografía de las 3 probetas para ensayo de tensión que fueron soldadas sin interacción electromagnética. -----	49
Figura 3.16. Aguja del medidor de pruebas de impacto Charpy -----	50
Figura 3.17. Probeta de impacto Charpy de metal base -----	50
Figura 3.18. Dimensiones de la probeta de impacto Charpy -----	51
Figura 3.19. Esquema que indica las dimensiones y forma de la probeta Charpy -----	51
Figura 3.20. Macrografía de las 3 probetas para ensayo de impacto Charpy, que fueron soldadas con una pasada y sin interacción electromagnética -----	52
Figura 3.21. Imagen que se observa en el software, de una impronta hecha por el microdurómetro ----	53
Figura 3.22. Barridos de microdureza realizados en el metal base. -----	53
Figura 3.23. Esquema de los barridos de microdureza en las soldaduras de una y varias pasadas -----	54
Figura 4.1. Micrografía del acero AISI 1045, en condición de proveedor. a)200x b)1000X -----	57
Figura 4.2. Perfiles de los cordones de soldadura -----	58
Figura 4.3. a) Intersección cordón-ZAT, parte superior izquierda. b) Parte superior derecha. c)Parte central izquierda. d) Parte central derecha. e) Parte inferior izquierda. f) Parte inferior derecha -----	59
Figura 4.4. Intersección ZAT- cordón a 1000X -----	60
Figura 4.5 Intersección ZAT-cordón a 200X -----	61
Figura 4.6 Microestructuras en interfase cordón-ZAT. -----	62
Figura 4.7 a) Intersección cordón-ZAT, parte superior izquierda. b) Parte superior derecha. c)Parte central izquierda. d) Parte central derecha -----	63
Figura 4.8. e) Intersección cordón-ZAT, parte inferior izquierda. f) Parte inferior derecha. -----	64
Figura 4.9 a) Intersección cordón-ZAT, parte central izquierda. b) Intersección parte central derecha-----	64
Figura 4.10 Zona cordón-ZAT, soldadura 3.2 miliTeslas -----	65
Figura 4.11. a) Zona cordón-ZAT parte superior izquierda. b) Parte superior derecha -----	65

Figura 4.11 c) Parte central izquierda. d) Parte central derecha. e) Parte inferior izquierda. f) Parte inferior derecha -----	66
Figura 4.12. ZAT de la zona superior izquierda de la unión. a) 500X. b)1000X -----	67
Figura 4.13. Medición de tamaño de grano con software. a) 0 mT, b) 3.2 mT. c) 6.4 mT -----	68
Figura 4.14. Macrografía unión soldada sin interacción electromagnética -----	69
Figura 4.15. a) Cordón-ZAT superior izquierda. b) Superior derecha. c) Central izquierda. d) Central derecha. e) Inferior izquierda. f) Inferior derecha -----	70
Figura 4.16. a) Cordón-ZAT superior izquierda. b) Superior derecha -----	71
Figura 4.17. Macrografía de la soldadura, con imágenes a mayores aumentos -----	72
Figura 4.18. Cordón-ZAT a 200X -----	72
Figura 4.19. Macrografía de la soldadura con interacción electromagnética de 4.3 mT -----	73
Figura 4.20. Cordón-ZAT a 50X. a) Parte superior izquierda. b) Parte superior derecha -----	73
Figura 4.21. Transición cordon-ZAT a 1,000X -----	74
Figura 4.22. Medición de longitud de la ZAT -----	75
Figura 4.23. a) Soldadura sin interacción electromagnética. b) Soldadura con interacción 3.4 mT. c) Soldadura con interacción de 4.3 mT. -----	76
Figura 4.24. a) Soldadura sin interacción electromagnética. b) Soldadura con interacción 3.4 mT. c) Soldadura con interacción de 4.3 mT. -----	77
Figura 4.25. a) Soldadura sin interacción electromagnética. b) Soldadura con interacción 3.4 mT. c) Soldadura con interacción de 4.3 mT. -----	78
Figura 4.26. Perfil de microdureza del metal base -----	79
Figura 4.27. Perfil de microdureza de la parte superior de las muestras -----	80
Figura 4.28. Perfil de microdureza de la parte central de las muestras -----	81
Figura 4.29. Perfil de microdureza de la parte inferior de las muestras -----	82
Figura 4.30. Perfil de microdureza de la parte superior de las muestras -----	83
Figura 4.31. Perfil de microdureza de la parte central de las muestras -----	83
Figura 4.32. Perfil de microdureza en la parte inferior de las muestras -----	84
Figura 4.33. Gráfica que indica los valores de energía absorbida en las probetas Charpy -----	85
Figura 4.34. Gráfica que indica los valores de energía absorbida en las probetas Charpy -----	86
Figura 4.35. Gráfica que indica los valores de energía absorbida en las probetas Charpy -----	87

Figura 4.36. Gráfica esfuerzo-deformación de metal base -----	88
Figura 4.37. Diagrama esfuerzo-deformación de soldadura sin interacción electromagnética. -----	89
Figura 4.38. Diagrama esfuerzo-deformación de soldadura con interacción de 3.2 mT -----	90
Figura 4.39. Diagrama esfuerzo-deformación de soldadura con interacción de 6.4 mT -----	91
Figura 4.40. Diagrama esfuerzo-deformación de soldadura sin interacción electromagnética -----	92
Figura 4.41. Diagrama esfuerzo-deformación de soldadura con interacción de 3.4 mT -----	93
Figura 4.42. Diagrama esfuerzo-deformación de soldadura con interacción de 4.3 mT -----	93
Figura 4.43. Imágenes MEB en la ZAT, soldadura sin interacción electromagnética -----	94
Figura 4.44. Imágenes MEB en la ZAT, soldadura con interacción de 3.4 mT -----	95
Figura 4.45. Morfología en la ZAT, soldadura con interacción de 4.3 mT -----	96
Figura 4.46. Fractografía, prueba de impacto Charpy de soldadura sin interacción electromagnética -----	97
Figura 4.47. Fractografía de ensayo Charpy, soldadura con 3.4 mT de interacción electromagnética. -----	98
Figura 4.48. Fractografía de ensayo Charpy, de soldadura con interacción de 4.3 mT -----	99

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Especificaciones de aceros AISI -----	8
Tabla 2.2. Amperajes recomendados para aceros al carbono -----	30
Tabla 3.1. Composición química del acero AISI 1045 y el electrodo ER 70-S -----	36
Tabla 3.2. Características de operación de la máquina de soldar Miller “Dimension 652” -----	37
Tabla 3.3. Características de operación del alimentador de microalambre Miller “Serie 70” -----	37
Tabla 3.4. Composición química del fundente L960 -----	37
Tabla 3.5. Parámetros operativos de soldadura -----	40
Tabla 3.7. Parámetros operativos de soldadura de 1 pasada -----	43
Tabla 4.1. Valores de energía absorbida en probetas de metal base -----	85
Tabla 4.2. Valores de energía absorbida, probetas con soldadura de múltiples pasadas -----	86
Tabla 4.3. Valores de energía absorbida, probetas con soldadura de una sola pasada -----	87

LISTA DE ABREVIATURAS Y TABLA DE SÍMBOLOS

AISI. – Instituto Americano del Hierro y el Acero.

ZAT. - Zona Afectada Térmicamente.

LF.- Línea de fusión.

Fe. - Hierro.

C.- Carbono.

SAE.- Sociedad de Ingenieros Automotrices

Cr .- Cromo.

Mn.- Manganeso.

Mo.- Molibdeno.

Ni.- Níquel.

V.- Vanadio.

P.- Fósforo.

S.- Azufre.

Si.- Silicio.

CE.- Carbono Equivalente.

BCC.- Cúbico centrado en la base.

FCC.- Cúbico centrado en las caras.

CCT.- Diagrama de enfriamiento continuo.

TTT.- Diagrama de Temperatura-Tiempo-Transformación.

Ms.- Inicio de transformación a martensita.

Mf.- Final de transformación a martensita.

SAW.- Soldadura por arco sumergido.

SMAW.- Soldadura con electrodo revestido.

mT.- miliTeslas.

RESUMEN

La soldadura es el proceso de unión de materiales más importante, debido a que prácticamente todo lo fabricado por el ser humano contiene soldadura en alguna de sus partes.

Actualmente existen muchas formas y técnicas para soldar diferentes tipos de aceros, sin embargo, no todos los tipos de acero son soldables, esto quiere decir que las microestructuras formadas después del proceso no son favorables, y, por lo tanto, la unión no satisface el trabajo para la cual fue destinada, y la unión falla.

Por lo cual en el presente estudio se analiza el efecto de la interacción electromagnética de baja intensidad durante el proceso de soldadura. Se llevaron a cabo dos tipos de uniones de acero AISI 1045 en simple V con 2 mm de talón: placas de 13.3 mm de espesor que se soldaron con 2 y 3 pasadas, y placas de 12.7 mm de espesor con una sola pasada. A su vez se soldaron sin interacción electromagnética, y con intensidades de 3.2, 6.4, 3.4 y 4.3 miliTeslas.

Después de haberse soldado se caracterizaron las soldaduras por metalografía y mecánicamente, mediante la realización de perfiles de microdureza, así como mediante los ensayos de tensión e impacto, en la ZAT, utilizando una muesca de 2 milímetros de profundidad para inducir la fractura en la ZAT, tanto en el ensayo de tensión como en el ensayo de impacto.

Los resultados que indican que la interacción electromagnética influyó muy poco en las propiedades mecánicas del material. Los valores de microdureza en la ZAT se mantuvieron en un rango de 280 a 330 HV, los valores de energía absorbida estuvieron en un rango de 6.5 a 18.5 Joules. En cuanto a los ensayos de tensión, los valores del límite elástico fueron en promedio 350 MPa, y los valores de esfuerzo máximo estuvieron en un rango de 570 a 650 MPa.

Palabras clave: zona afectada térmicamente, austenita, perlita, ferrita, crecimiento de grano.

ABSTRACT

Welding is the most important process of joining materials, because almost everything manufactured by humans contains solder in some of its parts.

Nowadays there are many ways and techniques to weld different types of steels, however, not all types of steel are weldable, this means that the microstructures formed after the process are not favorable, and, therefore, the union does not satisfy the work for which it was intended, and the union fails.

Therefore, in the present study, the effect of the low intensity electromagnetic interaction during the welding process is analyzed. Two types of joints were made of AISI 1045 steel in single V with 2 mm bead: plates of 13.3 mm thick that were welded with 2 and 3 passes, and plates of 12.7 mm thick with a single pass. At the same time they were welded without electromagnetic interaction, and with intensities of 3.2, 6.4, 3.4 and 4.3 milliTeslas.

After welding, the welds were characterized by metallography and mechanically, by making microhardness profiles, as well as by stress and impact tests, in the ZAT, using a notch of 2 millimeters deep to induce the fracture in the ZAT, both in the stress test and in the impact test.

The results indicate that the electromagnetic interaction had very little influence on the mechanical properties of the material. The microhardness values in the ZAT were maintained in a range of 280 to 330 HV, the absorbed energy values were in a range of 6.5 to 18.5 Joules. As for the stress tests, the elastic limit values were on average 350 MPa, and the maximum stress values were in a range of 570 to 650 MPa.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente la soldadura es el proceso de unión de materiales más importante y más utilizado del mundo, ya que está presente en casi todas las cosas que diariamente necesita y usa el ser humano, como lo son automóviles, aviones, trenes, construcciones de casas y edificios, herramientas, etc.

Desde la antigüedad los herreros soldaban metales calentándolos, superponiéndolos y golpeándolos en los yunques.

En 1800 se descubre el arco eléctrico, hecho que dio pie a importantes avances en el tema de la soldadura como el electrodo de carbón o el electrodo desnudo, pero sin buenos resultados todavía.

En 1900 se inventa el electrodo recubierto, con el que se consiguen mejores resultados y una soldadura mucho más estable. En ese mismo año, también se diseña el soplete para un nuevo sistema, en el que se aportaba calor quemando acetileno mezclado con oxígeno, que se convierte en un procedimiento utilizado durante bastante tiempo.

Las dos guerras mundiales dieron el impulso definitivo a los procedimientos de soldadura por la necesidad de reparaciones rápidas y fiables. Los británicos fueron los primeros que construyeron un barco totalmente soldado y los estadounidenses usaban la soldadura para reparar rápidamente los daños en sus navíos [1].

Hoy en día, aunque las técnicas de soldadura están muy avanzadas, y los materiales que es posible soldar son muy diversos, aún se tienen problemas para lograr una buena unión entre dos materiales, lo que significa que no se pueden obtener buenas propiedades mecánicas del material o materiales que han sido soldados, lo que disminuye la calidad de la unión y limita el óptimo rendimiento de trabajo para lo que fue diseñado.

Tal es el caso de los aceros al carbono, que, aunque pueden soldarse por arco eléctrico con relativa facilidad, en algunos casos se requiere un especial control del proceso de soldadura [2]. Específicamente la soldadura del acero AISI 1045, se tiene que llevar a cabo mediante una serie de medidas preventivas para evitar la formación de microestructuras que propicien la falla de la unión al cabo de días, semanas e incluso meses. Tales medidas preventivas son el precalentamiento de los materiales base y un enfriamiento controlado después de ser depositado el material de aporte.

Las medidas preventivas mencionadas nos indican que no cualquier soldador es capaz de realizar correctamente una soldadura de ese acero (AISI 1045), lo tiene que realizar una persona capacitada que cuente con el conocimiento y la experiencia para unir este tipo de aceros, lo cual es costoso y a veces difícil de conseguir si deseamos soldar acero de este tipo.

La dificultad para soldar este tipo de aceros se debe a la microestructura resultante en la zona afectada térmicamente que se forma debido al aporte de calor que sufre el material cuando se aplica el cordón de soldadura por arco eléctrico, y después sufre un enfriamiento rápido al aire.

Por lo cual para realizar una soldadura de calidad con las propiedades mecánicas adecuadas se debe cambiar la microestructura resultante en la zona afectada térmicamente (ZAT), aunque el ciclo térmico en el material durante la soldadura siempre estará presente.

Se plantea entonces aplicar campo electromagnético de baja intensidad externo, mediante dos bobinas colocadas en los extremos de la placa que se suelda, de manera axial a la dirección de soldadura, esto para que las fuerzas electromagnéticas influyan en la cinemática de transformación del material base en la ZAT.

Lo anterior debido a que, de acuerdo a experimentos realizados en aceros austeníticos, de doble fase, inoxidable, etc. Se ha podido minimizar la susceptibilidad a la corrosión mediante la aplicación de interacción electromagnética de baja intensidad [3].

Por lo cual es preciso estudiar y comparar las propiedades mecánicas y microestructurales del acero AISI 1045 que ha sido soldado con y sin interacción electromagnética.

JUSTIFICACIÓN

La soldadura específicamente del acero al carbono AISI 1045 siempre se ha realizado utilizando ciertas medidas preventivas, como lo son temperatura de precalentamiento, control de la temperatura interpasos y la temperatura post-soldadura.

Esto debido al bajo grado de soldabilidad de este material, por su elevado porcentaje de carbono (0.45%), el cual determina el grado de soldabilidad en conjunto con el porcentaje de los otros elementos como el manganeso y silicio, lo cual repercute en la zona afectada térmicamente, especialmente en la zona de crecimiento de grano lateral a la línea de fusión, donde se presenta un crecimiento de grano austenítico con la formación de un tipo de microestructura martensítica y bainítica, las cuales son muy susceptibles a la fisuración por hidrógeno.

OBJETIVOS

El objetivo general del presente proyecto es eliminar las medidas preventivas utilizadas cuando el acero AISI 1045 se requiere soldar, esto se pretende lograr mediante la aplicación de la interacción electromagnética de baja intensidad durante el proceso de soldadura.

Los objetivos particulares son los siguientes:

- 1.- Obtener un refinamiento de grano en la ZAT.
- 2.-Disminuir los valores de microdureza en la ZAT.
- 3.- Evitar la susceptibilidad a la fisuración por Hidrógeno en la ZAT.

HIPÓTESIS

De acuerdo a experimentos realizados mediante la aplicación de la interacción electromagnética de baja intensidad durante la soldadura, se ha podido minimizar la susceptibilidad a la corrosión en los aceros inoxidable austeníticos, aceros de doble fase, aceros estabilizados, etc. Aplicando la interacción electromagnética en magnitud y dirección adecuada, lo cual también puede ser benéfico en la soldadura de los aceros de baja aleación en la modificación de la microestructura en la ZAT, con lo cual se puede minimizar el crecimiento de grano.

Con la aplicación de la interacción electromagnética se espera reducir la formación de bainita y martensita por ferrita acicular, lo que evitará la susceptibilidad a la fisuración por hidrógeno en la zona afectada térmicamente.

CAPÍTULO 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.

2.1 Aceros al Carbono

Los aceros al carbono son una aleación de hierro y carbono, cuando este último elemento no sobrepasa el 2% [4]. Contiene pequeñas cantidades de Manganeso, Silicio, Azufre y Fósforo como impurezas, provenientes de las materias primas empleadas en su fabricación [5].

El empleo de los aceros al Carbono es mucho mayor que el de los aceros aleados. Se producen en una gran variedad de formas y dimensiones, y se transforman o emplean directamente, en una gran cantidad de artículos, máquinas, construcciones, artefactos y objetos [6].

En los aceros al carbono, donde la concentración de otros elementos es relativamente baja, suponiendo condiciones de equilibrio, en primera aproximación es válido considerar que el diagrama de equilibrio binario Fe-C es aplicable. Para efectos de los aceros al Carbono, estrictamente basta considerar el extremo rico en Fe de dicho diagrama, en el sector correspondiente al diagrama Fe-cementita. La cementita es un carburo de Fe, un compuesto definido, de carácter no metálico (duro y frágil) y de fórmula estequiométrica Fe_3C [7].

En la figura 2.1 se muestra el diagrama de equilibrio binario Fe-C, el cual es la base fundamental de la metalurgia de los aceros al carbono y fundiciones.

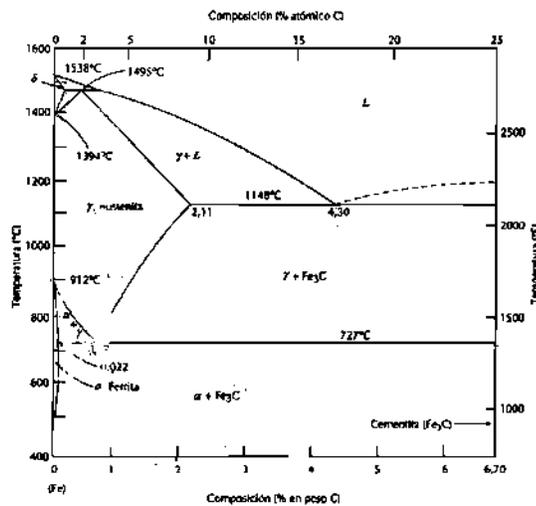


Figura 2.1 Diagrama de equilibrio Hierro-Carbono.

2.2 Clasificación de los Aceros al Carbono

Los aceros al carbono se clasifican en función a la proporción (en peso) del contenido de carbono.

- a) Acero de bajo carbono, también conocido como acero suave o dulce, que tiene menos de 0.25% de carbono. Comúnmente es utilizado para productos industriales comunes, como pernos, tuercas, láminas, placas y tubos para componentes de maquinaria que no requieren alta resistencia [8].
- b) Acero de medio carbono, tiene de 0.25% a 0.60% de carbono. Es generalmente utilizado en aplicaciones que requieren una resistencia más elevada a la disponible en aceros de bajo carbono, como en piezas de equipo de maquinaria automotriz y equipo agrícola (engranes, ejes, bielas, cigüeñales), en equipo de ferrocarriles, y en piezas para maquinaria de trabajado de metales [9].
- c) Acero de alto carbono, tiene más de 0.60% de carbono. Se utiliza por lo general para partes que requieren resistencia mecánica, dureza y resistencia al desgaste, como las herramientas de corte, cable, resortes y cuchillería. Después de haber sido manufacturada su forma, las piezas por lo general son tratadas térmicamente y templadas. Mientras más elevado sea el contenido de carbono del acero, más alta será su dureza, su resistencia mecánica y su resistencia al desgaste [10].

2.3 Efecto de los elementos químicos en los aceros al carbono

Aunque el acero al carbono AISI 1045, es un material que no contiene elementos de aleación, puede haber ciertas impurezas presentes en el material, ya sea por contaminación debida a factores externos, o debido a contaminación adquirida en los diversos procesos de fabricación.

A continuación, se describen los efectos que producen los elementos químicos que están presentes comúnmente en el acero AISI 1045:

Carbono: A medida que aumenta la cantidad de carbono, incrementa la dureza, la resistencia a la tracción, así como la respuesta a los tratamientos térmicos de endurecimiento. Sin embargo, a medida que incrementa su porcentaje, reduce la ductilidad, la soldabilidad y la tenacidad [11].

Manganeso: Mejora la templabilidad, la resistencia mecánica, la resistencia a la abrasión y la maquinabilidad; desoxida el acero fundido y reduce la fragilidad en caliente, así como también reduce la soldabilidad. [12].

Aunque en una proporción muy inferior a la del carbono, el manganeso ejerce también las mismas influencias sobre las cifras mecánicas, en los aceros ordinarios [12].

Azufre: Es un elemento perjudicial en el acero que causa fragilidad y reduce la soldabilidad [13].

Fósforo: La presencia de fósforo debe tratarse de limitar, porque este elemento produce fragilidad en el acero, especialmente en frío. Durante el proceso de soldadura, el fósforo actúa en el momento de la solidificación formando el fosfuro de hierro, que produce la fragilidad al metal y además aumenta el tamaño de grano del metal fundido, reduce la soldabilidad cuando está presente en cantidades superiores a 0.04% especialmente en la presencia de azufre [13].

Silicio: El silicio forma, con el hierro, siliciuro de hierro, elemento que no es perjudicial. Además, es un elemento alfégeno. La soldadura con contenido de silicio tiende a incrementar sustancialmente su resistencia mecánica pero su ductilidad disminuye, pudiendo ocasionar problemas de fisuras [14].

2.3.1 Designación numérica de los aceros

Debido a la necesidad de tener un código o clave para diferenciar los aceros de acuerdo a su composición química, se creó un tipo de nomenclatura con el fin de estandarizar y poder saber más fácilmente de qué tipo de acero se trata con solo ver los dígitos que lo conforman.

De acuerdo a un esquema de especificaciones desarrollado por la American Iron and Steel Institute (AISI) y la Sociedad de Ingenieros Automotrices (SAE), los aceros al carbono se especifican por un sistema de numeración de cuatro dígitos: 10 XX, donde 10 indica que el acero es al carbono, y XX indica el porcentaje de carbono en cientos o puntos porcentuales [15]. Por lo tanto, el acero AISI 1045 contiene 0.45% de carbono.

Las especificaciones AISI de aceros al carbono y algunos aceros de baja aleación se presentan en la tabla 2.1, que indica el análisis químico nominal en cada acero.

Tabla 2.1 Especificaciones de aceros AISI

Tipo	Nombre del acero	Análisis químico nominal, %							
		Cr	Mn	Mo	Ni	V	P	S	Si
10 XX	Al carbono		0.4				0.04	0.05	
11 XX	Resulfurado		0.9				0.01	0.12	0.01
12 XX	Resulfurado Refosforado		0.9				0.10	0.22	0.01
13 XX	Manganeso		1.7				0.04	0.04	0.3
20 XX	Aceros al níquel		0.5		0.6		0.04	0.04	0.2
31 XX	Níquel-cromo	0.6			1.0		0.04	0.04	0.3
40 XX	Molibdeno		0.8	0.25			0.04	0.04	0.2
41 XX	Cromo-molibdeno	1.0	0.8	0.2			0.04	0.04	0.3
43 XX	Ni-Cr-Mo	0.8	0.7	0.25	1.8		0.04	0.04	0.2
46 XX	Níquel-molibdeno		0.6	0.25	1.8		0.04	0.04	0.3
47 XX	Ni-Cr-Mo	0.4	0.6	0.2	1.0		0.04	0.04	0.3
48 XX	Níquel-molibdeno		0.6	0.25	3.5		0.04	0.04	0.3
50 XX	Cromo	0.4	0.4				0.04	0.04	0.3
52 XX	Cromo	1.4	0.4				0.02	0.02	0.3
61 XX	Cr-vanadio	0.8	0.8			0.1	0.04	0.04	0.3
81 XX	Ni-Cr-Mo	0.4	0.8	0.1	0.3		0.04	0.04	0.3
86 XX	Ni-Cr-Mo	0.5	0.8	0.2	0.5		0.04	0.04	0.3
88 XX	Ni-Cr-Mo	0.5	0.8	0.35	0.5		0.04	0.04	0.3
92 XX	Silicio		0.8				0.04	0.04	2.0
93 XX	Ni-Cr-Mo	1.2	0.6	0.1	3.0		0.02	0.02	0.3
98 XX	Ni-Cr-Mo	0.8	0.8	0.25	1.0		0.04	0.04	0.3

2.4 Soldadura de los aceros al carbono

En la soldadura de los aceros al carbono, el calor tiene efecto sobre la estructura de la zona afectada por el mismo. Cuando se calienta una pieza de acero a elevadas temperaturas, su microestructura presenta un cambio apreciable. El acero, constituido inicialmente por una mezcla de ferrita y perlita, o de perlita y cementita, pasa a tomar la forma de una solución sólida, conocida como austenita, en la que el carbono está disuelto de manera uniforme en el hierro austenítico. Si la austenita formada durante el calentamiento experimenta un enfriamiento brusco, se transforma en una estructura martensítica que deja al acero extremadamente duro y frágil. Cuando éste fenómeno se presenta, es muy probable la aparición de fisuras, tanto en el cordón como en el metal base [16].

2.4.1 Soldadura de aceros con bajo contenido de carbono.

Estos aceros son los más fáciles de soldar. No exigen ninguna precaución particular, debido a que el calor aportado no tiene efectos importantes sobre la microestructura del metal base [17].

2.4.2 Soldadura de aceros con medio contenido de carbono.

Estos aceros presentan contenidos de carbono iguales o superiores a 0.40% y son fácilmente templables. La dificultad de soldadura es mayor, por lo que se tienen que tomar las medidas adecuadas como lo son precalentamientos y post calentamientos. Esto para reducir la tendencia a la fisuración en algún punto de la unión [18].

2.4.2.1 Precalentamiento durante la soldadura

El precalentamiento consiste en calentar el metal base a una temperatura entre 50 y 250 °C. Su finalidad principal es la de reducir la velocidad de enfriamiento de la zona soldada. El precalentamiento reduce la diferencia de temperaturas entre la zona de soldadura y el resto de la pieza. Como consecuencia la pérdida de calor es más lenta y disminuye la tendencia a la formación de martensita en la ZAT. Cuando se solda con precalentamiento hay menos probabilidad de que se desarrollen zonas duras laterales a la línea de fusión del cordón, que cuando se solda en frío. El precalentamiento se realiza con una llama oxiacetilénica sobre la superficie de la pieza a soldar o introduciéndola en un horno dependiendo del tamaño de la pieza o mediante la aplicación de un campo magnético si la soldadura se realiza en campo [19].

2.4.2.2 Post calentamiento durante la soldadura

El post calentamiento se aplica principalmente como un tratamiento de alivio de esfuerzos o revenido de la martensita. Es tan importante como el precalentamiento. Aunque el precalentamiento controla la velocidad de enfriamiento, no evita la aparición de tensiones. Si no se eliminan estas tensiones, pueden provocar fisuraciones en frío o grandes deformaciones en la pieza.

La temperatura de post calentamiento para atenuación de tensiones suele situarse entre 470 y 670 °C [20].

2.4.3 Agrietamiento en la zona afectada térmicamente

La zona afectada térmicamente (ZAT) es aquella región del metal base que está en la inmediación del cordón de soldadura sufriendo ciclos de calentamiento y enfriamiento [21].

A pesar de que está relacionada con el proceso de soldadura, en este caso la grieta se produce en el material base, no en el material de soldadura.

Este tipo de agrietamiento también se conoce como "agrietamiento de talón", o "agrietamiento retardado." Debido a que este agrietamiento se produce después de que el acero se ha enfriado por debajo de aproximadamente 200°C, también se le puede denominar "agrietamiento en frío", y como se asocia con el hidrógeno, también se le llama "agrietamiento asistido por hidrógeno" [22].

A fin de que en la zona afectada por el calor se produzca agrietamiento, se deben presentar tres condiciones. Estas condiciones deben estar presentes simultáneamente: debe haber un nivel suficiente de hidrógeno, tiene que haber un material suficientemente sensible involucrado, y, debe existir un nivel suficientemente alto de tensión residual o aplicada. La reducción o eliminación adecuada de una de las tres variables generalmente elimina este tipo de agrietamiento. En aplicaciones de soldadura, el enfoque típico es limitar dos de las tres variables, a saber, el nivel de hidrógeno y la sensibilidad del material [23].

La figura 2.2 muestra los diferentes tipos de agrietamiento en la soldadura. La figura 2.2a) muestra un agrietamiento en la ZAT en dirección paralela al cordón de soldadura, la figura 2.2b) muestra un agrietamiento sobre el cordón y la ZAT en dirección perpendicular al cordón de soldadura, la figura 2.2c) nos indica un agrietamiento longitudinal o central paralelo al cordón de soldadura y la figura 2.2 d) muestra un agrietamiento sobre la ZAT en una soldadura de unión de tipo "T" o filete.

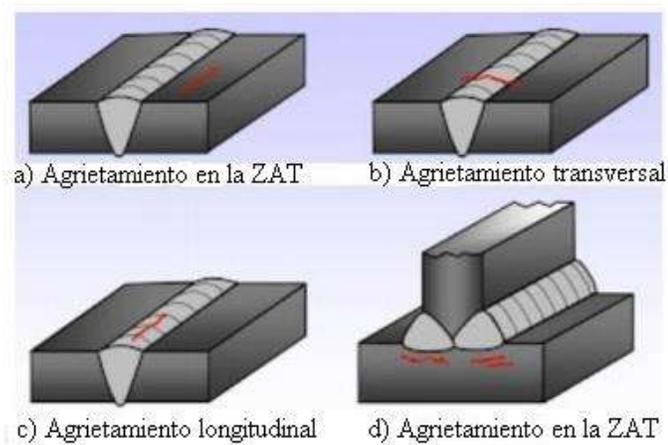


Figura 2.2 Tipos de agrietamiento en la soldadura

2.5 Concepto de carbono equivalente

En la soldadura por arco eléctrico de aceros al carbono y de baja aleación, el endurecimiento de la zona afectada por el calor (ZAT) del metal base es causado normalmente por la transformación de la austenita en martensita que resulta del rápido enfriamiento del metal de soldadura. El grado de endurecimiento depende del contenido de elementos aleantes y la velocidad de enfriamiento.

Para los aceros al carbono y de baja aleación, el efecto de la composición química se evalúa por medio del carbono equivalente desarrollado empíricamente usando la siguiente ecuación [24]:

$$CE = \% C + \frac{\% Mn + \% Si}{4}$$

Desde una perspectiva metalúrgica, el carbono equivalente (CE) puede relacionarse con el desarrollo de las microestructuras sensibles al hidrógeno. Es decir, a medida que aumenta el valor del carbono equivalente, las microestructuras evolucionan durante el enfriamiento a través del rango de temperatura de transformación que son cada vez más susceptibles al agrietamiento inducido por hidrógeno. A altos valores de carbono equivalente, se puede esperar las transformaciones de las estructuras martensíticas.

Las fórmulas de carbono equivalente generalmente se desarrollan a partir de grandes bases de datos de concentraciones críticas de hidrógeno y de uniones de soldadura que resultarán en el agrietamiento inducido por hidrógeno en los aceros considerados. En varios niveles de carbono equivalente, a menudo se establecen ciertos requisitos de precalentamiento de soldadura.

En la fórmula anterior, cuando el valor del CE es mayor a 0.40, se recomiendan medidas de precalentamiento y post calentamiento en la soldadura, esto para minimizar la susceptibilidad a la fisuración por hidrógeno [25].

2.6 Metalurgia de la soldadura

La naturaleza de la microestructura de la soldadura para un material dado resulta de la combinación del ciclo térmico de la soldadura y la composición del material. En general, las velocidades de calentamiento y enfriamiento asociadas con la soldadura son bastante altas (800 - 1000 ° C / s) y, por lo general, evitan la predicción de la microestructura en base a los principios termodinámicos

de equilibrio [26]. Todos los procesos metalúrgicos que influyen en la microestructura de la soldadura dependen de la temperatura y la velocidad de calentamiento / enfriamiento, y, por lo tanto, el ciclo térmico de la soldadura desempeña un papel clave en la evolución de la microestructura y, en última instancia, la soldabilidad del material [27].

2.6.1 Regiones de una unión soldada

El examinar una unión soldada nos revela distintas regiones microestructurales. La zona de fusión es donde funde el material. En la zona afectada térmicamente, aunque no alcanza el punto de fusión, se ve afectada por el aporte de calor. Más allá de la ZAT está el metal base que no es afectado por el ciclo térmico [28].

La zona de fusión se describe como tal porque es la región donde se produce la fusión y la solidificación para formar la unión o soldadura. Dado que todos los metales son de naturaleza cristalina, muchos poseen redes cristalinas cúbicas, existen fenómenos generales de solidificación comunes a todos los metales [29]. En muchos materiales, el comportamiento de solidificación es muy sensible a la composición. Por ejemplo, la adición de pequeñas cantidades de carbono y nitrógeno a algunos aceros puede cambiar su comportamiento de solidificación de ferrítico (BCC) a austenítico (FCC). Las adiciones mínimas de azufre a los aceros pueden promover un agrietamiento severo en la zona de fusión. La figura 2.3 ilustra las regiones presentes en un cordón de soldadura típico.

La microestructura y las propiedades de la HAZ están controladas únicamente por las condiciones térmicas experimentadas durante la soldadura y el tratamiento térmico posterior a la soldadura.

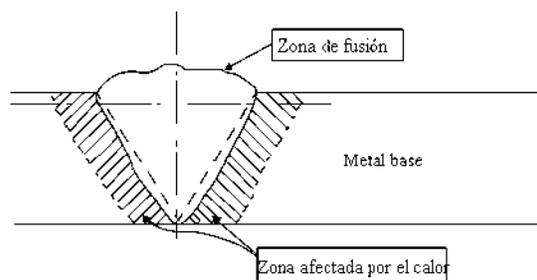


Figura 2.3 Regiones formadas en un cordón de soldadura.

El acero experimenta una transformación de fase, lo que puede resultar en una ZAT que tiene una microestructura y propiedades totalmente diferentes a las del metal base o la zona de fusión [30].

2.6.2 Zona de fusión

La zona de fusión es normalmente muy distinta de la ZAT circundante y del metal base cuando las muestras se preparan metalográficamente. Esto se debe a las fluctuaciones tanto macroscópicas como microscópicas en la composición que resultan del proceso de solidificación [31].

La comprensión de las regiones de una soldadura ha evolucionado enormemente desde los años sesenta. Antes de ese tiempo, se pensaba que una soldadura de fusión consistía en solo dos regiones, la Zona de Fusión y una ZAT circundante.

Las décadas de 1960 y 1970 revelaron que existían otras regiones distintas de una soldadura por fusión.

En soldaduras donde el metal de aporte es de una composición diferente del metal base, se determinó que existen más de 2 regiones teóricamente. La mayor de ellas es la zona compuesta (ZC), que consiste en un metal de aportación diluido uniformemente con el metal base. Adyacente al límite de fusión, pueden existir dos regiones adicionales. La zona sin mezclar (ZSM) consiste en un metal base fundido y resolidificado donde se ha producido una mezcla insignificante con el metal de aportación. Entre la ZSM y la ZC, debe existir una zona de transición (ZT) donde una composición gradiente del metal base a la ZC está presente [32].

El nuevo esquema de las regiones en una soldadura se muestra en la figura 2.4.

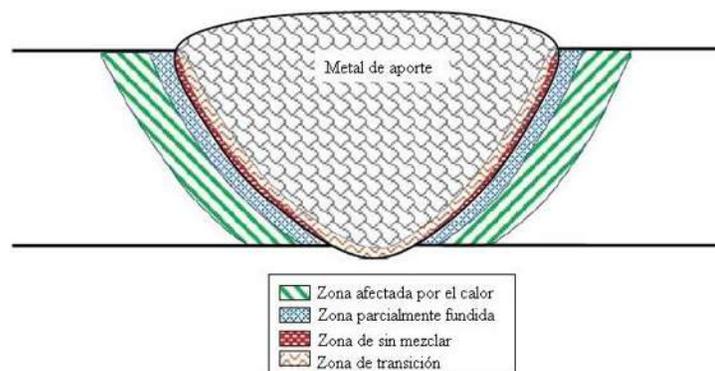


Figura 2.4 Esquema con nuevas regiones de un cordón de soldadura.

2.6.3 Zona afectada por el calor

Todas las reacciones en la ZAT ocurren en estado sólido. No se producen reacciones de fusión o licuación en esta región [33].

La evolución de la microestructura en la ZAT puede ser bastante compleja, dependiendo tanto de la composición como de los factores térmicos. Las velocidades de calentamiento y enfriamiento influirán en las reacciones en esta región y, a menudo, pueden tener efectos microestructurales profundos dentro de la misma aleación o sistema de aleación [34].

La microestructura ZAT que rodea una soldadura por fusión está influenciada por muchas variables.

El proceso de soldadura y la entrada de calor, el tipo de material y la condición del material antes de la soldadura son variables importantes que pueden afectar el historial térmico de la ZAT y, por ende, la microestructura resultante.

Debido a que la ZAT experimenta ciclos térmicos (temperaturas máximas y velocidades de enfriamiento), es posible un amplio rango de microestructuras dentro de la misma soldadura y las variaciones locales pueden ser grandes [30].

Las reacciones que ocurren en la ZAT pueden ser bastante complejas. Hay muchas reacciones metalúrgicas posibles, y cualquier área dada en el ZAT puede sufrir una o más de las siguientes reacciones posibles:

- 1.- Recristalización.
- 2.- Crecimiento de grano.
- 3.- Transformaciones de fase.
- 4.- Disolución de los precipitados
- 5.- Formación de precipitados.
- 6.- Esfuerzo residual y relajación de esfuerzos.

El diagrama de equilibrio de fases es una guía para determinar posibles reacciones en la mayoría de los sistemas de materiales. Durante la soldadura, el calentamiento y enfriamiento rápidos pueden suprimir estas reacciones de equilibrio y / o promueven otras no predichas por el diagrama de fase.

Por ejemplo, los diagramas de transformación de enfriamiento continuo (CCT) han sido desarrollados para aceros que predicen transformaciones a fases metaestables que no están presentes en el diagrama de fase de equilibrio, como la transformación de austenita a bainita y martensita.

Las condiciones de entrada y flujo de calor pueden influir en las dimensiones y la naturaleza de la ZAT. Estas dimensiones son controladas por el gradiente de temperatura del límite de fusión en el metal base circundante y la naturaleza de las reacciones metalúrgicas que ocurren en ese rango de temperatura. En situaciones donde el aporte de calor es bajo y / o el flujo de calor es efectivo (alta difusividad térmica), hay una ZAT de tamaño pequeño como resultado.

La microestructura de la ZAT en los aceros se puede predecir, a una primera aproximación, utilizando el diagrama de fase Fe-C, como se muestra en la figura 2.5. El metal base comienza a transformarse en austenita al calentarse por encima de la temperatura crítica inferior (AC_1) y es completamente austenítico por encima de la temperatura crítica superior (AC_3).

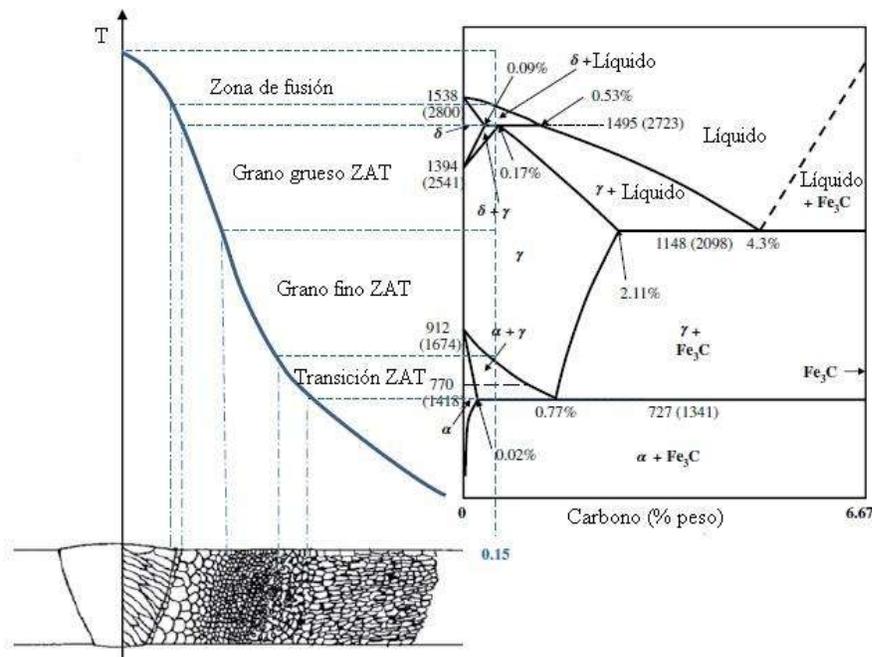


Figura 2.5 Relación entre el diagrama Fe-C y la microestructura en la ZAT de aceros al carbono.

Cuando el aporte de calor es alto y / o el flujo de calor de la soldadura está restringido, resultará en una ZAT más amplia.

De manera similar, existirá una ZAT amplia en la soldadura de materiales de lámina delgada, ya que el flujo de calor es controlado por el espesor del material [30].

2.6.3.1 Recristalización y crecimiento de grano

Cuando la soldadura se realiza en materiales que han sido reforzados por el trabajo en frío, la ZAT se suavizará por recristalización y crecimiento de grano de la microestructura trabajada en frío. Este proceso realmente ocurre en tres etapas, durante la etapa de recuperación, la energía interna se reduce por la reorganización de las dislocaciones. Esto a menudo da como resultado lo que se describe como una estructura de dislocación celular que produce regiones libres de tensiones en la estructura. Son estas regiones libres de tensión las que actúan como núcleos para los granos recién formados.

Dado que el mecanismo involucrado resulta en una reorganización de la dislocación en lugar de la aniquilación, hay poco efecto sobre la resistencia o ductilidad del material.

En la etapa de recristalización, las dislocaciones se aniquilan a medida que crecen los núcleos libres de tensión. Estos núcleos se convierten en nuevos granos y continúan creciendo y consumiendo la microestructura anterior, altamente dislocada. Esto resulta en una disminución dramática en la resistencia y la dureza, con un aumento correspondiente en la ductilidad.

Con tiempo o temperatura adicional, el crecimiento del grano continúa. La fuerza motriz para esta reacción es la reducción de la energía total del límite del grano al reducir el área del límite. Este proceso disminuye gradualmente a medida que los granos se hacen más grandes. El aumento en el tamaño de grano más allá de la etapa de recristalización resulta en una disminución adicional en la resistencia [30].

2.6.3.2. Transformaciones de fase alotrópicas

Varios metales experimentan transformaciones alotrópicas. El término "alotropía" significa que el metal puede tomar diferentes formas cristalográficas en función de la temperatura. Los más destacados entre estos metales son el hierro y el titanio.

Las transformaciones alotrópicas en los aceros se pueden utilizar con gran ventaja para optimizar las propiedades mecánicas, particularmente la resistencia. Para los aceros, debido a que la ZAT abarca un rango de temperatura muy grande, desde el sólido hasta la temperatura crítica más baja (AC_1), una variedad de microestructuras puede producir estos materiales debido a las transformaciones alotrópicas.

Estos incluyen ferrita, perlita (mezcla de ferrita y cementita), bainita (tanto superior como inferior) y martensita. La naturaleza de la transformación y la microestructura ZAT resultante se controlan tanto por la composición como por la velocidad de enfriamiento.

Por otro lado, los diagramas de CCT (de enfriamiento continuo), se han desarrollado para muchos aceros para predecir su microestructura en función de las condiciones de enfriamiento. Estos diagramas son muy útiles para predecir la microestructura de la ZAT en aceros al carbono, de baja aleación y de alta resistencia, si la velocidad de enfriamiento de la ZAT se puede medir o aproximar.

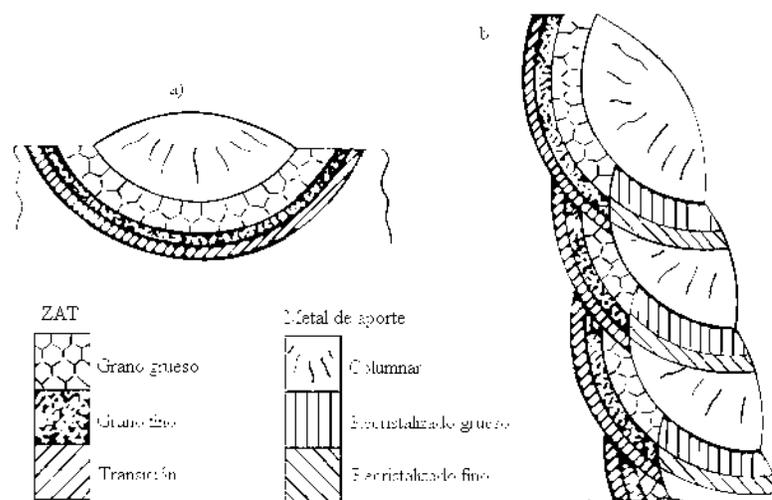


Figura 2.6 Evolución de la microestructura durante la soldadura de múltiples pasadas en aceros.

En las soldaduras de varias pasadas en aceros, la evolución de la microestructura en la ZAT se vuelve muy complicada debido al recalentamiento de la microestructura subyacente y el solapamiento de las demás regiones. Esto se muestra esquemáticamente en la figura 2.6.

En la figura 2.6a) se observa el típico crecimiento de grano en la ZAT, y conforme la ZAT se acerca al metal base, el refinamiento de grano es mayor.

En la figura 2.6b) se observa un esquema donde se han depositado cordones desoldadura de varias pasadas, lo cual nos resulta una microestructura diferente en la ZAT y en el material depositado [30].

2.6.3.3 Reacciones de precipitación

Muchas aleaciones de ingeniería (como las aleaciones de Al y las superaleaciones de base de Ni) se refuerzan mediante reacciones de precipitación. Durante la soldadura, los precipitados de refuerzo pueden disolverse o modificarse de otro modo en la ZAT. La disolución ocurrirá típicamente por encima de cierta temperatura crítica, a menudo llamada temperatura de solvus. Por debajo de esta temperatura, el precipitado no se disolverá, pero en realidad puede crecer. Esto puede producir una reacción que puede resultar en un ablandamiento en la ZAT.

Al enfriarse, la precipitación puede ocurrir en áreas de la ZAT donde se produjo la disolución durante el calentamiento. El grado de precipitación dependerá de la composición y la velocidad de enfriamiento. Con el fin de recuperar la resistencia perdida en la ZAT durante la soldadura, las soldaduras a menudo reciben un tratamiento post soldadura [30].

2.7 Microestructuras presentes en los aceros al carbono

Austenita. Es el constituyente más denso de los aceros y está formada por la solución sólida de inserción de los átomos de carbono en los intersticios octaédricos de hierro γ . La relación entre los radios de los huecos y de los átomos de Fe es 0.414. Mientras que la relación entre los radios de los átomos de carbono y hierro es 0.6.

Por lo tanto, los átomos de carbono no encajan totalmente en los huecos y al introducirse en ellos provocan una distorsión en la red cristalina; por este motivo, no resulta posible que los huecos se llenen por completo, de manera que a 1148 °C la máxima solubilidad del carbono en el hierro γ es de solo un 2.11% [35].

Ferrita α . Es la solución sólida de inserción octaédrica del carbono en el hierro α . El tamaño de los huecos octaédricos en una red BCC es $r_{i/rFe}=0.155$, mucho menor que en la red FCC; por lo tanto, la solubilidad del carbono será menor en este caso, hasta el punto de que a 727°C su valor máximo es de 0.0218%. Por este motivo, la ferrita se considera como hierro prácticamente puro, siendo el constituyente más blando y dúctil de los aceros [35].

Ferrita δ . Es la solución sólida intersticial de carbono en el hierro δ . Su estructura, al igual que la de la ferrita, es BCC; pero, al ser mayor su constante de red, su solubilidad máxima también es mayor: 0.09% a 1,495 °C [35].

Cementita. Se trata de un compuesto intermetálico cuya composición estequiométrica responde a la fórmula Fe_3C (6.67 %C). Cristaliza en el sistema ortorrómbico y es el constituyente más duro y frágil de los aceros [36].

Perlita. Es la estructura resultante de la solidificación de un acero eutectoide. Si el enfriamiento se produce de forma lenta, cada grano de perlita está formado por láminas alternadas de cementita y ferrita; su nombre se debe a su forma parecida a la de las perlas, que presenta al ser iluminada. Pero si el enfriamiento tiene lugar de forma rápida, la estructura resultante es más borrosa, y se denomina perlita sorbítica o sorbita. Si la perlita laminar se calienta un poco por debajo de la temperatura crítica 727 °, la cementita adopta la forma de glóbulos incrustados en la masa de ferrita, y en este caso recibe el nombre de perlita globular [37].

2.8 Diagramas de transformación del acero AISI 1045.

Para comprender de una mejor manera el cómo afectan los ciclos térmicos a la microestructura del acero, en la figura 2.7 se muestra el diagrama temperatura, tiempo, transformación (TTT). El cual nos ayuda a predecir de acuerdo a las variables ahí indicadas que microestructura o microestructuras estarán presentes al finalizar el ciclo térmico [38].

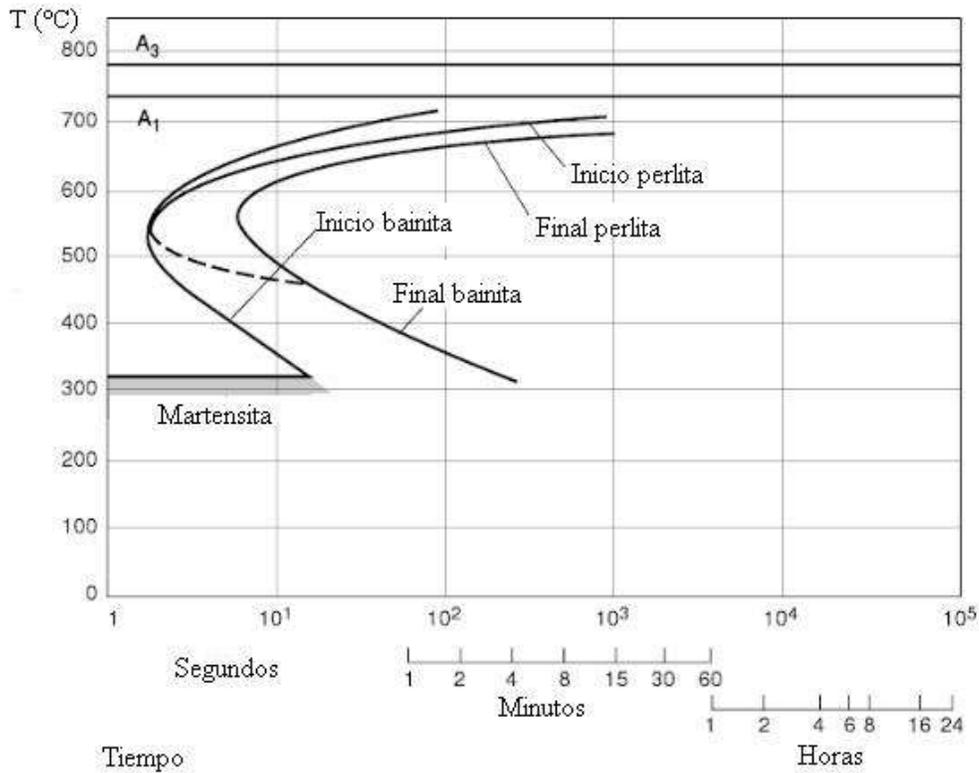


Figura 2.7 Diagrama TTT del acero AISI 1045

El diagrama anterior es exclusivamente para un acero AISI 1045, ya que para un acero con un distinto porcentaje de carbono o con elementos de aleación, las curvas tienden a recorrerse y el diagrama presentará fases distintas.

Este diagrama presenta una zona superior donde se produce la separación de ferrita libre o cementita (secundaria), respectivamente. A continuación, por debajo de la temperatura AC_1 , comienzan a formarse los cristales de ferrita y cementita constitutivos de la perlita; cuando la temperatura es elevada, los granos son grandes y las láminas gruesas. A temperaturas más bajas, cuando la difusión se encuentra restringida, la perlita es más fina. Por debajo de la nariz se forma una nueva estructura: bainita. Está constituida por ferrita en forma de agujas (figura 2.8) [39], o plumas con carburos precipitados. Tiene elevada dureza y tenacidad, pero baja resistencia a la fatiga.

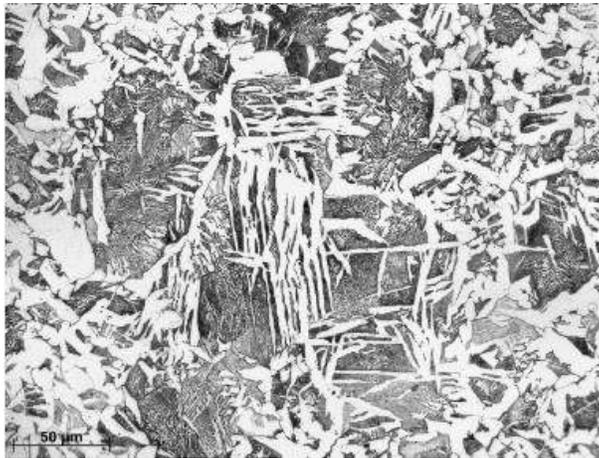


Figura 2.8 Micrografía que muestra la ferrita en forma de agujas.

Cuando la velocidad de enfriamiento es superior a la crítica, no hay tiempo para la difusión del carbono, quedando, luego de la transformación alotrópica, ferrita sobresaturada. Esto produce una deformación de la red, tanto mayor cuanto mayor sea el contenido de carbono del acero. La estructura se denomina martensita, tiene elevada dureza, fragilidad y límite de fatiga, y ocupa mayor volumen que la austenita que le dio origen. La figura 2.9 muestra la forma de la martensita.

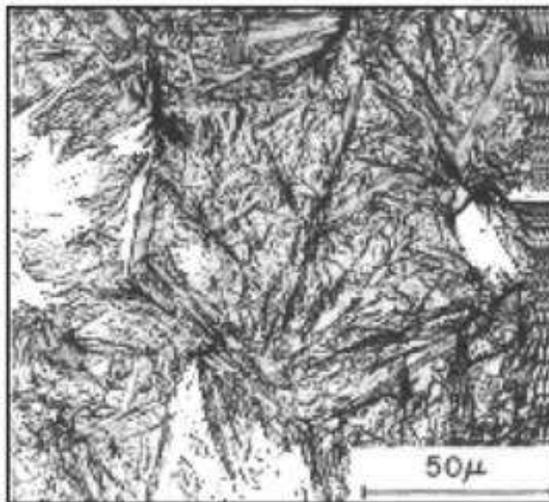


Figura 2.9 Micrografía donde se observa martensita en un acero al carbono.

La transformación de austenita en martensita comienza a un valor de temperatura denominado M_s y termina cuando ha descendido hasta otro llamado M_f .

Los valores de M_s y M_f dependen del acero, disminuyendo cuando aumenta el contenido de carbono y de otros elementos aleantes como cromo, manganeso y níquel, y cuando el grano austenítico es grande [40]. Cuando M_s y M_f son bajas y la nariz perlítica se encuentra desplazada a la derecha del diagrama, el acero es más templable. La velocidad crítica (tangente a la nariz, sin tocarla) es menor y puede obtenerse martensita enfriando en medios menos severos como el aceite. La templabilidad de un acero indica su capacidad para adquirir dureza en el temple y que ésta penetre hacia el interior.

Ahora en la figura 2.10 se muestra el diagrama de enfriamiento continuo (CCT), del acero AISI 1045 [41]:

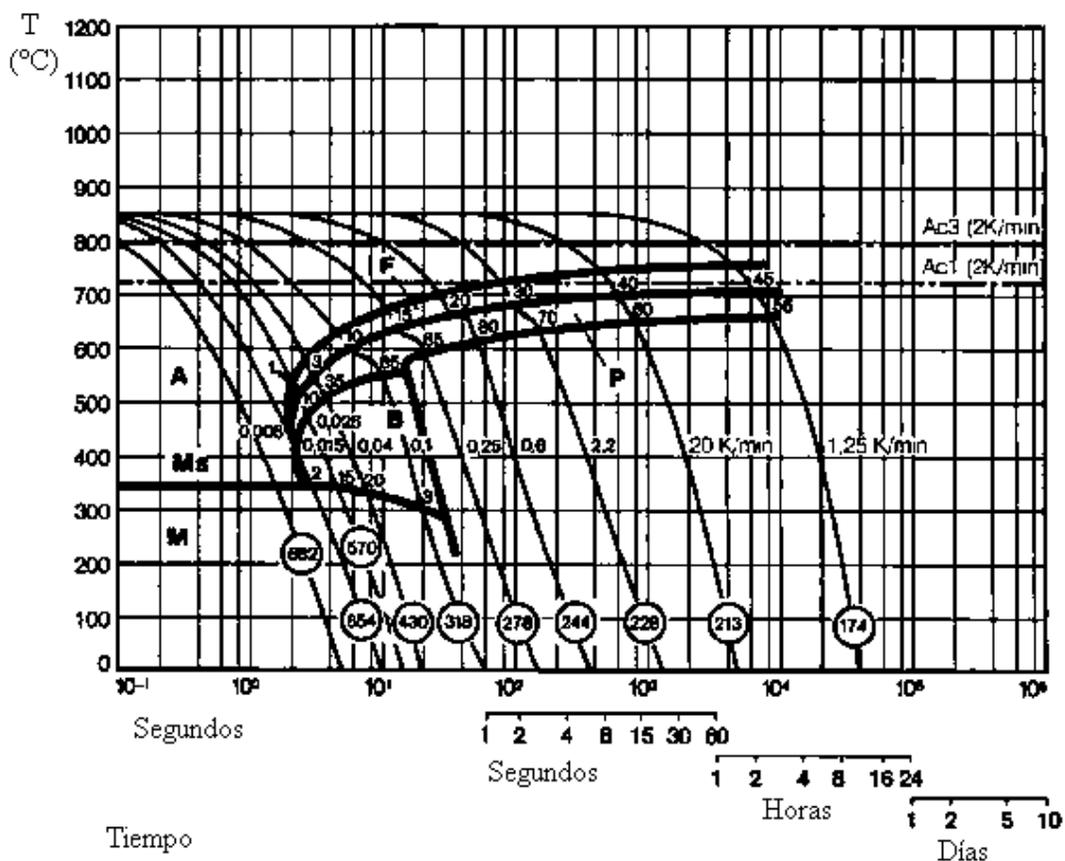


Figura 2.10 Diagrama CCT del acero AISI 1045.

El diagrama anterior nos ayuda a predecir las microestructuras presentes que estarán en el acero, para distintas velocidades de enfriamiento. A cada velocidad de enfriamiento respecto al tiempo vamos a obtener una o varias microestructuras en el material.

2.9 Proceso de Soldadura por Arco Sumergido (SAW)

El proceso de soldadura por arco sumergido consiste en la fusión de un electrodo, aportado de forma continua y automática, y el material de la pieza a soldar. La protección de la soldadura se realiza mediante un fundente, granulado o en polvo, que generalmente se suministra desde una tolva [42].

Diferente a la soldadura común en la que se ve el arco de soldadura quemándose entre el electrodo y la pieza, el arco y el baño de fusión están cubiertos por un polvo granulado. La función principal de este polvo recae en los residuos formados durante el proceso: Una escoria que sirve para proteger al operario de quemaduras frente a las altas temperaturas y a la zona de la soldadura frente a la influencia de la atmosfera [43].

Fue presentado casi a mediados del siglo pasado y, a partir de la segunda mitad de dicho siglo, se introdujo la soldadura multielectrodo y se perfeccionó el equipo.

Las altas intensidades de soldeo no provocan molestias al soldador, ya que el arco no es visible, por lo tanto, se deben de regular los parámetros cuidadosamente.

Su alta calidad y velocidad de soldadura, en combinación a su sistema de automatización designa a la soldadura por arco sumergido como proceso de alto rendimiento [43].

2.9.1 Aplicaciones del proceso SAW

Las principales aplicaciones de este proceso de soldadura son:

1. Fabricación de recipientes a presión.
2. Estructuras metálicas.
3. Construcción naval.
4. Fabricación de tuberías.
5. Construcción ferroviaria.

2.9.2 Ventajas del proceso de soldadura SAW

Las juntas pueden ser preparadas en “V” con poca profundidad debido a la elevada penetración del proceso, obteniéndose con esto un menor consumo de alambre y fundente [44].

1. Los procesos de soldadura pueden realizarse a altas velocidades debido a la elevada intensidad con que se opera en la mayoría de las aplicaciones.
2. No es necesario proteger al operador de la emisión de radiación, ya que el arco se encuentra sumergido en el fundente, evitándose además las salpicaduras del metal fundido. El fundente actúa como un desoxidante protegiendo el arco y aportando elementos de aleación al cordón en el caso de emplear fundentes aleados.
3. Cordones en acabado uniforme.
4. Permite la utilización de distintas técnicas que contribuyen para el aumento de la productividad (múltiples alambres, adición de polvo de hierro, etc.).
6. Proceso estable con poco humo y salpicaduras.
7. Alta productividad.
8. El hecho de que se puede ejecutar en un solo pase, hasta en materiales de gran diámetro.
9. Es muy confiable si los parámetros de operación son los correctos.
10. Muy poca tensión transversal.
11. Muy bajo riesgo de grietas por hidrogeno.

2.9.3 Desventajas del proceso de soldadura SAW

1. El fundente necesita precauciones para que no se contamine.
2. La posición de la soldadura está restringida a plana y horizontal.
3. Muchas soldaduras requieren algún tipo de respaldo para evitar la perforación del metal base.
4. Equipos muy costosos, así como la instalación es compleja.

En la figura 2.11 se muestra un esquema de los componentes que conforman el equipo de soldadura por SAW.

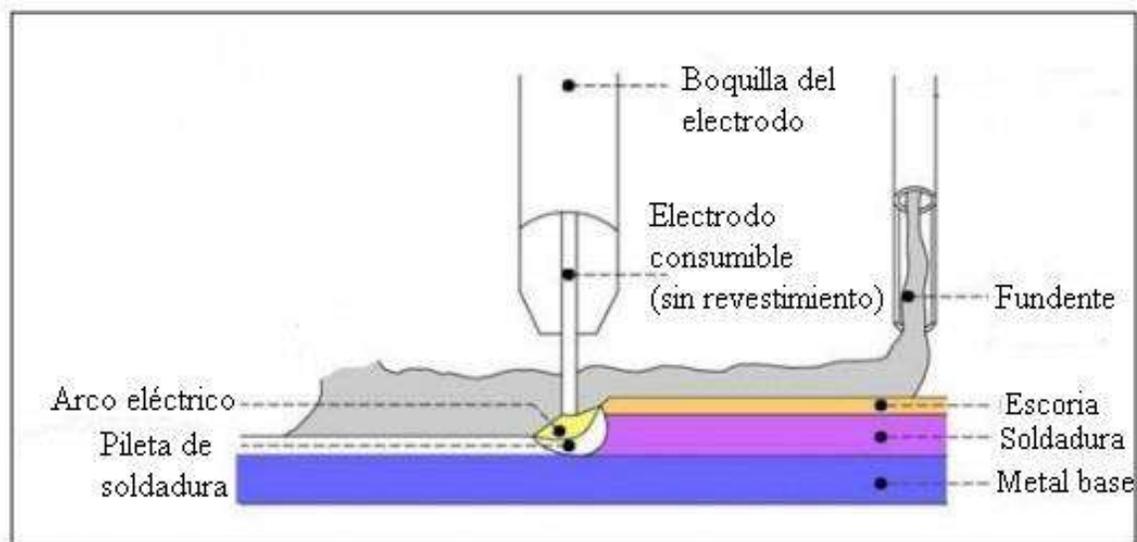


Figura 2.11 Esquema de los elementos del proceso de soldadura con arco sumergido (SAW)

2.9.4 Metales de aporte

En el proceso de soldadura por arco sumergido se utilizan metales de aporte suministrado, generalmente, en carretes de electrodo a partir de 10 kg. Pueden ser macizos o huecos.

Los diámetros de electrodo más utilizados son entre 1.6 y 6.4 m. Existen electrodos de aporte para aceros, aceros inoxidable, aleaciones no férricas y aleaciones especiales [45].

2.9.5 Fundentes

En la soldadura por arco sumergido, el baño por fusión se protege mediante los fundentes de forma parecida a como lo hace el recubrimiento del electrodo en la soldadura eléctrica de tipo SMAW. Cubren el baño con una escoria que se forma al fundirse el fundente.

El fundente se suministra mediante una tolva acoplada al equipo y se va recogiendo el sobrante por un sistema de aspirado. Normalmente, se presenta en forma de polvo o granulado, que tendrán

diferente tamaño de acuerdo al tipo de soldadura que se va a realizar. Pueden ser finos, medios y gruesos [42].

Generalmente se utilizan tres tipos:

1. Fundentes fundidos. Para su fabricación se mezcla la materia prima y se funde en el horno a unos 1,600 °C, se tritura, se clasifica y se envasa. Normalmente, no son higroscópicos, son de fácil reciclado para su posterior utilización sin variar sus propiedades. Presentan dificultad a la adición de desoxidantes y elementos para compensar las pérdidas por altas temperaturas generadas en el proceso.
2. Fundentes aglomerados. Para su fabricación se utiliza un sistema parecido al anterior. Se aglomeran y se llevan a una temperatura alta, pero sin fundir. Después se trituran, se criban y se envasan. Este tipo de fundente aporta elementos que compensan las pérdidas por las altas temperaturas. Son más higroscópicos que los fundentes fundidos, por lo que hay que cuidar el lugar de almacenamiento.
3. Fundentes mezclados. Se pueden mezclar dos o más tipos de fundentes, fundidos o aglomerados, consiguiendo mezclas intermedias para usos concretos. En los envases se especifica el tipo de mezcla, así como los usos para los que se destinan.

2.9.6 Elementos del equipo de soldadura SAW

El equipo necesario para el proceso de soldadura por arco sumergido se compone básicamente de:

1. Fuente de alimentación.
2. Panel de control.
3. Cabezal.
3. Unidad tractora.
4. Accesorios

2.9.6.1 Fuente de alimentación

Suelen ser máquinas muy parecidas a las de soldadura MIG, MAG y FCAW. Deben suministrar altas intensidades y un factor de eficiencia del 100 % siempre que sea posible, ya que estas máquinas son utilizadas generalmente en trabajos continuos. El tipo de corriente utilizado suele ser corriente continua, con características de tensión constante. Se emplean conjuntamente con alimentadores de electrodo de velocidad constante que controla la intensidad de soldeo y la fuente controla la tensión de soldeo.

La corriente alterna no se suele utilizar en procesos de soldeo por arco sumergido, solo se hace cuando se solda con altas intensidades, electrodos múltiples y para evitar problemas de desviación del arco o sopleo magnético. Las fuentes de alimentación recomendadas para este proceso son las de corriente continua con tensión constante [46].

2.9.6.2 Panel de control

Los paneles de control pueden ser analógicos o digitales. Mediante el panel de control se pueden regular:

1. Velocidad de alimentación del electrodo
2. Voltaje
3. Corriente
4. Tipo de corriente
5. Velocidad de avance de soldadura

2.9.6.3 Cabezal

El cabezal que forma parte del equipo de soldadura SAW se compone de los siguientes elementos:

1. Alimentador del electrodo. Con motor regulador de la velocidad de alimentación, rodillos de arrastre, enderezador y guía. La alimentación del electrodo puede ser mediante dos o cuatro rodillos. La mayoría son de velocidad constante.

2. Antorcha con tubo de contacto. Su función es guiar el electrodo y hacer llegar la corriente de soldadura por medio del tubo de contacto. Hay muchos modelos según el tipo de trabajo a realizar.
3. Tolva. Es el elemento donde se almacena el fundente y, desde ella, se suministra mediante una manguera por un lado del electrodo.
4. Aspiración del fundente. Normalmente se utiliza el sistema de aspirado para la recuperación del fundente no utilizado y su reutilización.

2.9.7 Parámetros en el proceso SAW

Para lograr soldaduras sin defectos y en las mejores condiciones, es conveniente elegir la preparación de la pieza a soldar según su espesor y teniendo en cuenta los parámetros siguientes:

1. Corriente y polaridad.
2. Voltaje.
3. Tipo de fundente.
4. Velocidad de avance.
5. Diámetro y tipo de electrodo.
6. Tipo de fundente.

2.9.7.1 Corriente y polaridad

Se puede utilizar corriente continua y corriente alterna, aunque generalmente se utiliza continua. Se obtiene mayor penetración con corriente continua y polaridad inversa (electrodo al polo positivo), así como disminución de porosidad y buen aspecto del cordón.

Si se requiere menor penetración, como en soldaduras de recarga o relleno, se utiliza polaridad directa (electrodo al polo negativo). Se consume menos fundente con esta polaridad.

El amperaje es el parámetro que tiene mayor influencia en el proceso automático de soldadura con arco sumergido, porque alimenta la velocidad del alambre a la medida de su fusión y permite

regular la penetración del depósito según la intensidad aplicada. El uso excesivo de amperaje provoca mucha penetración, demasiado refuerzo, y, en consecuencia, una deformación de la pieza soldada. El uso de bajo amperaje produce falta de penetración y una fusión incompleta [47].

2.9.7.2 Voltaje

El objetivo principal del voltaje en soldadura con arco sumergido es la variación de la longitud del arco entre el alambre electrodo y el metal de soldadura en fusión, determinando así la forma del cordón, su sección transversal y su apariencia.

Al aumentar el voltaje aplicado, y, por lo tanto, la intensidad de corriente, se obtiene una mayor longitud de arco. En síntesis, se puede decir que, mediante la aplicación del voltaje adecuado, con un constante amperaje y correcta velocidad de avance de soldadura se conseguirá un cordón liso, extendido y sin socavado, además de un consumo normal de fundente y se va a ver reducida la porosidad en el cordón [47].

2.9.7.3 Velocidad de avance

Cuando hay variación en la aplicación de la soldadura, por ejemplo, de una pasada, de doble pasada, etc., hay también variación en los parámetros operacionales. Amperaje y voltaje están relacionados con la velocidad de avance de soldadura y, por supuesto, con el diámetro del alambre.

La velocidad del avance es el ajuste del ancho del cordón y el límite de penetración. Esto está relacionado con la intensidad y tensión de soldadura (amperaje-voltaje) y tipo de fundente [47].

2.9.7.4 Diámetro y tipo de electrodo

La selección del tamaño correcto del electrodo para una soldadura lo determina el espesor del metal a soldar y su tamaño. El uso de electrodos de diámetro pequeño requiere menos destreza que los de diámetro grande. La velocidad de deposición, o la velocidad a la que se agrega metal a la soldadura, es menor cuando se utilizan electrodos de diámetro pequeño. Estos realizarán soldaduras aceptables en placas gruesas, pero se necesitará más tiempo para hacer la soldadura.

Los electrodos de diámetro grande pueden sobrecalentar el metal, si se utilizan con piezas de metal delgadas o pequeñas. El sobrecalentamiento extremo puede provocar que el metal se derrita, lo cual es difícil de reparar. Para corregir un problema de sobrecalentamiento, se puede bajar el amperaje, utilizar un arco más corto, aumentar la velocidad de avance, utilizar una placa disipadora (pieza grande de metal que se utiliza para absorber el exceso de calor), o utilizar un electrodo más pequeño con una asignación de corriente más baja [47].

2.9.7.5 Tipo de fundente

El fundente sirve primordialmente para disolver las capas de óxidos que se van formando continuamente durante el calentamiento de una pieza y, en términos generales, para proteger el área por soldar contra todas las influencias dañinas procedentes del medio ambiente. El fundente debe ser acorde al tipo de metal de aporte, y tener la propiedad de fundirse aproximadamente a 100°C por debajo de la temperatura de trabajo del metal de aporte, y fluir por capilaridad. Este efecto se produce cuando el fundente fluye hacia donde se dirige el arco eléctrico. De esta manera se logra que el área de la junta se “moje” perfectamente, reduciendo la tensión superficial del metal de aporte.

La siguiente tabla muestra el amperaje y velocidad de alimentación que se recomienda al soldar aceros al carbono con electrodos de diámetros comunes [47].

Tabla 2.2 Amperajes recomendados para aceros al carbono

Velocidad de alimentación m/min	Amperaje por diámetro del electrodo			
	0.8 mm	0.9 mm	1.2 mm	1.6 mm
2.5	40 A	65 A	120 A	190 A
5.0	80 A	120 A	200 A	330 A
7.6	130 A	170 A	260 A	425 A
10.2	160 A	210 A	320 A	490 A
12.7	180 A	245 A	365 A	-
15.2	200 A	265 A	400 A	-
17.8	215 A	280 A	430 A	-

2.10 Teoría de los campos electromagnéticos

Cuando una corriente circula a través de un material de tipo conductor se genera un campo magnético alrededor del mismo. La figura 2.12 ilustra las líneas de campo magnético que se generan alrededor del cable conductor. El valor del campo magnético creado depende de la intensidad de la corriente eléctrica, de la distancia que hay a partir del material y así como de la forma que tenga el conductor por donde pasa la corriente eléctrica.

Cuando se tiene un hilo conductor en forma de espira, la forma del campo magnético será circular. Por lo que su dirección y el sentido dependerán del sentido de la corriente eléctrica.

De la misma manera cuando se utiliza un hilo conductor enrollado en forma de hélice, se tiene un arreglo de tipo bobina o también llamado solenoide [48].

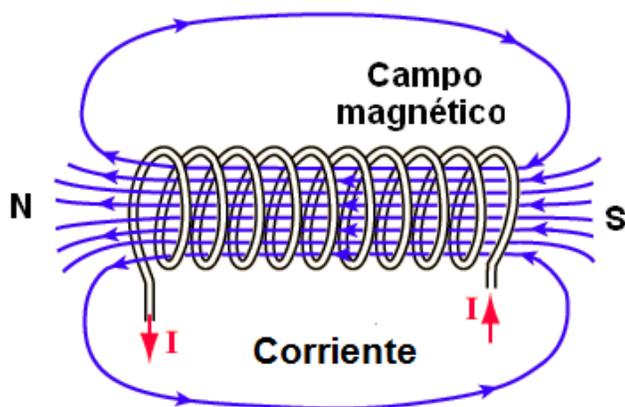


Figura 2.12 Espira por la cual circula una corriente, genera un campo magnético a su alrededor

Por lo tanto, los campos magnéticos son generados por cargas en movimiento y ejercen una fuerza sobre las cargas eléctricas que se encuentran en movimiento. A lo cual se le llama Ley de Lorentz, esta ley establece que una partícula cargada q , que circula a una velocidad v , por un punto en el que existe una intensidad de campo magnético B , sufrirá la acción de una fuerza F denominada Fuerza de Lorentz cuyo valor es proporcional al valor de q , B y v se obtienen por medio de la siguiente expresión: $\vec{F} = q \cdot (\vec{v} \times \vec{B})$

De la ecuación anterior se puede concluir que:

1.- La fuerza es perpendicular a la velocidad v de la carga y al campo magnético B .

2.- La magnitud de la fuerza es $F = qvB \text{ sen } \theta$, donde θ es el ángulo $<180^\circ$ entre la velocidad y el campo magnético. Esto implica que la fuerza magnética sobre una carga estacionaria o una carga moviéndose paralela al campo magnético es cero [49].

En consecuencia, las líneas de campo magnético producidas por una corriente en un alambre recto se disponen en la forma de círculos con el alambre en su centro, como lo muestra la figura 2.13. Existe una forma simple de conocer la dirección de las líneas de campo magnético en este caso, se llama “regla de la mano derecha”. Se sujeta el alambre con la mano derecha de modo que el pulgar apunte en la dirección de la corriente convencional (positiva); entonces los dedos encerrarán en un círculo al alambre en la dirección del campo magnético.

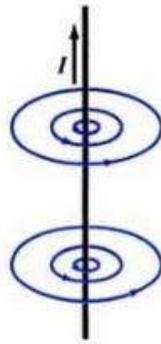


Figura 2.13 Líneas de campo magnético alrededor de un alambre recto

En cambio, las líneas de campo magnético debidas a un lazo circular de alambre portador de corriente se determinan de forma similar. El resultado se muestra en la figura 2.14. A diferencia del campo uniforme mostrado en un alambre recto, los campos magnéticos en este caso no son uniformes, ya que son diferentes en magnitud y dirección en diferentes puntos [50].

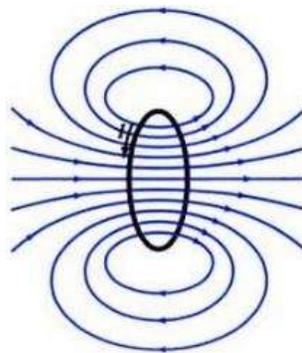


Figura 2.14 Líneas de campo magnético en un alambre circular

2.11 Soldadura con interacción electromagnética

Se ha demostrado que la soldadura con interacción electromagnética de baja intensidad en aceros inoxidables austeníticos, aceros dúplex, aceros doble fase, etc. Ha ayudado a minimizar la susceptibilidad a la corrosión, también se ha observado un refinamiento de grano, así como una reducción del tamaño de la ZAT [51].

Se mejoró la resistencia a la corrosión en la soldadura de dos placas de acero inoxidable dúplex AISI 2205 unidas por Gas Metal Arc Welding (GMAW), bajo el efecto de la interacción electromagnética de baja intensidad, simulando el ambiente corrosivo con métodos electroquímicos sensibles [52].

Las soldaduras se realizaron usando dos mezclas de gas protector: 98% argón + 2% O_2 (Mezcla 1) y 97% Argón + 3% N_2 (Mezcla 2). Las placas se soldaron con interacción electromagnética utilizando la mezcla de gas 1, con parámetros de soldadura constantes.

La mejora en la resistencia a la corrosión se debe a la evolución microestructural modificada en la zona afectada térmicamente a alta temperatura y en la zona de fusión inducida por la aplicación de interacción electromagnética de baja intensidad durante la soldadura.

Cabe también mencionar que las uniones soldadas utilizando la mezcla de gas 2 sin la interacción electromagnética, también presentaron alta resistencia a la corrosión general, pero las juntas tienen una alta susceptibilidad a sufrir corrosión localizada.

En el mismo contexto, en un acero inoxidable austenítico AISI 304 también se estudió la resistencia a la corrosión en la zona afectada térmicamente [53].

Se utilizaron muestras de la zona afectada térmicamente, a 8 milímetros de distancia del centro de soldadura, las cuales fueron sometidas a ensayos electroquímicos potencia cinética de reacción de doble ciclo para evaluar el grado de sensibilización.

Se encontró que la interacción electromagnética durante la soldadura produjo un grado de sensibilización más bajo y una mejor resistencia a la corrosión por picadura en solución de NaCl al 3.5% que las muestras que se soldaron y se analizaron sin los campos electromagnéticos.

La precipitación de carburos de cromo y el crecimiento de carburos preexistentes dentro de los granos y a lo largo de los límites de grano promovidos de la deformación en frío disminuyó en función de la intensidad del campo magnético aplicado durante el proceso de soldadura.

La precipitación de carburos de cromo y el crecimiento de carburos preexistentes dentro de los granos y a lo largo de los límites de grano promovidos de la deformación en frío disminuyó en función de la intensidad del campo magnético aplicado durante el proceso de soldadura.

Estos investigadores explican que la interacción entre el campo magnético externo (generado por la bobina) y el campo magnético inducido por la corriente de la soldadura permitió la redistribución de Cr (el acero contiene cromo ya que es inoxidable) en el metal base austenítico durante el ciclo térmico de soldadura reduciendo el agotamiento del cromo, y en consecuencia lograr una película pasiva resistente a la corrosión.

CAPÍTULO 3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

En el desarrollo experimental de esta investigación se llevaron a cabo 6 soldaduras, 3 de ellas se soldaron con múltiples pasadas, debido al espesor de placa (13.3 mm), donde a su vez hay distintas magnitudes de intensidad electromagnética.

Y las otras 3 fueron soldadas con una sola pasada, con un espesor de placa de (12.7 mm), donde a su vez también hay distintas magnitudes de intensidad electromagnética.

El diagrama de bloques en la figura 3.1, muestra la secuencia experimental que se llevó a cabo.

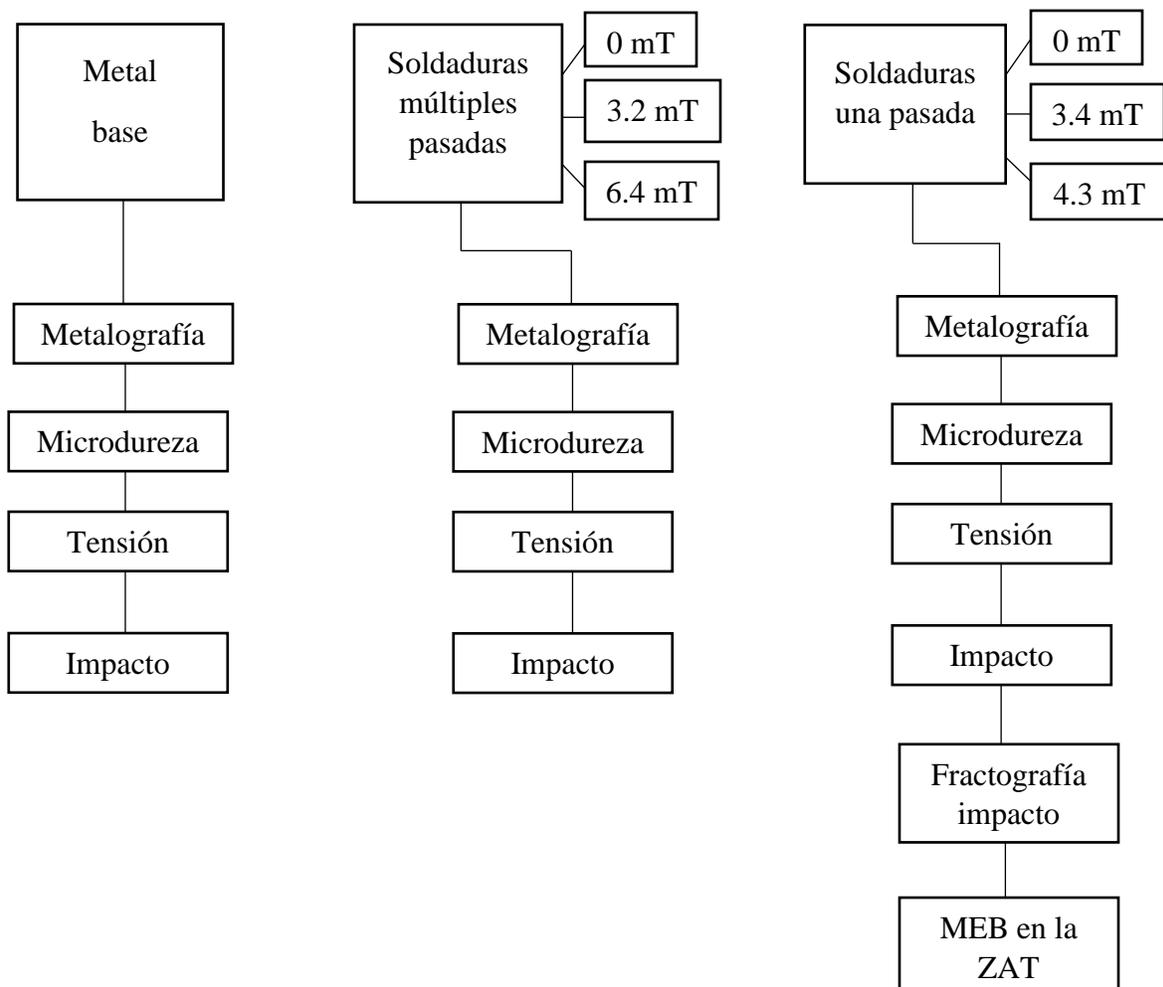


Figura 3.1 Secuencia del proceso de experimentación

3.1 Soldadura

3.1.1 Materiales y equipo utilizado

El metal base utilizado para llevar a cabo las soldaduras fue un acero al carbono, conocido comercialmente como AISI 1045, que contiene 0.45% de carbono. La tabla 3.1 muestra su composición química.

Tabla 3.1 Composición química del acero AISI 1045

	%C	%Si	%Mn	%P	%S
AISI 1045	0.45	0.25	0.8	0.040 máx.	0.050 máx.
ER 70-S	0.06-0.15	0.8-1.15	1.4-1.85	0.010 máx.	0.011 máx.

Como metal de aporte fue empleado un electrodo ER70-S, de 1.6 mm de diámetro. Y la tabla 3.1 muestra su composición química.

El equipo de soldadura fue una máquina de soldar marca Miller, modelo Dimension 652, a su vez, la máquina de soldar utilizó un alimentador de micro alambre de la marca Miller “Serie 70”. como la de la figura 3.2.



Figura 3.2 Máquina de soldar Miller “Dimension 652”.

Las características operativas de la máquina de soldar se muestran en la tabla 3.2.

Tabla 3.2 Características de operación de la máquina de soldar Miller “Dimension 652”

Amperaje/Voltaje	Salida nominal	Amperaje de entrada en salida nominal, 50-60 Hz									Tensión máxima en circuito abierto
		230 V	380 V	400 V	440 V	460 V	520 V	575 V	KVA	KW	
50-815 A, en modo CC	650 A en 44 VDC, ciclo de trabajo 100%	126 A	77 A	73 A	66 A	63 A	54 A	50.4 A	50 A	35 A	72 VDC
10-65 V, en modo CV											67 VDC

Las especificaciones de operación del alimentador de micro alambre se muestran en la tabla 3.3.

Tabla 3.3 Características de operación del alimentador de microalambre Miller “Serie 70”.

Potencia de entrada	Velocidad de alimentación	Capacidad de diámetro del alambre
24 VAC, 10 A, 50/60 Hz	50-70 ipm (1.3-19.8 m/min.)	0.023-5/64 in. (0.6-2.0 mm.)

El fundente utilizado en este proceso de soldadura fue uno del tipo Lincoln 960, con la composición química que se muestra en la tabla 3.4.

Tabla 3.4 Composición química del fundente L960

% SiO ₂	%MnO	%MgO	%CaF ₂	%Na ₂ O	%Al ₂ O ₃	%CaO	%TiO ₂
9	16	2	11	2	45	1	9

3.1.2 Corte y preparación de las placas para la unión

3.1.2.1 Placas para múltiples pasadas

Para poder tener las placas a la geometría y forma deseada, se llevaron a cabo una serie de cortes y maquinados con ayuda de máquinas herramientas.

El acero se recibió en forma de placa con un espesor de 13.3 milímetros, por lo que primero se hicieron varios cortes transversal y longitudinalmente con la ayuda de una sierra cinta. Ya que se habían cortado en forma rectangular, se procedió a maquinarse las caras laterales con ayuda de una fresadora vertical, esto con la intención de que los lados de la pieza quedaran de forma recta.

Posteriormente con la fresadora se realizó la operación final, que consistió en hacer un maquinado a 30° en el lado más largo de la pieza, así como también se dejó un talón de 2 milímetros de largo.

Las placas para unión quedaron con las dimensiones que se muestran a continuación, además en la figura 3.3 se muestran las dimensiones de cada pieza.

Largo: 15 cm.

Ancho: 7.5 cm.

Espesor: 13.3 m.

Bisel: 30°

Talón: 2 m.

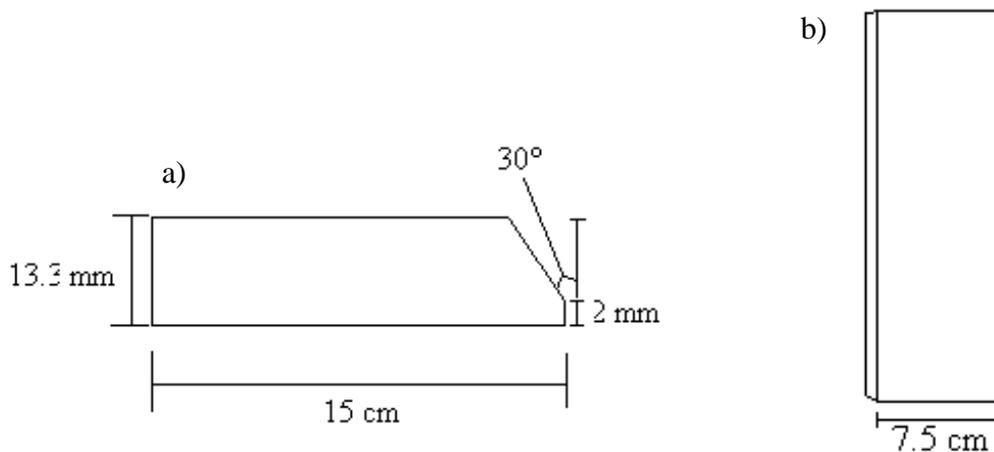


Figura 3.3 Dimensiones de las placas para soldar. a) Vista transversal. b) Vista superior

Después de que se terminaron de maquinarse las placas, se hizo la preparación de unión en forma de “V simple”. Se puntearon con soldadura SMAW a una delgada lámina de solera como respaldo.

La figura 3.4 muestra la geometría de la preparación. Para esta soldadura en múltiples pasadas se realizaron 3 preparaciones de unión.

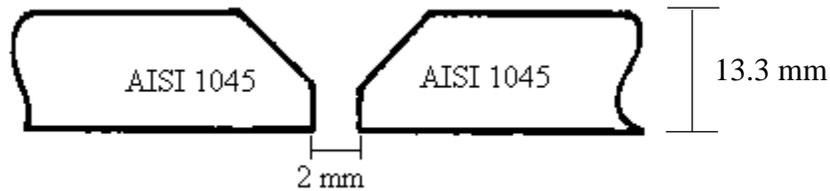


Figura 3.4 Preparación de unión en “V Simple”.

3.1.2.2 Placas para 1 pasada

Para realizar las placas para soldarse con 1 sola pasada, se cortaron de la misma manera que se explicó anteriormente, se cortaron y se maquinaron con ayuda de una sierra cinta y una fresadora, respectivamente. El tipo de bisel, el talón, las dimensiones a lo largo y a lo ancho son prácticamente las mismas, solamente en este caso con la fresadora se rebajó el espesor de las placas hasta 12.7 mm (1/2 pulgada). Quedando así con las siguientes dimensiones:

Largo: 15 cm.

Ancho: 7.5 cm.

Espesor: 12.7 m.

Bisel: 30°

Talón: 2 mm.

La figura 3.5 muestra las dimensiones de este tipo de placas para su posterior preparación de unión.

El tipo de preparación de unión también fue el mismo, en “V simple”, con una separación de 2 milímetros. Para este caso de soldadura de 1 pasada, igualmente se realizaron 3 preparaciones de unión.

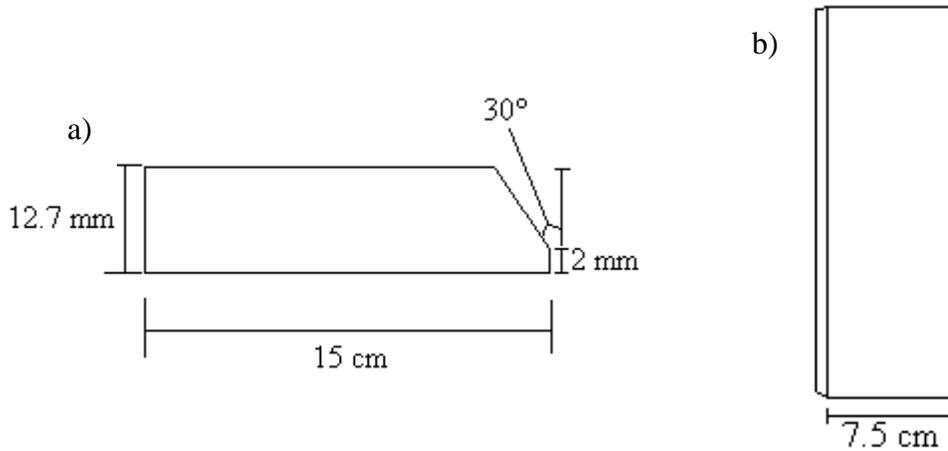


Figura 3.5 Dimensiones de las placas para soldar. a) Vista transversal. b) Vista superior

El tipo de preparación de unión también fue el mismo, en “V simple”, con una separación de 2 milímetros. Para este caso de soldadura de 1 pasada, igualmente se realizaron 3 preparaciones de unión.

3.1.3 Soldadura de múltiples pasadas

Los parámetros operativos al soldar estas placas se muestran en la tabla 3.5.

Tabla 3.5 Parámetros operativos de soldadura

Parámetros operativos	
Velocidad de alimentación	7 m/min
Velocidad de avance	3.5 mm/s
Voltaje	28-28.5 V
Amperaje	295-305 A
Electrodo ER-70S	Ø 1.6 mm

Los parámetros mostrados en la tabla anterior se monitorearon durante todo el proceso de soldadura, es decir, desde que se iniciaba el arco eléctrico, hasta que terminaba.

3.1.3.1 Soldadura multipasadas sin interacción electromagnética

La soldadura sin interacción electromagnética, se realizó a una de las preparaciones de unión. Debido al espesor de las placas, se realizaron 3 pasadas para poder cubrir el canal de la preparación de unión, como se muestra en la figura 3.6.

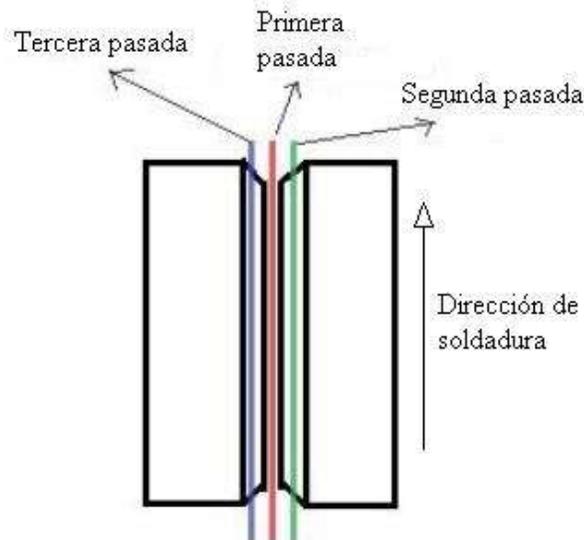


Figura 3.6 Esquema de la forma en que se realizaron las 3 pasadas de soldadura

Como se puede observar en la figura, el primer cordón se depositó al centro, después el segundo y tercer cordón, se depositó a la izquierda y después a la derecha, respectivamente.

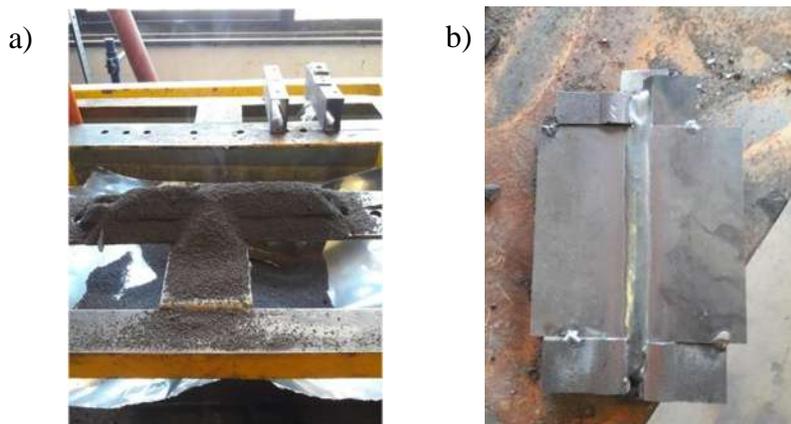


Figura 3.7 Imágenes después de haber depositado los cordones de soldadura. a) El fundente forma una capa de escoria protectora. b) Apariencia del cordón después de retirar la escoria.

Después de cada pasada, fue necesario retirar la escoria producida por el fundente, también cabe mencionar que este tipo de soldadura por arco sumergido produce una buena apariencia estética del cordón.

3.1.3.2. Soldadura multipasadas con interacción electromagnética

La soldadura con interacción electromagnética se realizó en las otras dos preparaciones de unión, con los parámetros operativos de la tabla 3.6 mostrada anteriormente.

El campo magnético se generó con un arreglo de bobinas, localizadas en ambos lados de la preparación de unión, en un lado la bobina consistía de 2 espiras, y en el otro consistía de 3 espiras, esto para que las 2 espiras sirvieran como un excitador del campo magnético”, y las 3 espiras sirvieran como un tipo de “barrera”. La separación entre las espiras y cada extremo de la placa fue de 5 centímetros, como se muestra en el esquema de la figura 3.8.

Ya que se instalaron y se ubicaron las bobinas que generarían los campos electromagnéticos, con la ayuda de un Gaussímetro, se generó la intensidad de campo magnético deseada.

Una unión se soldó con una intensidad de campo electromagnético de 3.2 mT, y la otra unión se soldó con una intensidad de 6.4 mT.

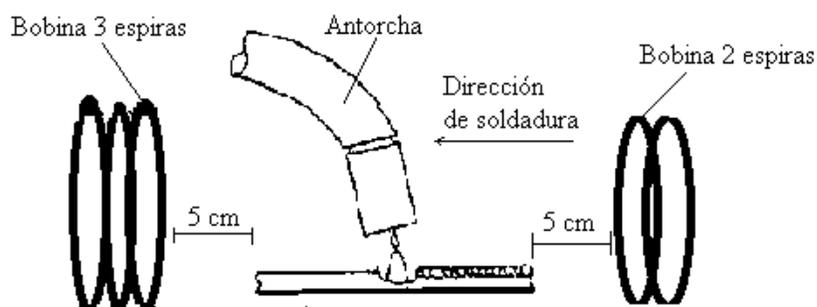


Figura 3.8 Esquema del arreglo de las bobinas para generar la interacción electromagnética.

La interacción electromagnética se aplicó desde el inicio del arco eléctrico, y se desactivaba hasta 1 minuto después de que se terminaba de depositar el cordón. Esto para que durante y después del

fenómeno de soldadura hubiera la mayor interacción posible. La figura 3.9 muestra cómo se montó el arreglo para la interacción electromagnética y la soldadura.



Figura 3.9 Fotografía del arreglo de las bobinas con las placas para unión.

Una de las uniones que se soldó con interacción electromagnética fue con 3 pasadas, y la otra unión fue con solo 2 pasadas, ya que en este último caso con las 2 pasadas se llenó de material de aporte la preparación de unión en “V”.

3.1.4 Soldadura de 1 pasada.

Los parámetros operativos de soldadura, en las uniones que se hicieron con 1 sola pasada se muestran en la tabla 3.6

Tabla 3.6 Parámetros operativos de soldadura de 1 pasada.

Parámetros operativos	
Velocidad de alimentación	5 m/min
Velocidad de avance	3.5 mm/s
Voltaje	29-30.5 V
Amperaje	300-310 A
Electrodo ER-70S	Ø 1.6 mm

3.1.4.1 Soldadura de 1 pasada sin interacción electromagnética.

Una de las placas con preparación de unión, se soldó sin interacción electromagnética, es decir, sin bobinas que generaban campo magnético.

En este caso se soldó con 1 pasada, ya que el espesor de la placa es menor que el de las placas que se soldaron con múltiples pasadas.

3.1.4.2 Soldadura de 1 pasada con interacción electromagnética.

Dos soldaduras se llevaron a cabo utilizando interacción electromagnética, la instalación y arreglo de las bobinas que generan el campo magnético, fue igual que en las soldaduras de múltiples pasadas.

En este caso la interacción electromagnética en una soldadura fue de 3.4 mT y en la otra fue una intensidad de 4.3 mT.

3.2 Preparación de probetas metalográficas.

El proceso para la preparación de las probetas que serían analizadas metalográficamente, fue el mismo para todas las condiciones de soldadura que se realizaron, es decir, las de múltiples pasadas sin, y con interacción electromagnética, así como de las soldaduras con una sola pasada también con, y sin interacción electromagnética.

Para preparar estas probetas se realizó un corte transversal a las placas soldadas con la sierra cinta, se siguió cortando hasta tener un tamaño adecuado de manera que la muestra pueda ser manipulada con facilidad para ser pulida y posteriormente ser atacada químicamente, pueda ser observada en el microscopio óptico y finalmente realizarle las pruebas de micro dureza.

3.2.1 Desbaste grueso

Este tipo de desbaste permite quitar las imperfecciones superficiales, e incluso si hay óxido presente en la superficie del material. También elimina las rayas. Esto se logra ejerciendo una

presión uniforme (lijando) en forma lineal sobre lijas de carburo de silicio con una granulometría desde 80 hasta 320.

En cada cambio de lija se giraba 90° el sentido de desbaste para eliminar de una mejor manera las rayas.

3.2.2 Desbaste fino

El objetivo de este tipo de desbaste, es remover la zona deformada debido a las lijas anteriores de grano grande, para ello se utilizaron lijas de carburo de silicio, con una granulometría de 400 hasta 2000.

3.2.3 Pulido

El pulido de las piezas tiene el objetivo de dejar la cara de la pieza en acabado espejo, el pulido se hace con paño de algodón y pasta de diamante de 6 y 3 micras, consecutivamente. También se usa lubricante que tiene la tarea de ir removiendo las impurezas que se van desprendiendo del material durante la operación.

La velocidad de giro del disco que contiene el paño varía entre 150-250 rpm. Hasta que macroscópicamente no se vea ninguna raya y muestre un reflejo como espejo.

3.2.4 Ataque químico

El ataque químico tiene como objetivo revelar las fases presentes en la microestructura del material, así como sus límites de grano. Las muestras se atacaron con la solución llamada Nital al 2%, y también se atacaron químicamente con una solución llamada Picral al 4%.

El nital se compone de una mezcla de ácido nítrico con alcohol, este ataque químico tiene como finalidad revelar las fases presentes en el material. El ataque fue por inmersión durante 5 segundos, el ataque se detuvo utilizando agua destilada y después se le dio un secado con aire caliente para remover rastros de humedad.

El picral está conformado por una mezcla de ácido pícrico con alcohol, este ataque tiene la finalidad de revelar preferentemente los límites de grano del material, el ataque se realizó por inmersión durante 5 segundos, el ataque se detuvo rociando agua destilada y alcohol, seguido de un secado con aire caliente para remover residuos de humedad en la muestra.

3.3 Probetas para ensayo de tensión

Los ensayos de tensión con estas probetas fueron realizados en una máquina para ensayos universales “INSTRON 1195”. El ensayo se realizó axialmente la probeta hasta que el material llega a la fractura. En todas se utilizó una velocidad de 6 mm/min.

3.3.1 Probetas para ensayo de tensión de metal base

Para preparar las probetas de tensión, se utilizó la sierra cinta para cortar a lo largo y a lo ancho el material, después con la máquina fresadora se maquinó hasta el espesor deseado, finalmente la zona calibrada se formó con la ayuda de un cortador vertical de forma plana, el cual se instaló en la fresadora y se hicieron los cortes necesarios.

Las probetas fueron de forma rectangular y plana. Se fabricaron 3 probetas de tensión del metal base.

La figura 3.10 muestra las dimensiones de las probetas de tensión, de acuerdo a la norma ASTM E8.

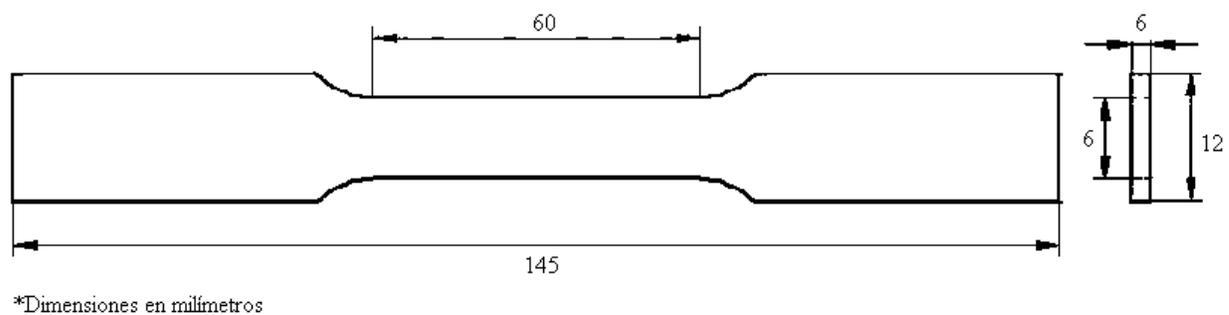


Figura 3.10 Dimensiones de la probeta de tensión del metal base.

3.3.2 Probetas para ensayo de tensión de la soldadura con multipasadas

La fabricación de estas probetas se realizó con la máquina sierra cinta, y con la fresadora para darle la forma y dimensiones deseadas.

En este caso, con un cortador vertical instalado en la fresadora, se les realizaron dos muescas de un milímetro de profundidad a cada una a las probetas, en la zona afectada térmicamente, como se muestra en la figura 3.11. Cada muesca fue hecha con un ángulo de 45°.

Esto para concentrar los esfuerzos en la muesca, y que la fractura se propague a través de la ZAT. Ya que, si la probeta se sometía a tensión sin la muesca antes mencionada, la fractura podría tener lugar en el metal base, lo cual no serviría, ya que el objeto de estudio de este proyecto es en la ZAT.

La fractura en la zona afectada térmicamente nos da la información para saber qué es lo que está pasando ahí de acuerdo a las morfologías y tipos de microestructura que se forman.

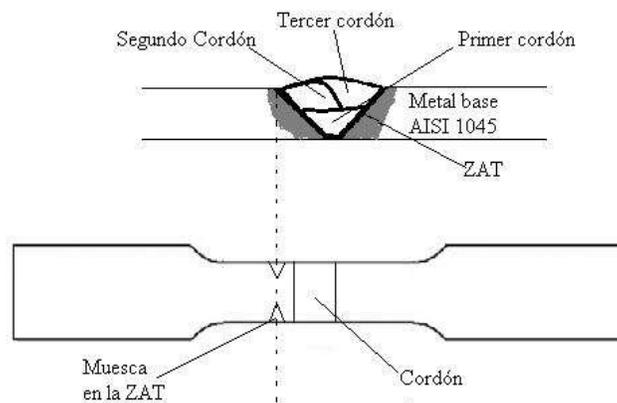
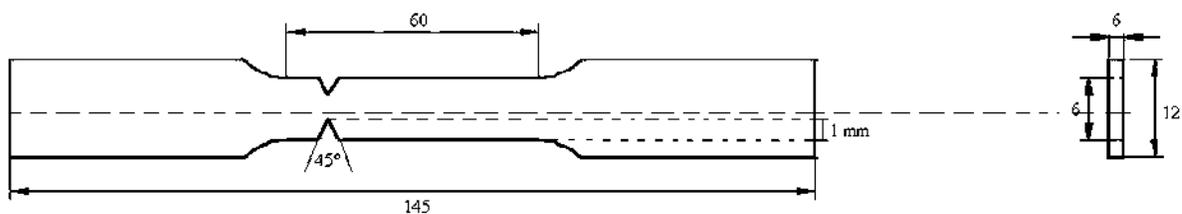


Figura 3.11 La muesca hecha en la probeta de tensión, coincide con la ZAT generada en la soldadura.

Las dimensiones finales y la geometría de las probetas de tensión se muestran en la figura 3.12.



*Dimensiones en milímetros

Figura 3.12 Dimensiones de las probetas para tensión, de las soldaduras de múltiples pasadas

Se fabricaron 3 probetas para ensayo de tensión por cada condición de soldadura con múltiples pasadas, es decir, se maquinaron 3 probetas para la soldadura sin interacción electromagnética, 3 probetas para la soldadura con una interacción electromagnética de 3.2 mT, y finalmente 3 probetas para la soldadura con una interacción electromagnética de 6.4 mT.

Sumando un total de 9 probetas de tensión con soldadura de múltiples pasadas.

La figura 3.13 muestra una macrografía de una probeta de tensión soldada con varias pasadas.

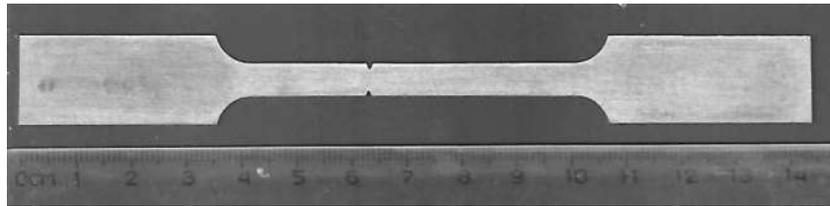


Figura 3.13 Macrografía de una probeta de tensión con soldadura de varias pasadas.

3.3.3 Probetas para ensayo de tensión de la soldadura con una sola pasada

Las probetas para el ensayo de tensión de las soldaduras de una sola pasada, se maquinaron de la misma manera que se mencionó en la parte anterior, se cortaron en forma transversal con sierra cinta y se maquinaron con una fresadora para lograr las dimensiones tanto en lo largo y el ancho, como en el espesor.

También se le realizaron dos muescas con ayuda de un cortador vertical que se instaló en la fresadora.

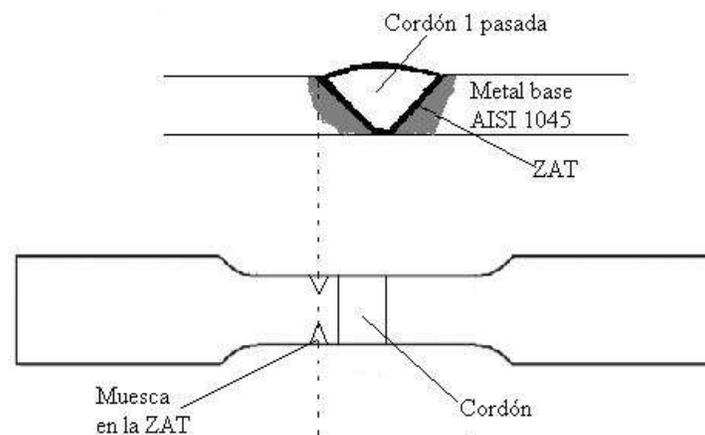


Figura 3.14 La muesca generada en la probeta de tensión coincide con la ZAT de la soldadura.

La finalidad de las muescas de 1 milímetro cada una, en la zona afectada térmicamente, es inducir la fractura en esa zona, para su posterior análisis con las demás condiciones.

La figura 3.14 muestra la forma en que las muescas maquinadas coinciden con la ZAT de la soldadura.

Las dimensiones de las probetas en este caso son las mismas que las de la figura 3.12.

Se fabricaron 3 probetas para ensayo de tensión para cada condición que se tiene en estas uniones que fueron soldadas con una sola pasada, es decir, se fabricaron 3 probetas de soldaduras sin interacción electromagnética, 3 probetas con una intensidad electromagnética de 3.4 mT, y 3 probetas que se soldaron con una interacción electromagnética de 4.3 mT.

La figura 3.15 muestra una macrografía de las 3 probetas para ensayo de tensión que fueron soldadas sin interacción electromagnética.

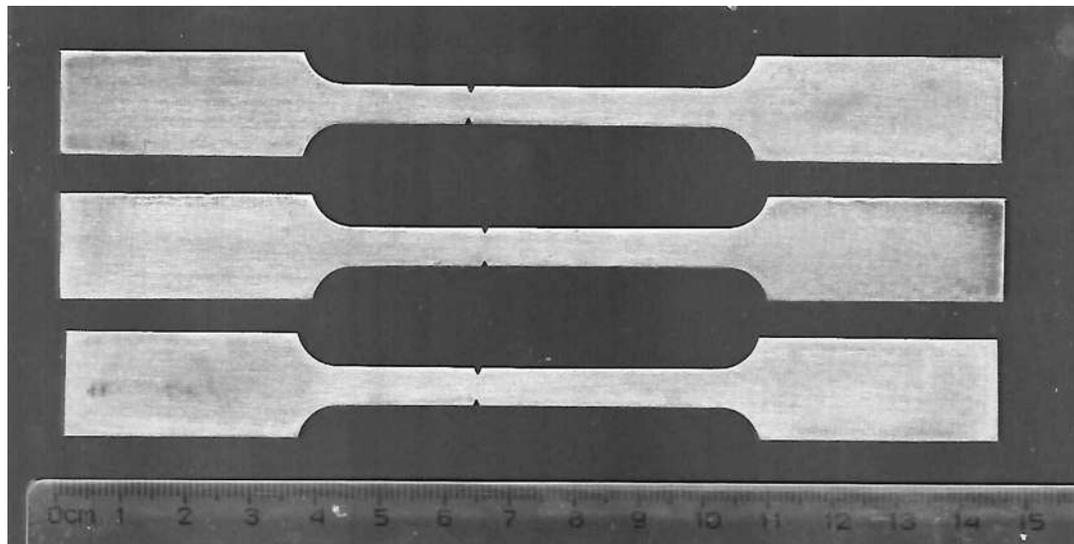


Figura 3.15 Macrografía de las 3 probetas para ensayo de tensión que fueron soldadas sin interacción electromagnética.

3.4 Probetas para prueba de impacto Charpy

Los ensayos de impacto Charpy se llevaron a cabo por medio de un medidor de impacto de tipo péndulo, marca Tinius Olsen, modelo 84.

El péndulo que conforma este equipo impacta las probetas con una velocidad de 5.46 m/s. Partiéndolas a través de la muesca que cada probeta tiene en el centro.

El medidor nos indica análogamente cuánta energía absorbió ese material, lo que nos permite conocer la tenacidad de ese material.

La figura 3.16 muestra la forma en que el medidor nos indica el valor de energía absorbida con una aguja en una escala graduada. En la figura 3.16 el material absorbió una energía equivalente a 16 Joules.



Figura 3.16 Aguja del medidor de pruebas de impacto Charpy

3.4.1 Probetas para prueba de impacto Charpy del metal base

Las probetas fueron fabricadas con ayuda de la máquina sierra cinta para cortarlas a la longitud y ancho deseado, y después con la fresadora se maquinaron hasta obtener un espesor y ancho de 10 milímetros, por último, en el centro se les realizó una muesca de 2 milímetros de profundidad con un cortador vertical a 45°.

La figura 3.17 muestra una fotografía de una probeta de impacto Charpy.

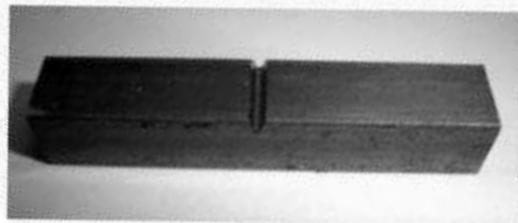


Figura 3.17 Probeta de impacto Charpy de metal base

La figura 3.18 muestra las dimensiones y geometría de cada una de ellas, de acuerdo a la norma ASTM E23.

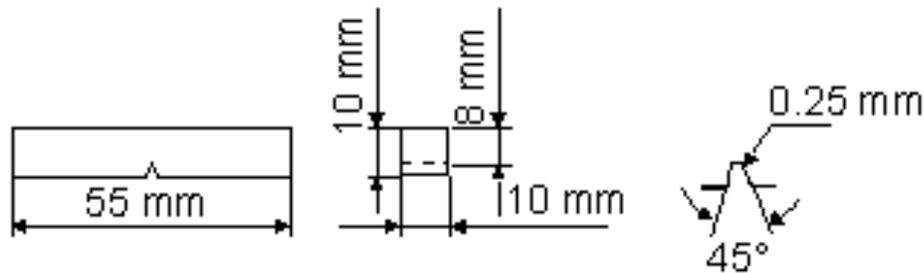


Figura 3.18 Dimensiones de la probeta de impacto Charpy

3.4.2 Probetas para prueba de impacto Charpy de soldaduras de una y múltiples pasadas

Para el caso de las probetas para realizarles la prueba de impacto Charpy, en las soldaduras que fueron realizadas con una y varias pasadas, se llevó a cabo el mismo procedimiento para su fabricación, como lo es el corte y el maquinado con ayuda de las máquinas herramientas, también todas las probetas fueron hechas a la misma medida, como lo indica la figura 3.18.

La variante en este caso, es que la muesca que la probeta lleva en el centro, fue maquinada de tal forma que coincidiera con la zona afectada térmicamente que se forma a un costado del cordón de soldadura depositado.

La figura 3.19 esquematiza la manera en que coincide la muesca de la probeta con la ZAT de la soldadura.

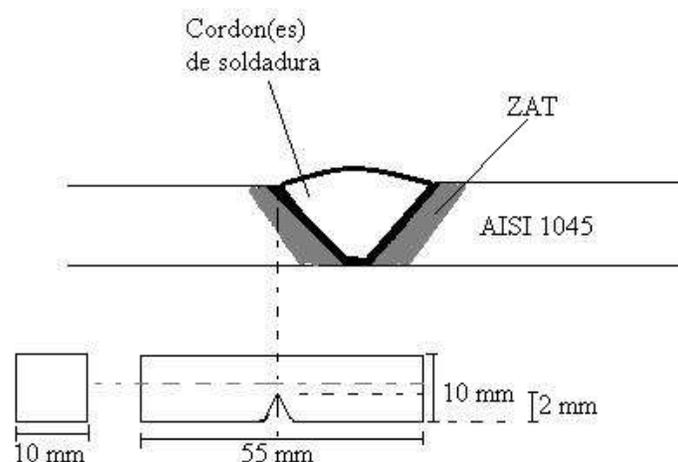


Figura 3.19 Esquema que indica las dimensiones y forma de la probeta Charpy.

La finalidad de que la muesca de la probeta de impacto coincida con la zona afectada térmicamente, es para que cuando la pieza se fracture al momento de que cae el péndulo del medidor, se pueda saber el valor de energía que es capaz de absorber la pieza en esa zona.

Se fabricaron 9 probetas para las soldaduras que se realizaron con varias pasadas, lo que incluía las que fueron con y sin interacción electromagnética.

También se fabricaron 9 probetas de las soldaduras que fueron de una sola pasada, incluyendo las que tenían interacción electromagnética, y las que no.

Dando un total de 18 probetas de impacto Charpy.

La figura 3.20 muestra una micrografía de las 3 probetas de impacto que fueron fabricadas con soldadura de una sola pasada y sin interacción electromagnética.

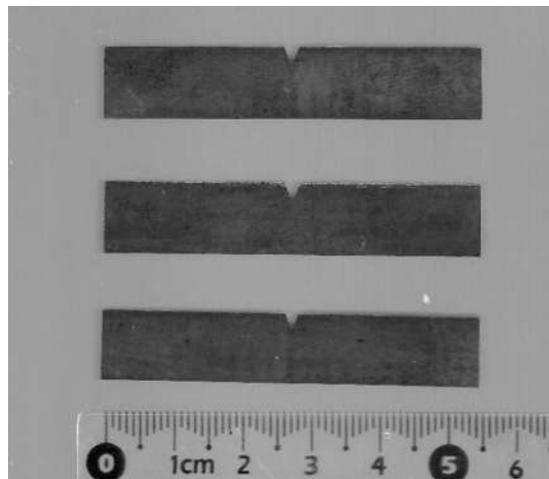


Figura 3.20 Macrografía de las 3 probetas para ensayo de impacto Charpy, que fueron soldadas con una pasada y sin interacción electromagnética.

3.5 Pruebas de microdureza

Las pruebas de microdureza se hicieron con un microdurómetro “Vickers”, el cual realiza una impronta con una punta de diamante, operado con ayuda de una computadora. La figura 3.21 muestra la forma en que se ve la impronta en el software del microdurómetro.

La impronta es en forma de rombo, y el usuario con ayuda del software, indica los extremos del rombo, inmediatamente el software hace un cálculo matemático y nos muestra el valor de microdureza en escala Vickers, que el material tiene en ese punto.

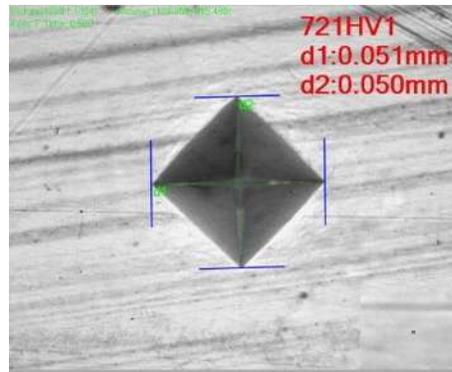


Figura 3.21 Imagen que se observa en la pantalla del monitor de la computadora, de una impronta hecha por el indentador.

Todas las pruebas de microdureza fueron hechas con una carga de 100 gramos, y con una distancia de 200 micras de separación entre una impronta y otra.

3.5.1 Pruebas de microdureza en metal base

Se utilizó metal base con dimensiones de 10 milímetros de ancho, por 20 milímetros de largo para las pruebas de microdureza.

Se hicieron 3 barridos a lo ancho de la pieza. Dando en total 30 valores de microdureza.

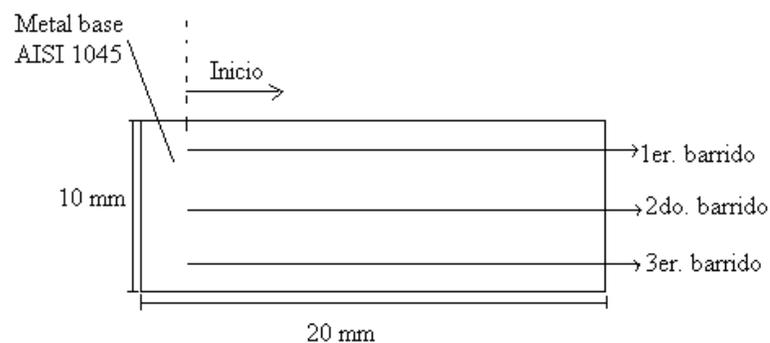


Figura 3.22 Barridos de microdureza realizados en el metal base

3.5.2 Pruebas de microdureza en soldadura con múltiples y una sola pasada.

De igual manera que en las pruebas de microdureza del metal base, la carga que se utilizó fue de 100 gramos cada 200 micras.

Se hicieron 3 barridos en cada soldadura con, y sin interacción electromagnética, de las uniones que fueron soldadas tanto con una sola pasada, como con múltiples pasadas.

El barrido se realizó en la parte superior, central e inferior de cada soldadura. Iniciando desde la parte izquierda donde es metal base, atravesando la ZAT izquierda, el cordón de soldadura, la ZAT derecha y finalmente terminando hasta donde se encuentra nuevamente metal base que no fue afectado térmicamente del lado derecho.

Esto con la finalidad de tener perfiles de microdureza, que nos permitan conocer cómo se comporta el material en las distintas zonas que conforman la unión.

La figura 3.23 muestra el esquema de los barridos que realizó el equipo para obtener los perfiles de microdureza.

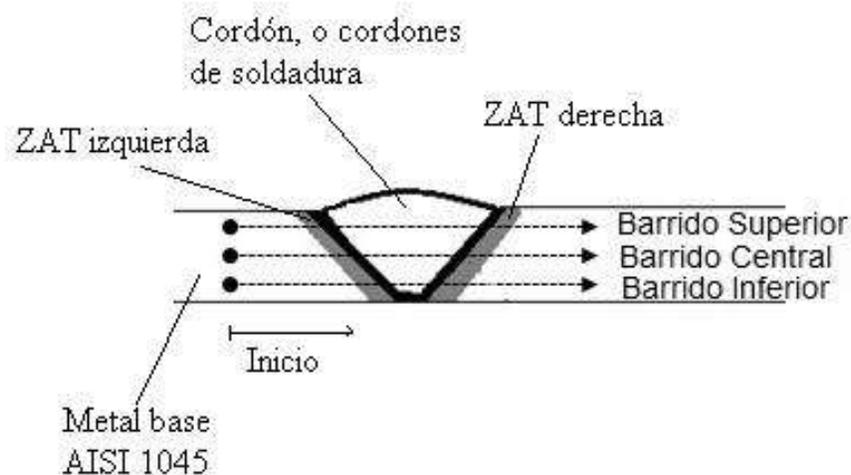


Figura 3.23 Esquema de los barridos de microdureza en las soldaduras de una y varias pasadas

3.6 Microscopia electrónica de barrido (MEB).

Las piezas que fueron observadas en el microscopio electrónico de barrido, fueron en un equipo JEOL 6400. Por medio del equipo se obtienen imágenes de alta resolución, típicamente se observan y se guardan imágenes a 50, 100, 200, 500, 1000, 2000, 4000 y 8,000 aumentos.

3.6.1 MEB en la zona afectada térmicamente de la soldadura con una pasada

Se analizó una muestra de cada condición de soldadura con una pasada, es decir sin interacción electromagnética, con interacción de 3.4, y con interacción de 4.3 mT. Dando un total de 3 muestras.

Esto con la finalidad de poder observar a más aumentos, lo que hay dentro de los granos austeníticos, de la zona afectada térmicamente, ya que con microscopía óptica no era posible distinguir con claridad lo que hay dentro del grano.

Se observaron las tres muestras y se compararon los tipos de morfologías encontradas en cada muestra.

Las dimensiones de cada muestra fueron: 15 mm de largo, 10 mm de ancho, y 7 mm de espesor.

3.6.2 Fractografía de probetas de impacto Charpy de soldadura con una pasada

Una vez que las probetas de impacto Charpy fueron realizadas, se hizo un corte algunos milímetros antes de donde el material fracturó, y se llevaron a observar inmediatamente a microscopía electrónica de barrido, esto con la finalidad que la zona de fractura no se dañara, o se fuera a contaminar por óxido o algunas otras impurezas del medio ambiente.

Se analizó una muestra de cada condición de probeta de ensayo Charpy con soldadura de una pasada, es decir, una muestra sin interacción electromagnética, otra con interacción de 3.4 mT, y la última con una interacción electromagnética de 4.3 miliTeslas.

El objetivo de analizar la fractura por MEB, fue para identificar qué tipo de fractura es, si presentó una fractura dúctil, o una fractura frágil. O si presenta características de las dos.

3.6.3 Fractografía de probetas de ensayo de tensión de soldadura con una pasada

Una vez que las probetas fueron sometidas a tensión y fueron fracturadas completamente, se cortó el extremo de las probetas donde se encuentra localizada la fractura, posteriormente se llevaron al MEB, para poder observar y analizar el tipo de fractura generada, si fue dúctil o frágil, o alguna combinación de las dos, ya que algunos materiales presentan un comportamiento mitad dúctil y mitad frágil.

Se observó una muestra de cada condición de las probetas de tensión con una pasada, es decir, una que tenía soldadura sin interacción electromagnética, otra con interacción de 3.4 miliTeslas, y la última con una interacción electromagnética de 4.3 miliTeslas.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Análisis microestructural

4.1.1 Caracterización microestructural de metal base

El acero que se recibió directamente del proveedor, se analizó en el microscopio óptico. Se pudieron observar las distintas fases presentes en el acero, así como la morfología de la microestructura.

La figura 4.1 muestra que el acero está prácticamente conformado por dos fases, lo que es la ferrita y perlita. El resultado de esta microestructura se debe a que durante la fabricación del material se llevó al calentamiento hasta la región de transformación de austenita, seguido de un enfriamiento controlado para producir una mezcla de granos de ferrita y perlita [54].

La velocidad de enfriamiento relativamente lenta evita la aparición de microestructuras como la martensita, que se obtiene a velocidades de enfriamiento más altas. En este caso el acero AISI 1045 es un acero hipoeutectoide que se caracteriza por estar formado de dos fases ferrita mas perlita.

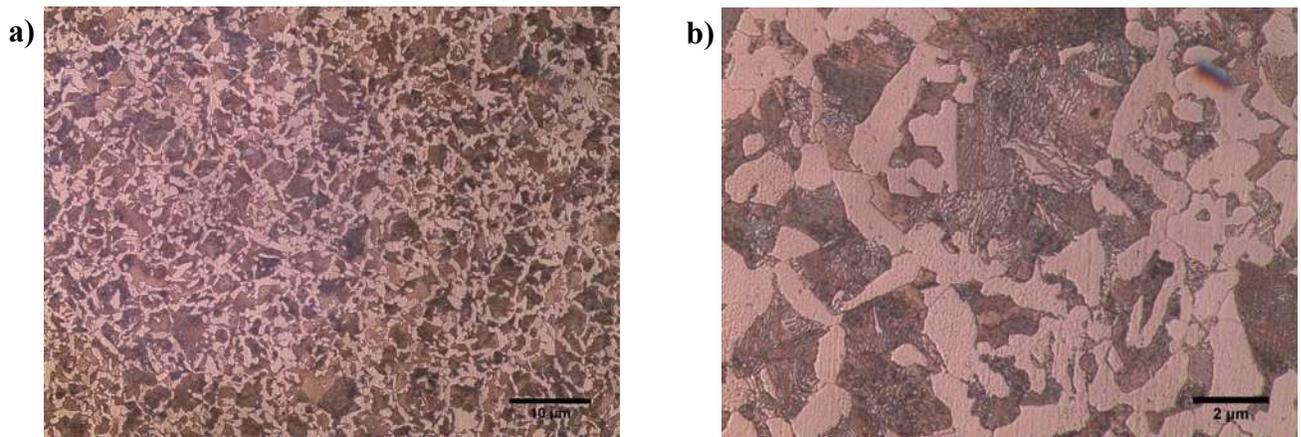


Figura 4.1 Micrografía del acero AISI 1045, en condición del proveedor. a) 200X, b)1000X.

En la figura 4.1b) se puede distinguir más claramente las fases que conforman el acero.

Se pudo distinguir claramente que las zonas oscuras pertenecen a la perlita, y las zonas claras es la ferrita. Ambas fases se encuentran en una proporción al 50% cada una, por lo que podemos decir que el acero AISI 1045 se compone de una matriz ferrítica-perlítica [55].

A su vez, dentro de los granos de perlita, podemos observar cementita en forma laminar, se pudo observar a detalle las láminas de cementita en color oscuro y la ferrita en color claro. La concentración de cementita es función del contenido de carbono en el acero, por lo que el acero AISI 1045 es de medio carbono, nos resulta una concentración media de cementita. La estructura laminar de la cementita dentro de los granos de perlita también nos indica que ésta fue formada por un enfriamiento muy lento.

4.1.2 Caracterización microestructural de soldadura de múltiples pasadas

A continuación, en la figura 4.2 se muestran las macrográficas de los perfiles de los cordones de soldadura.

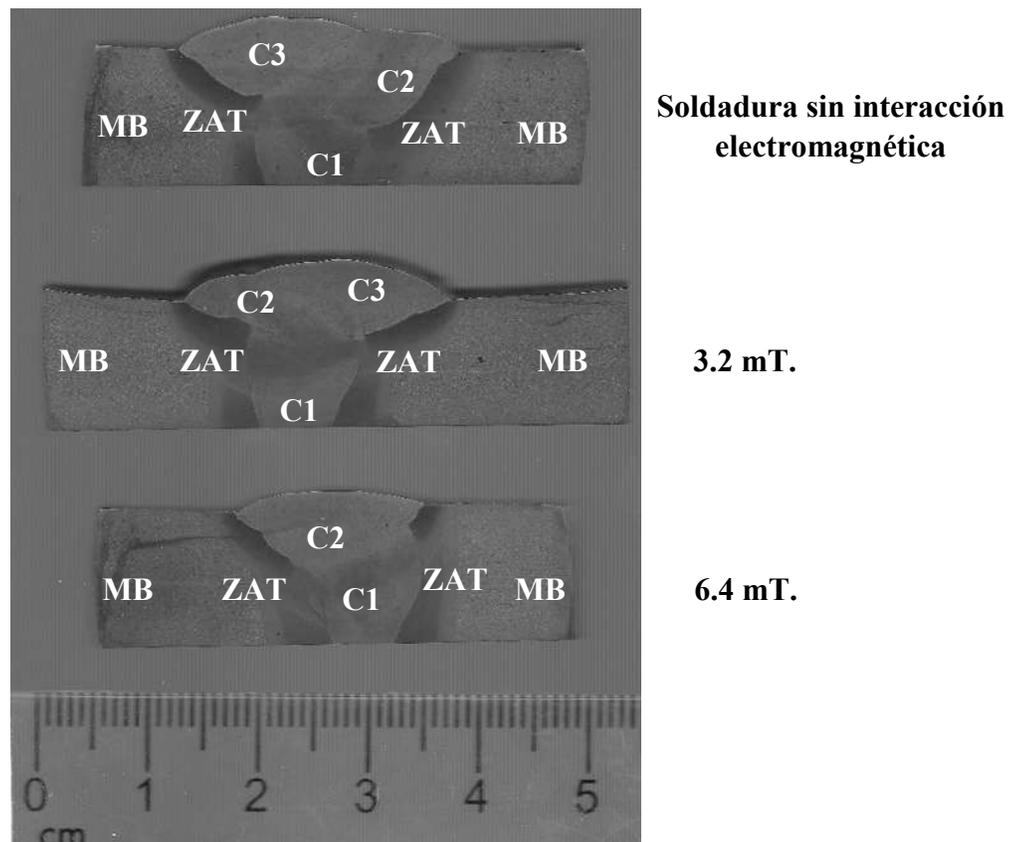


Figura 4.2 Perfiles de los cordones de soldadura.

4.1.2.1 Caracterización microestructural de soldaduras sin interacción electromagnética

Esta soldadura se realizó en 3 pasadas, debido al espesor de la junta, por lo cual tres cordones fueron necesarios para cubrir el diseño de la unión en V simple.

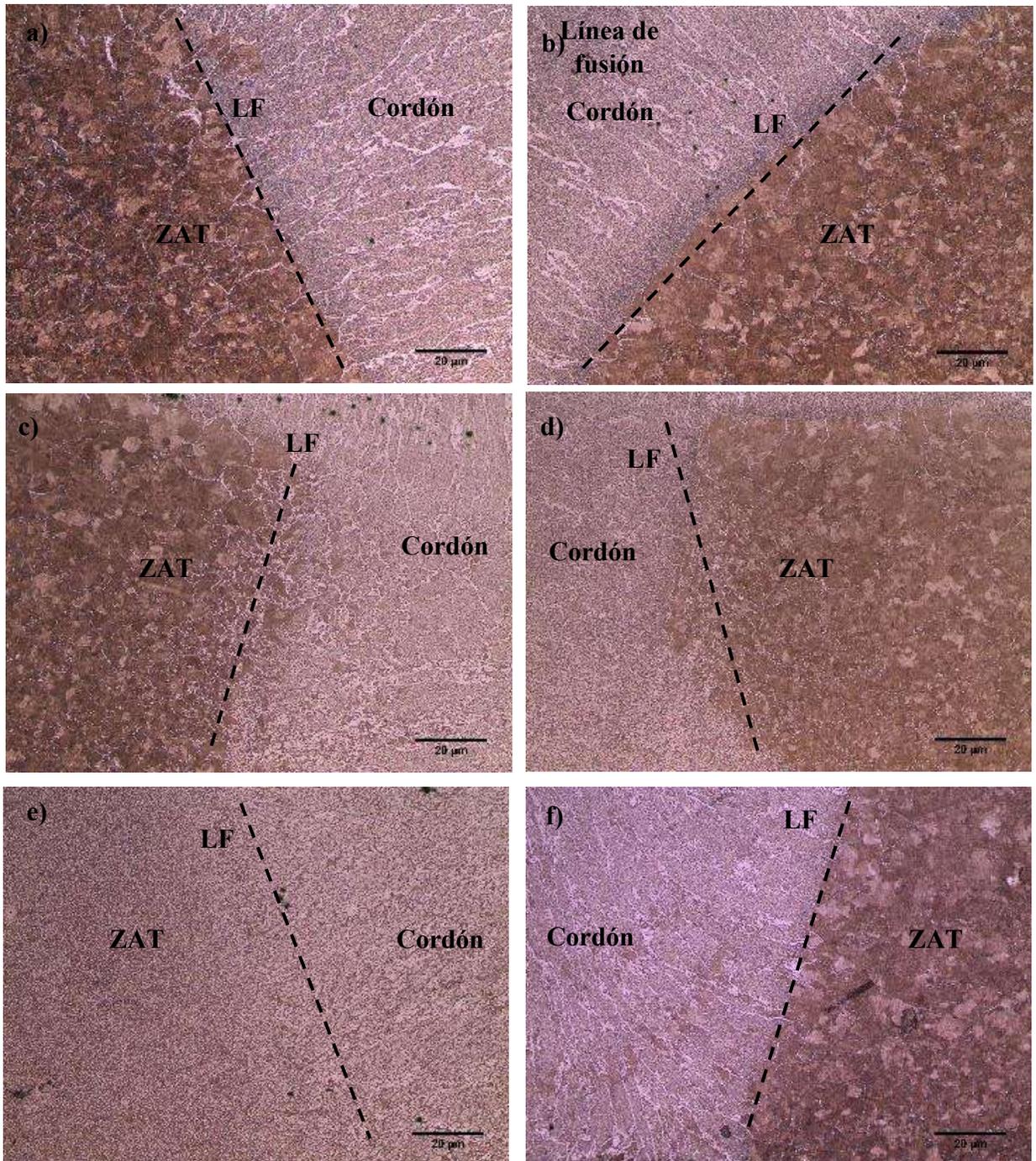


Figura 4.3 a) Intersección cordón-ZAT, parte superior izquierda. b) Parte superior derecha. c) Parte central izquierda. d) Parte central derecha. e) Parte inferior izquierda. f) Parte inferior derecha.

La figura anterior (4.3), nos muestra la intersección entre el cordón del material depositado y la zona afectada térmicamente separados por la línea de fusión. Dentro del cordón de soldadura se observa un crecimiento columnar debido al ciclo de calentamiento y posterior enfriamiento, lo que resulta en este tipo de morfología. En la zona afectada térmicamente se tiene crecimiento de grano austenítico, y también es importante observar que el grano está más refinado como se puede apreciar en la figura 4.3 c), d) y e). Esto debido a que esa zona se vio afectada por el doble ciclo térmico, el calentamiento y enfriamiento generados por la aplicación de los cordones de soldadura subsiguientes, lo que generó que la ZAT en esa zona tenga el grano más refinado.

En los límites de la intersección de la zona afectada térmicamente con la del cordón de soldadura se observa la presencia de ferrita acicular, la cual se forma en el interior del grano austenítico, y tienen la forma característica de granos de ferrita en forma de aguja [56].

En la figura 4.4 se aprecian los granos de ferrita acicular dentro del grano austenítico, y también se puede observar que hay formación de ferrita proeutectoide formada en los límites de grano austenítico.

La ferrita proeutectoide es formada a partir de los límites de grano austeníticos entre las líneas de transformación AC_3 Y AC_1 , debido a que, durante el enfriamiento, los átomos de carbono difunden desde sitios octaédricos de una estructura FCC, hasta los sitios tetraédricos de una estructura BCC. La reorganización de los átomos origina los núcleos de ferrita proeutectoide.

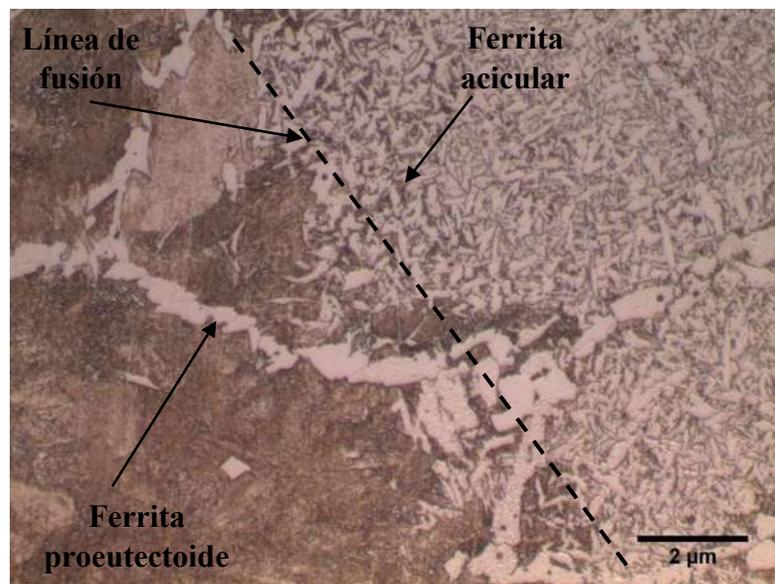


Figura 4.4 Intersección ZAT- cordón, a 1000X.

El crecimiento de grano austenítico en la zona afectada térmicamente se puede apreciar de mejor manera en la figura 4.5. Este crecimiento de grano austenítico se debe a que la temperatura alcanzada por el acero en la zona afectada térmicamente durante el proceso de soldadura fue superior a los 1000 °C, lo que de acuerdo a los diagramas de transformación del acero AISI 1045, llega la zona de formación de grano austenítico, el grano austenítico crece proporcionalmente conforme se aumenta la temperatura [57].

Al ser un acero al carbono, el carbono es un elemento que estabiliza la austenita, por lo tanto, aumenta el rango de formación de austenita en este acero.

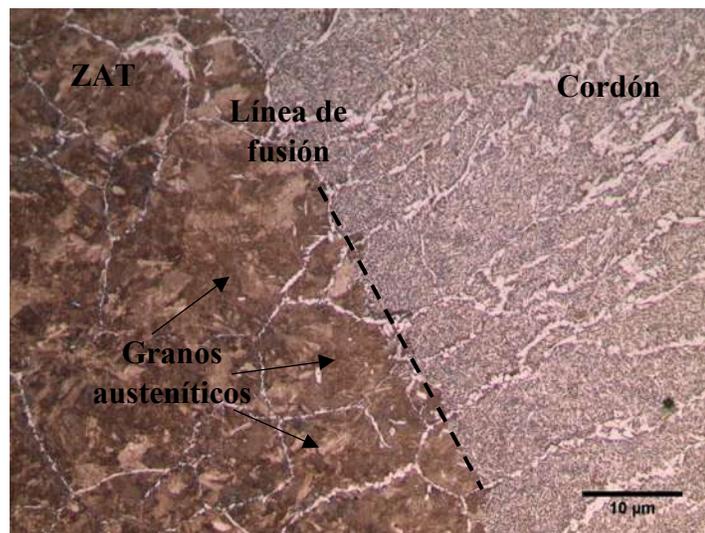


Figura 4.5 Intersección ZAT-cordón a 200X.

Otro aspecto relevante es que la distribución del tamaño de grano austenítico es de forma heterogénea, esto quiere decir que el tamaño de grano no es uniforme, los granos de mayor tamaño son los que se encuentran cerca de la línea de fusión, y los granos austeníticos de menor tamaño se van presentando conforme se aleja de la línea de fusión y acercándose más al metal base.

Por otro lado, en la zona afectada térmicamente, se tiene formación de martensita, la cual es la microestructura más importante para el presente estudio de investigación, ya que esta microestructura es la responsable de que el acero no sea soldable, debido a su elevada dureza, que a su vez genera fragilidad, pérdida de ductilidad y tenacidad. La formación de martensita también genera un incremento de volumen que impone esfuerzos adicionales en la estructura.

La figura 4.6 muestra los granos austeníticos que crecieron en la ZAT, y dentro de ellos es posible observar la formación de martensita en las zonas más oscuras.

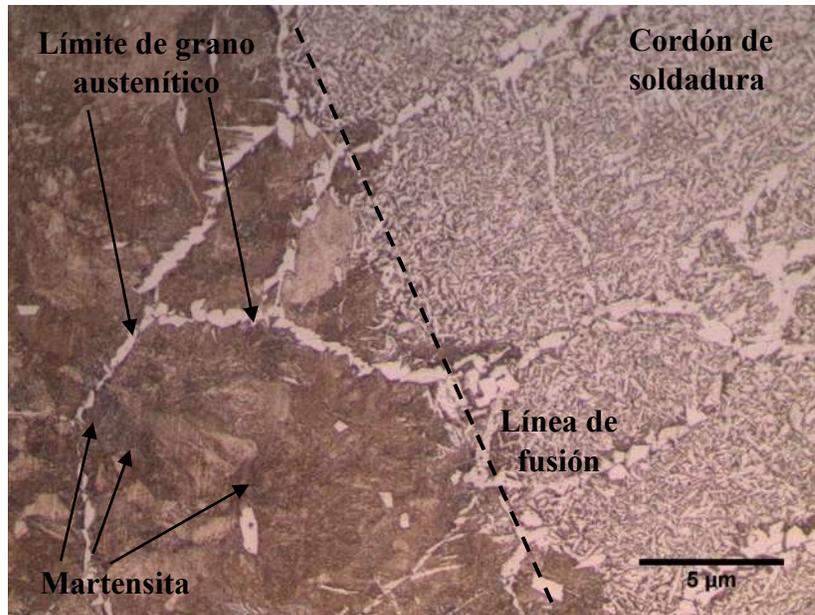


Figura 4.6 Microestructuras en interfase cordón-ZAT.

La martensita se produce debido al calentamiento y enfriamiento rápido de la zona afectada térmicamente, ya que durante el proceso de soldadura se alcanza una temperatura mayor a 850 °C, y al finalizar el proceso, el enfriamiento al aire se traduce como un enfriamiento rápido donde la ZAT baja hasta una temperatura de 350°C, que es a partir de esa temperatura hacia abajo, donde la austenita comienza su transformación a martensita.

Lo anterior también se puede describir como un enfriamiento rápido donde se evita tocar la “nariz” de la primera curva de transformación del diagrama TTT del acero AISI 1045. En el diagrama TTT la martensita comienza a formarse a la temperatura M_s , y el porcentaje de martensita formada depende de cuánto desciende la temperatura por debajo de M_s hasta llegar a M_f , que es donde la transformación a martensita es del 100%.

La transformación martensítica no implica difusión, por lo cual ocurre casi instantáneamente, los granos martensíticos nuclean y crecen a velocidades muy altas dentro de la matriz austenítica.

4.1.2.2 Caracterización microestructural de soldaduras campo con electromagnético 3.2 mT

La soldadura de esta unión también se llevó a cabo con 3 pasadas, el primer cordón se depositó donde se ubica el talón de las placas, y los otros dos se depositaron encima uno cargado hacia el lado izquierdo, y el otro cargado hacia el lado derecho respectivamente.

La interacción electromagnética de 3.2 mT se activó durante y hasta después de haber transcurrido 1 minuto en cada cordón de soldadura que se aplicó.

En la figura 4.7 y 4.8 se muestran las micrografías de las zonas entre el cordón y la ZAT, de la parte superior, central e inferior de la placa.

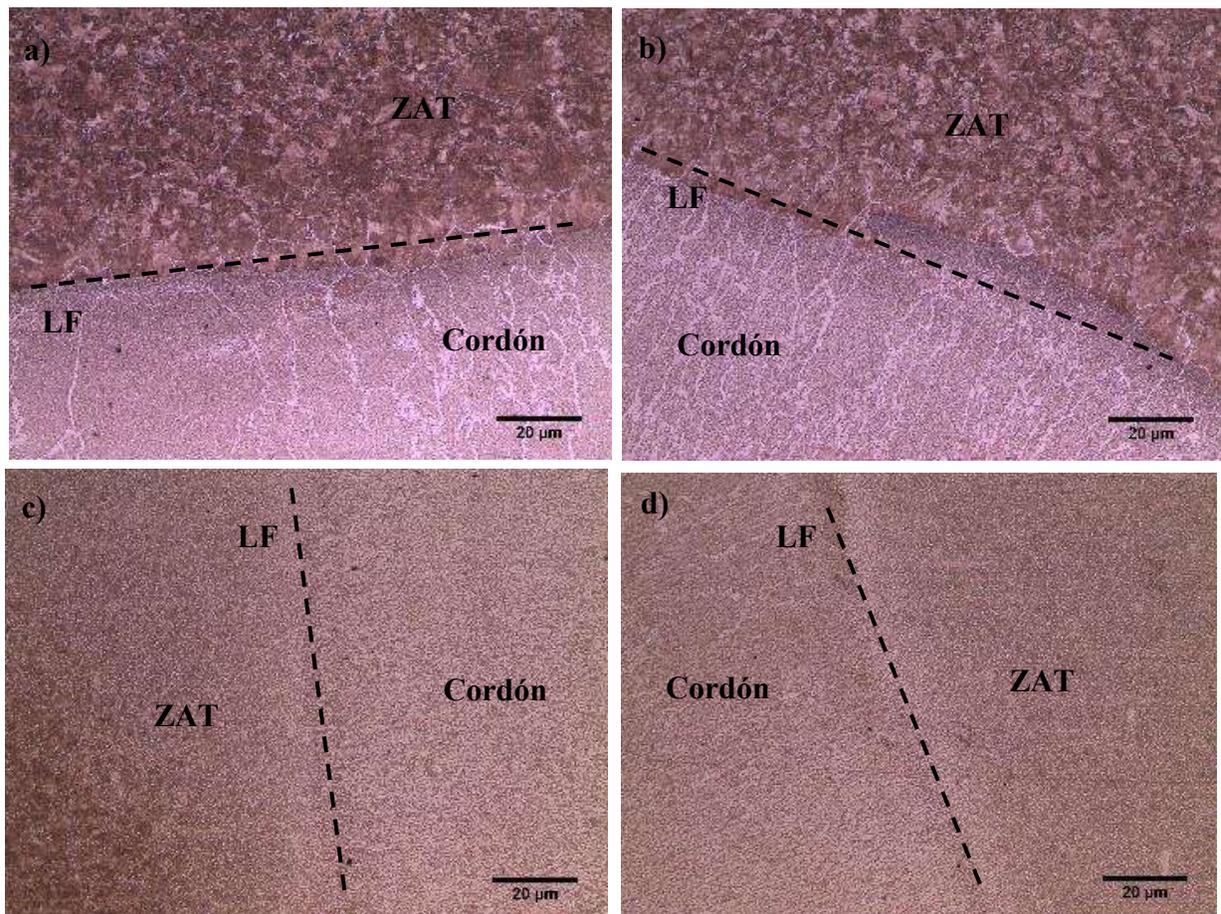


Figura 4.7 a) Intersección cordón-ZAT, parte superior izquierda. b) Parte superior derecha. c) Parte central izquierda. d) Parte central derecha.

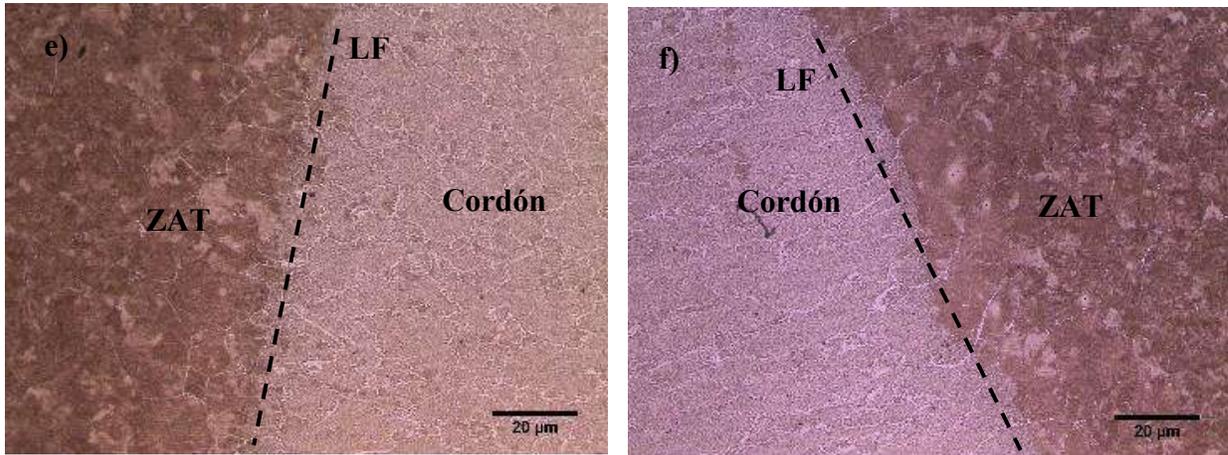


Figura 4.8 e) Intersección cordón-ZAT, parte inferior izquierda. f) Parte inferior derecha.

En las imágenes obtenidas de las zonas superior e inferior se puede observar el crecimiento de grano austenítico característico de la zona afectada térmicamente, sin embargo, en la parte central se observa un grano muy refinado, esto debido al doble ciclo térmico aplicado en esa zona.

En la zona afectada térmicamente se pueden apreciar zonas oscuras que corresponden a la formación de martensita debido al enfriamiento rápido al aire.

No se pudo observar alguna diferencia de la soldadura sin interacción electromagnética, se puede observar el crecimiento de grano lateral a la línea de fusión (figura 4.9), y también la presencia de los granos de ferrita en forma acicular se muestra en la figura 4.10.

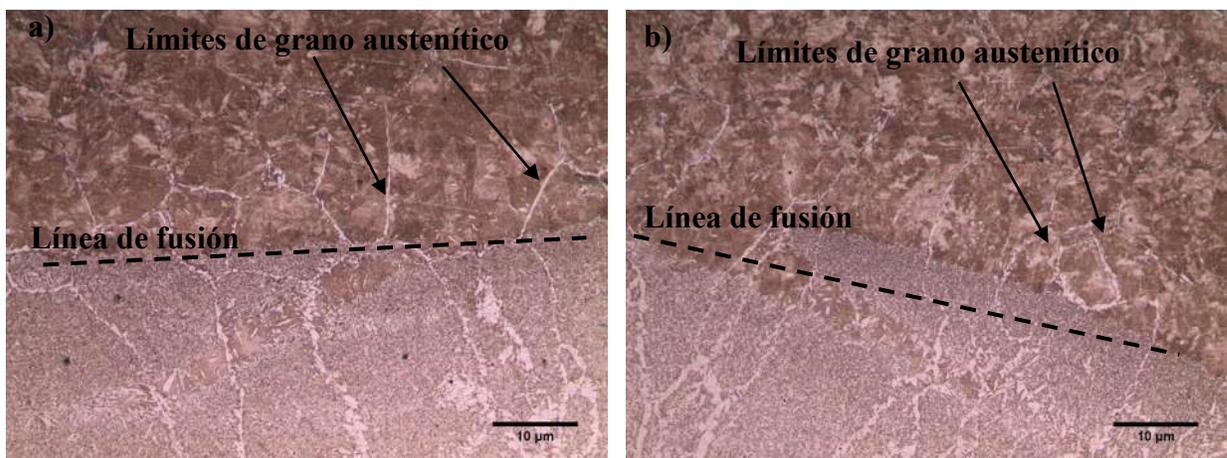


Figura 4.9 a) Intersección cordón-ZAT, parte central izquierda. b) Intersección cordón-ZAT parte central derecha.

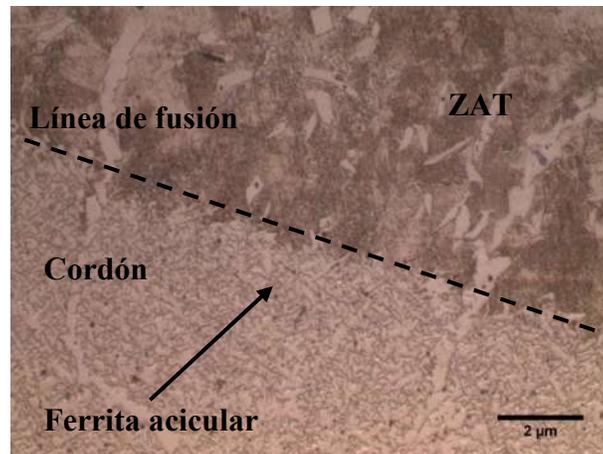


Figura 4.10 a) Zona cordón-ZAT, soldadura 3.2 miliTeslas.

Las fases y microestructuras presentes dentro de la zona afectada térmicamente son las mismas que en la soldadura sin interacción electromagnética, ya que el ciclo térmico y la composición química del acero es la misma.

4.1.2.3 Caracterización microestructural de soldaduras con campo electromagnético 6.4 mT

En la unión de esta placa solo se llevaron a cabo dos pasadas, ya que solo dos cordones bastaron para cubrir de material de aporte el diseño de la unión en V de las placas. En este caso la intensidad electromagnética fue la mayor, siendo de 6.4 mT.

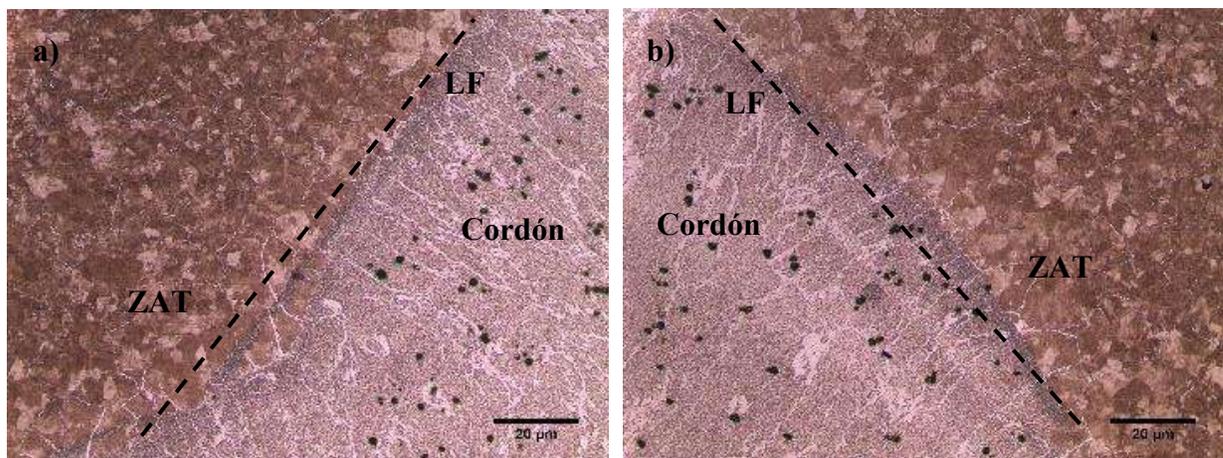


Figura 4.11 a) Zona cordón-ZAT parte superior izquierda. b) Parte superior derecha

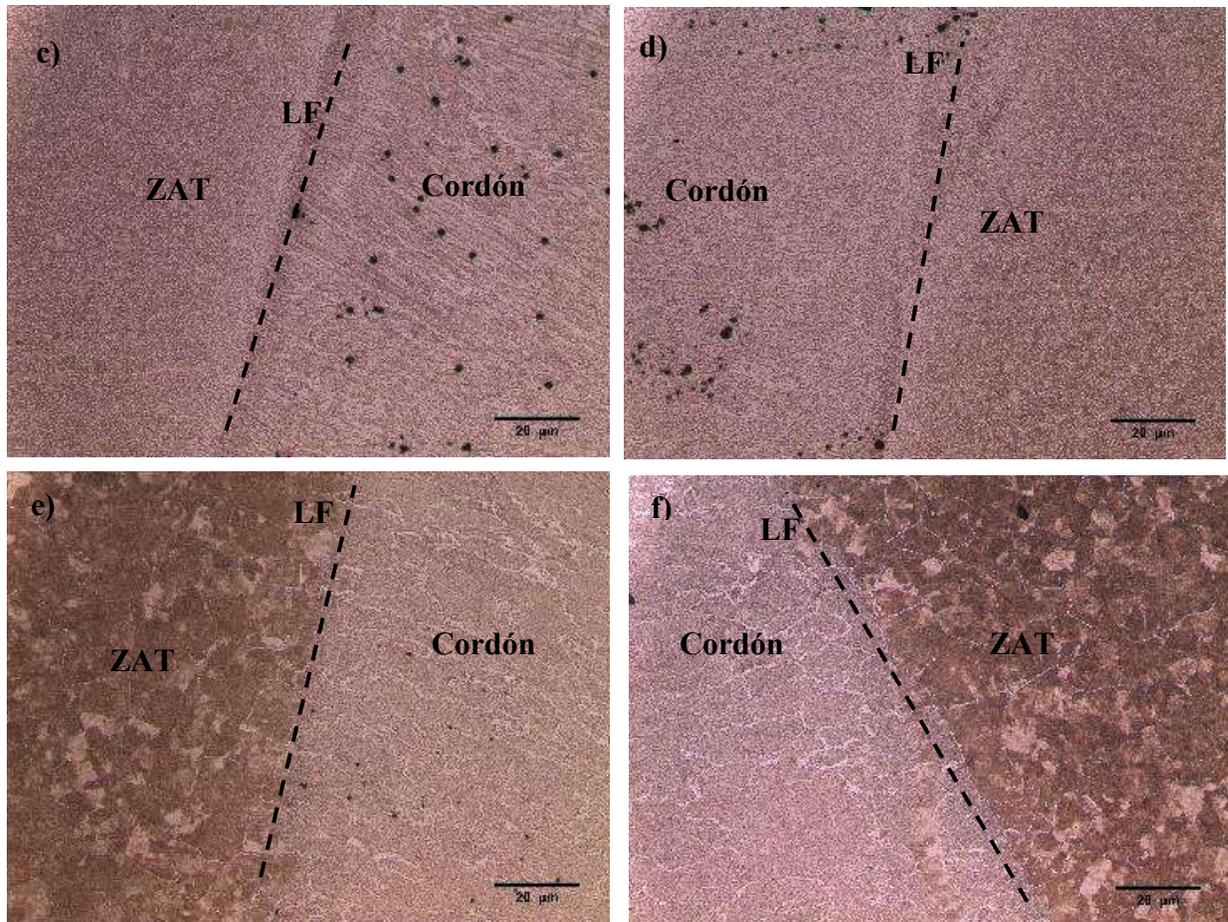


Figura 4.11 c) Zona cordón-ZAT parte central izquierda. d) Parte central derecha. e) Parte inferior izquierda. f) Parte inferior derecha.

La figura anterior muestra las metalografías de la zona del cordón, línea de fusión y zona afectada térmicamente desde la parte superior, parte central y parte inferior de las placas unidas.

En la parte central de ambos lados del cordón aplicado, de igual forma el grano está refinado debido a que se aplicó un cordón de soldadura subsiguiente, lo cual afecta la zona afectada térmicamente que estaba previamente.

En la zona afectada térmicamente no se observan cambios aparentes en la cantidad y morfología de las microestructuras generadas.

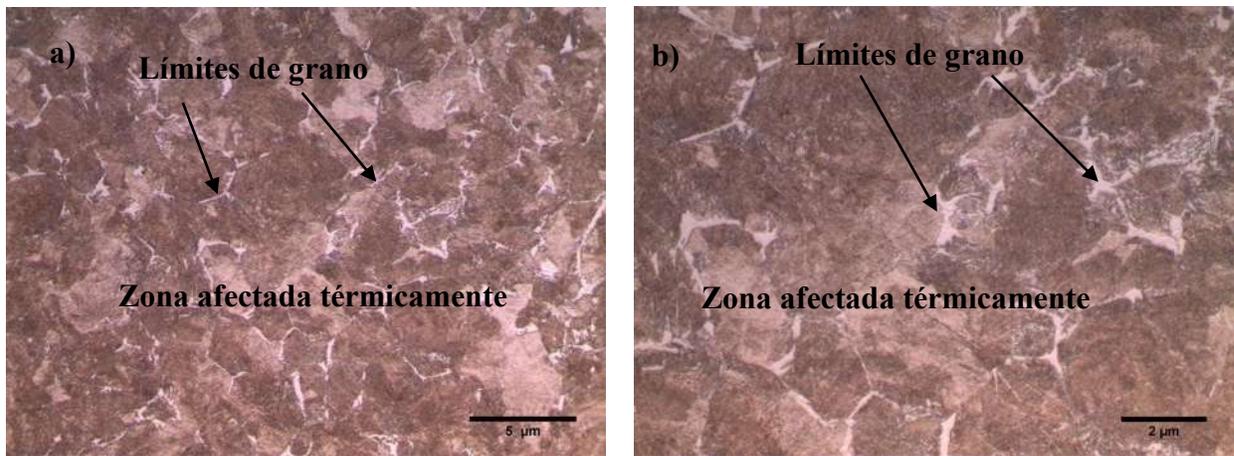


Figura 4.12 ZAT de la zona superior izquierda de la unión. a) 500X. b) 1000X.

En la figura 4.12 a), se observan los límites de grano austenítico de forma clara y brillante, lo que corresponde a la ferrita proeutectoide, se puede observar como el tamaño de grano varía, pudiéndose ver granos grandes hasta granos muy pequeños. La figura 4.12 b), muestra estos límites con mayor claridad y se puede observar perfectamente la delimitación de cada grano.

El análisis de las imágenes anteriores, nos confirman que la interacción electromagnética no afecta en gran medida el tipo, tamaño y cantidad de las microestructuras formadas en la zona afectada térmicamente.

4.1.2.4 Medición y análisis de tamaños de grano en la ZAT

Para determinar si la interacción electromagnética tiene influencia sobre el tamaño de grano de la zona afectada térmicamente, se midieron los tamaños de los granos en la zona afectada térmicamente de las diferentes tres condiciones de soldadura, es decir, de las placas soldadas sin interacción electromagnética, y con interacción de 3.2 mT y con interacción de 6.4 mT. Con ayuda del programa “SigmaScan Pro 5” se hicieron las mediciones y se obtuvo un promedio para cada condición.

Con ayuda del software se midieron los granos austeníticos adyacentes y más cercanos a la zona de fusión, ya que son los granos más delimitados y se pueden distinguir claramente. Se hizo un total de 40 mediciones y se obtuvo un promedio.

Los tamaños de grano que se midieron corresponden a la zona afectada térmicamente formada a la izquierda superior del cordón de soldadura, en cada una de las tres diferentes condiciones.

La figura 4.13 muestra la manera en que se llevaron a cabo las mediciones por medio del software.

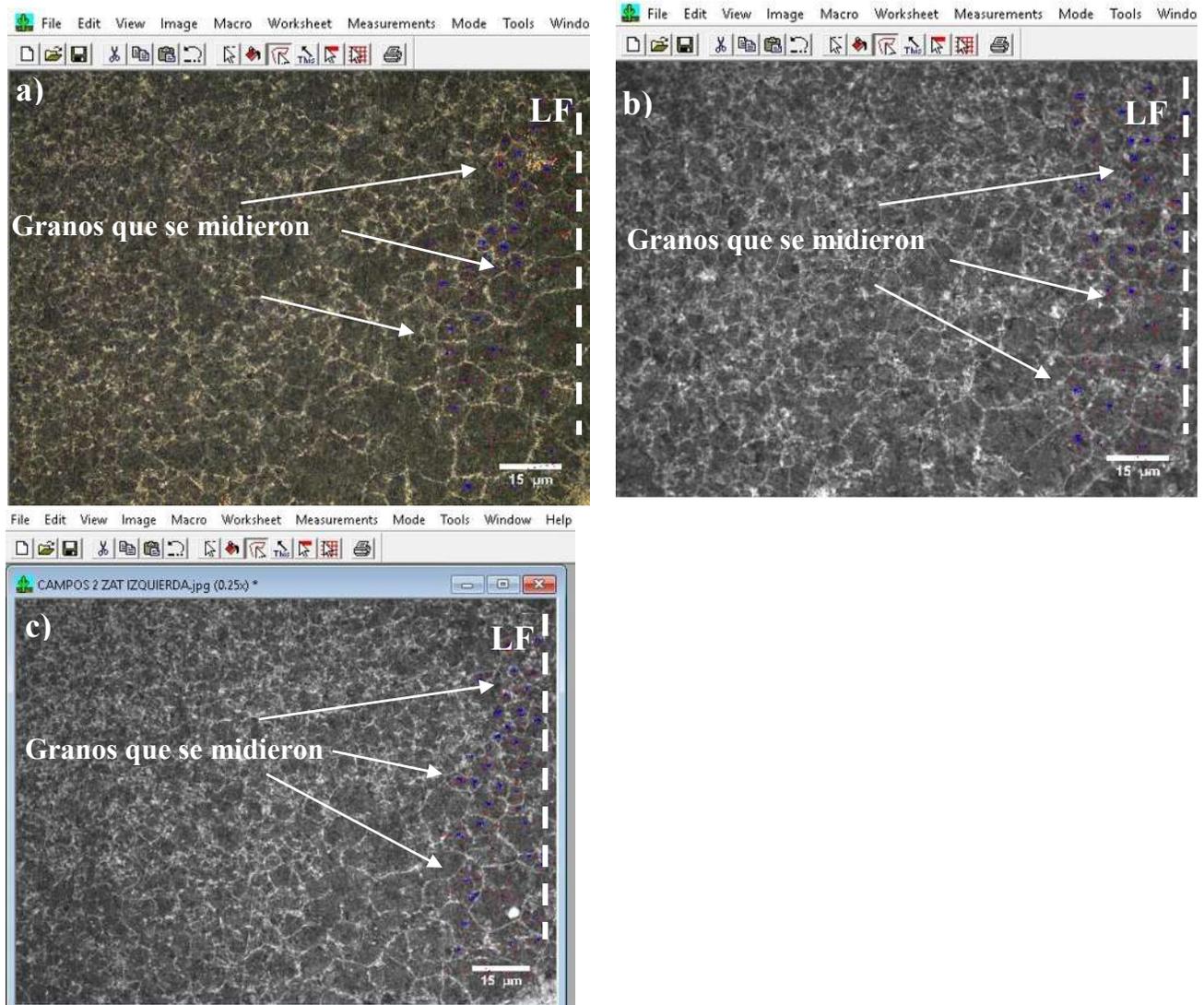


Figura 4.13 Medición de tamaño de grano con software. a) 0 mT, b) 3.2 mT. c) 6.4 mT.

El tamaño de grano promedio en la soldadura sin interacción electromagnética fue de $8.319 \mu\text{m}$, en la interacción de 3.2 mT fue de $7.393 \mu\text{m}$, y en la interacción con intensidad de 6.4 mT fue de $6.372 \mu\text{m}$. Aunque no es mucha la diferencia de tamaño de grano, en las micrografías se alcanza a distinguir un ligero refinamiento de grano en la ZAT con mayor interacción electromagnética.

4.1.3 Caracterización microestructural de soldadura de una pasada

Con la finalidad de evitar que la zona afectada térmicamente se vea impactada por doble o triple ciclo térmico, se rebajaron las placas para unión hasta un espesor de 12.7 mm, para así obtener una placa soldada con una sola pasada, y estudiar la zona afectada térmicamente.

Se obtuvieron imágenes de microscopía óptica de la zona donde está el cordón y la ZAT, en la zona superior, central e inferior de las muestras. Esto con la finalidad de poder observar la evolución microestructural y el tamaño de grano y hacer la comparación entre las distintas condiciones de soldadura.

4.1.3.1 Caracterización microestructural de soldaduras sin interacción electromagnética

A continuación, la figura 4.14 muestra la macrografía de un corte transversal de la soldadura.

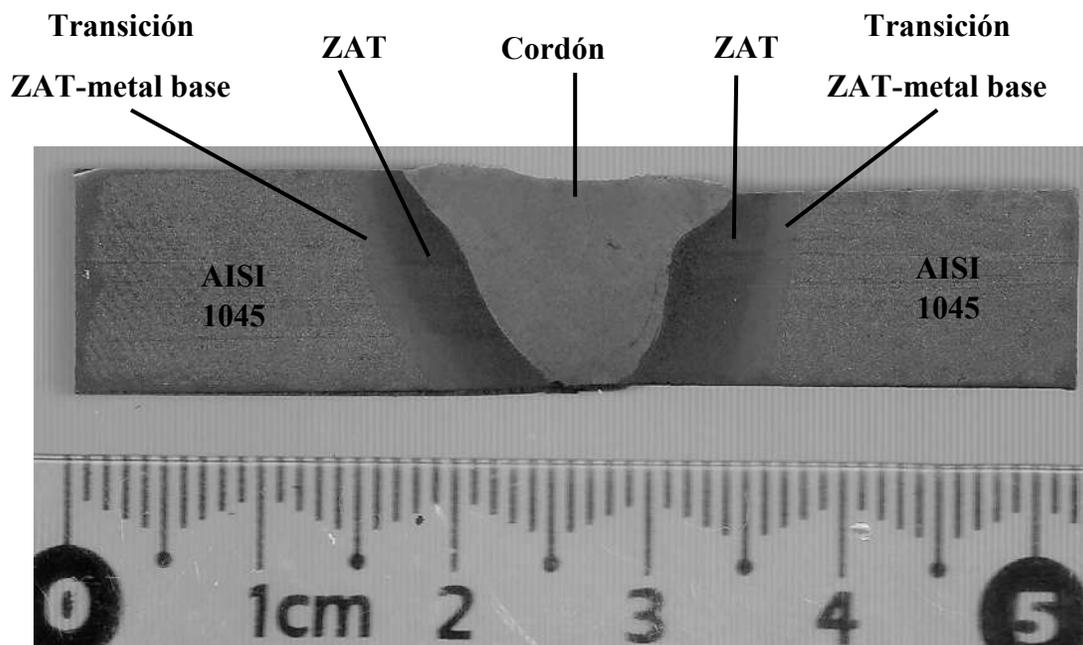


Figura 4.14 Macrografía unión soldada sin interacción electromagnética.

En la imagen 4.14 se puede observar claramente las zonas características del cordón de soldadura, en el centro se puede observar el cordón que contiene el material de aporte, a ambos lados se ven regiones oscuras que corresponden a la zona afectada térmicamente, y entre la zona afectada térmicamente y el metal base, se encuentra una zona de transición que es donde divide la ZAT del

metal base, cabe destacar que esta región también es afectada por el calor, pero alcanza menor temperatura que la ZAT en sí.

A continuación, la figura 4.15 muestra una metalografía, donde se pudo observar a más aumentos la morfología creada entre la ZAT y el cordón.

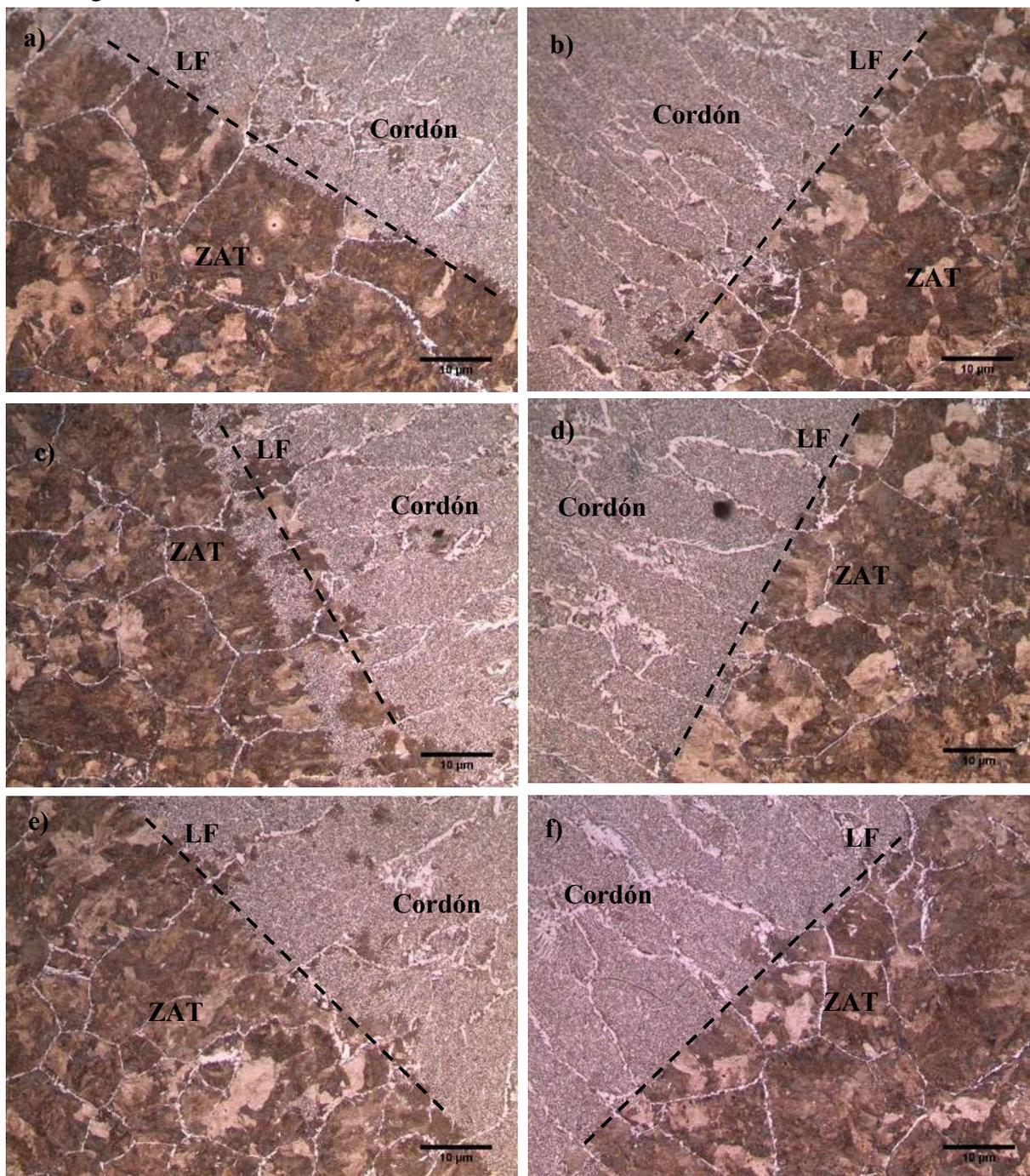


Figura 4.15 a) Cordón-ZAT superior izquierda. b) Superior derecha. c) Central izquierda. d) Central derecha. e) Inferior izquierda. f) Inferior derecha.

En las imágenes anteriores se pudo apreciar que, en las inmediaciones de la línea de fusión, se tiene presencia de ferrita acicular, la cual es característica en soldaduras de aceros al carbono.

En la zona afectada térmicamente, adyacente a la línea de fusión, se tiene un crecimiento de grano austenítico, debido a la alta temperatura que alcanza dicha zona. En la zona afectada térmicamente, conforme más se acerca hacia donde se encuentra el metal base, el tamaño de grano es más refinado.

El crecimiento de grano austenítico se debe a que la temperatura alcanzada en el acero está por encima de la temperatura denominada como AC_1 en los diagramas de transformación para el acero AISI 1045. Por encima de esa temperatura la austenita se vuelve estable y su tamaño aumenta conforme incrementa la temperatura.

En este caso al ser un enfriamiento rápido al aire, el tamaño de grano que se obtiene es burdo, y afecta negativamente las propiedades mecánicas del material en la ZAT.

En la figura 4.16 se observa más a detalle la distribución de los granos de ferrita acicular en forma de agujas. Así como también se pueden observar regiones blancas que corresponden al límite de grano austenítico y están conformadas de ferrita proeutectoide.

En la zona afectada térmicamente también se pueden observar zonas claras que corresponden a colonias de perlita.

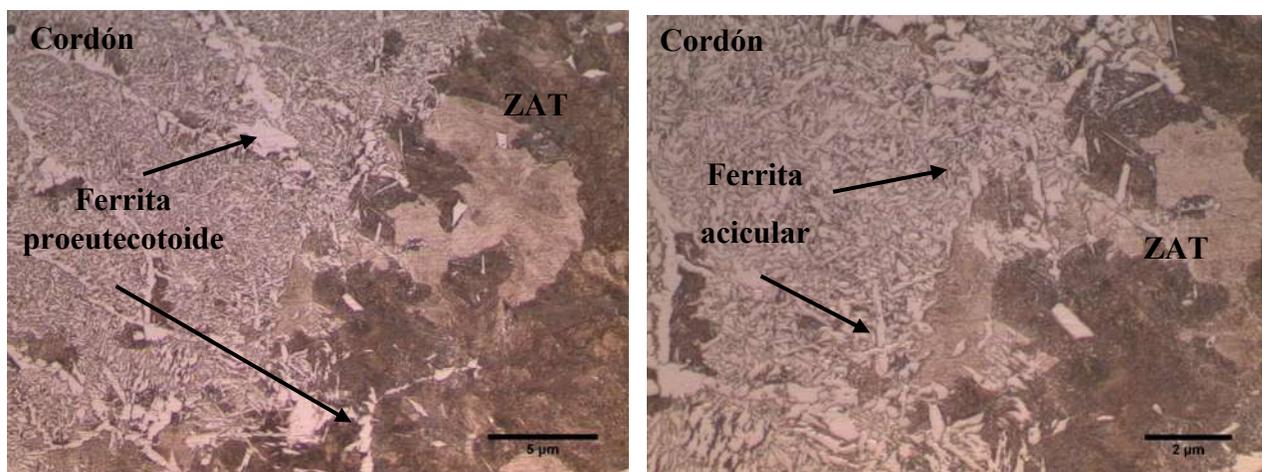


Figura 4.16 a) Cordón-ZAT superior izquierda. b) Superior derecha

4.1.3.2 Caracterización microestructural de soldaduras con campo electromagnético 3.4 mT

La figura 4.17 es una macrografía de la soldadura de una pasada con interacción electromagnética de 3.4 mT.

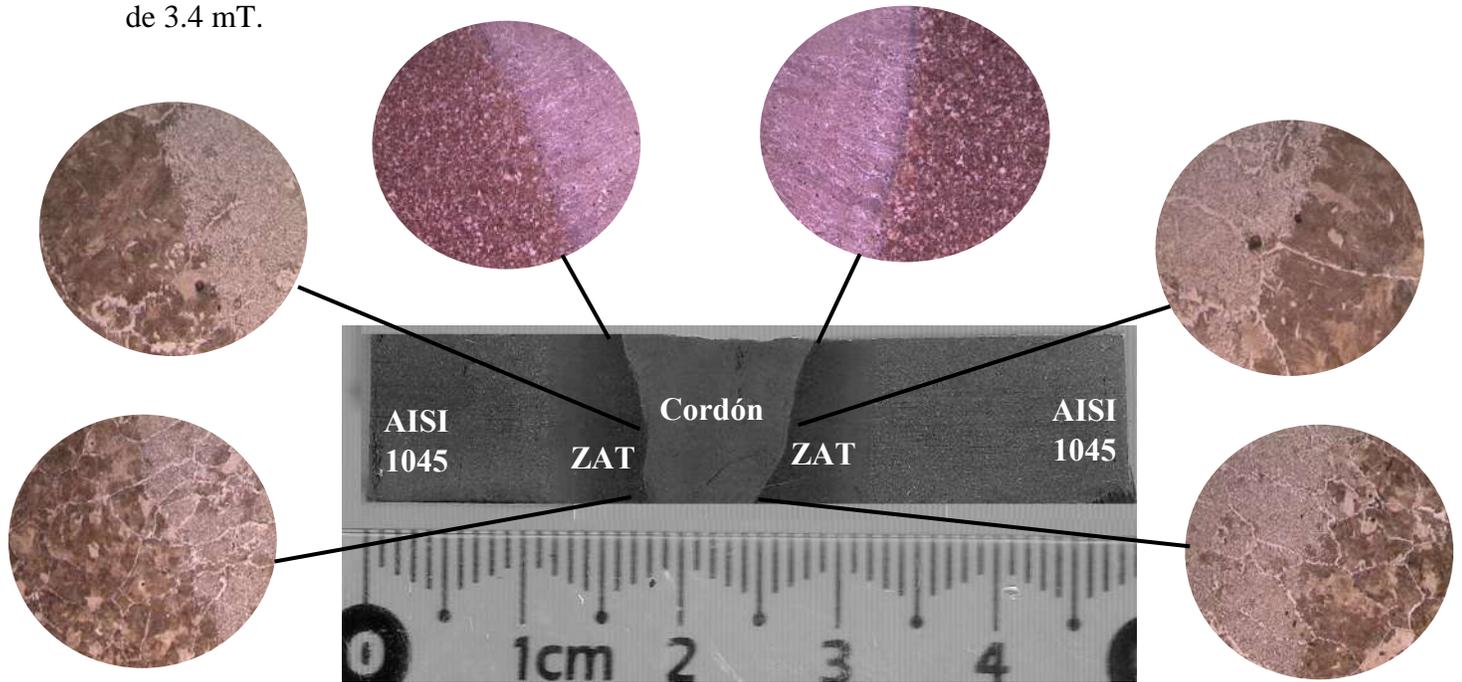


Figura 4.17 Macrografía de la soldadura, con imágenes a mayores aumentos.

En el centro se puede ver la zona donde se depositó el metal de aporte, las zonas oscuras adyacentes al cordón en ambos lados es la zona afectada térmicamente, que es la zona que sufre cambios microestructurales por el aporte de calor recibido, y en los extremos se encuentra el metal base que no sufre cambios.

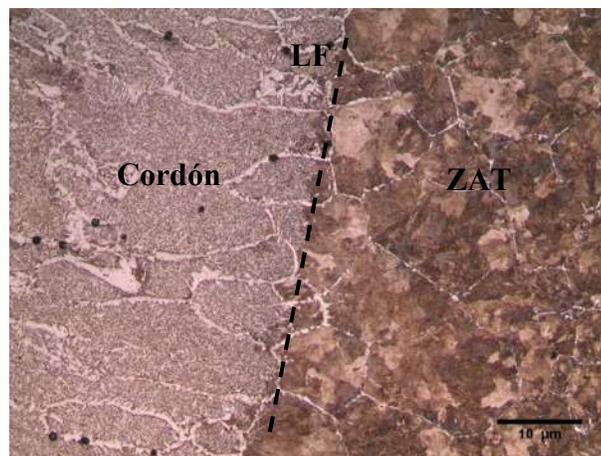


Figura 4.18 Cordón-ZAT a 200X.

Una ligera diferencia en la zona afectada térmicamente respecto a la soldadura sin interacción electromagnética, es que las regiones oscuras se ven más dispersas, y las zonas claras se observan más concentradas.

4.1.3.3 Caracterización microestructural de soldaduras con campo electromagnético 4.3 mT

La macrografía del corte transversal de la soldadura con interacción electromagnética de 4.3 miliTeslas, se muestra en la figura 4.19.

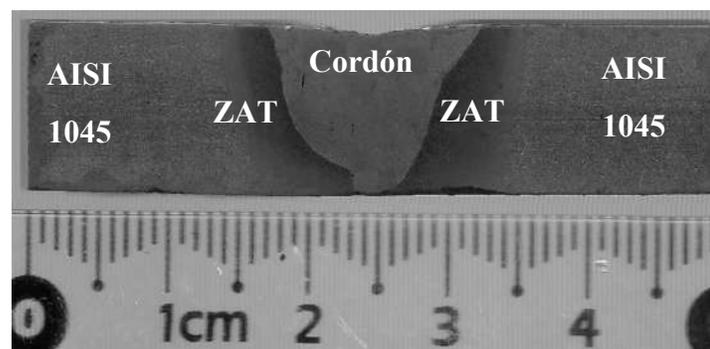


Figura 4.19 Macrografía de la soldadura con interacción electromagnética de 4.3 mT.

A simple vista el tamaño de la zona afectada térmicamente se ve igual en las diferentes condiciones de soldadura con y sin interacción electromagnética.

En cuanto a la zona afectada térmicamente, existe un crecimiento de grano austenítico, el cual es resultado del aporte de calor del proceso de soldadura

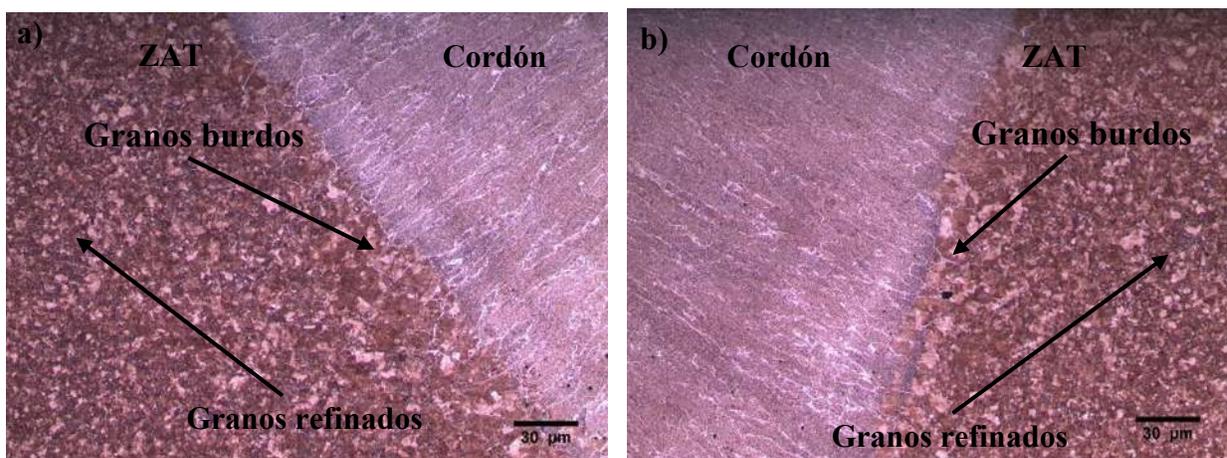


Figura 4.20 Cordón-ZAT a 50X. a) Parte superior izquierda. b) Parte superior derecha.

La figura 4.20, muestra la zona del cordón y la ZAT, donde también se puede observar que los granos austeníticos más grandes están adyacentes al cordón y conforme más lejos de la línea de fusión, el grano se encuentra más refinado.

La figura 4.21 es una micrografía de la zona del cordón-ZAT en la parte central (transversalmente), de la unión soldada. En la cual se aprecia claramente la ferrita proeutectoide, que es la que nos indica los límites de grano austenítico, y es de color blanco totalmente. También se observan algunos granos de ferrita acicular.

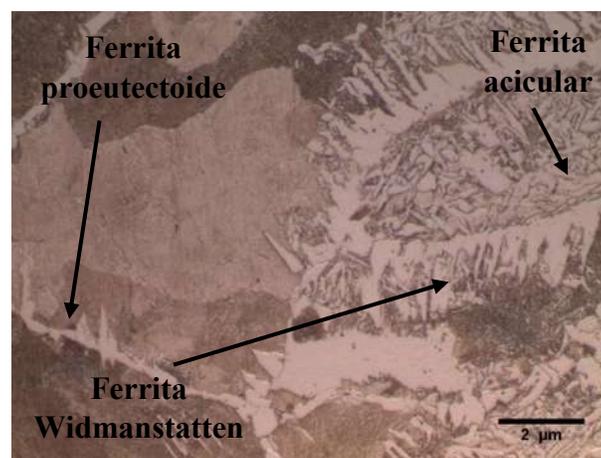


Figura 4.21 Transición cordón- ZAT a 1,000X.

La morfología y tipo de microestructuras presentes en la zona afectada térmicamente son similares a las que están presentes en las soldaduras sin interacción y con interacción de 4.3 mT.

4.1.3.4 Comparación del tamaño de la ZAT

Con el software “SigmaScan Pro 5”, se midió el tamaño de la zona afectada térmicamente, desde la línea de fusión, hasta donde empieza la transición a metal base. Lo anterior se hizo en tres partes, la parte superior del cordón, la parte central y la parte inferior.

Se realizaron mediciones de la zona afectada térmicamente de las tres condiciones de soldadura, sin interacción electromagnética y con interacción de 3.4 y 4.3 miliTeslas.

La figura 4.22 muestra las dimensiones medidas en cada pieza.

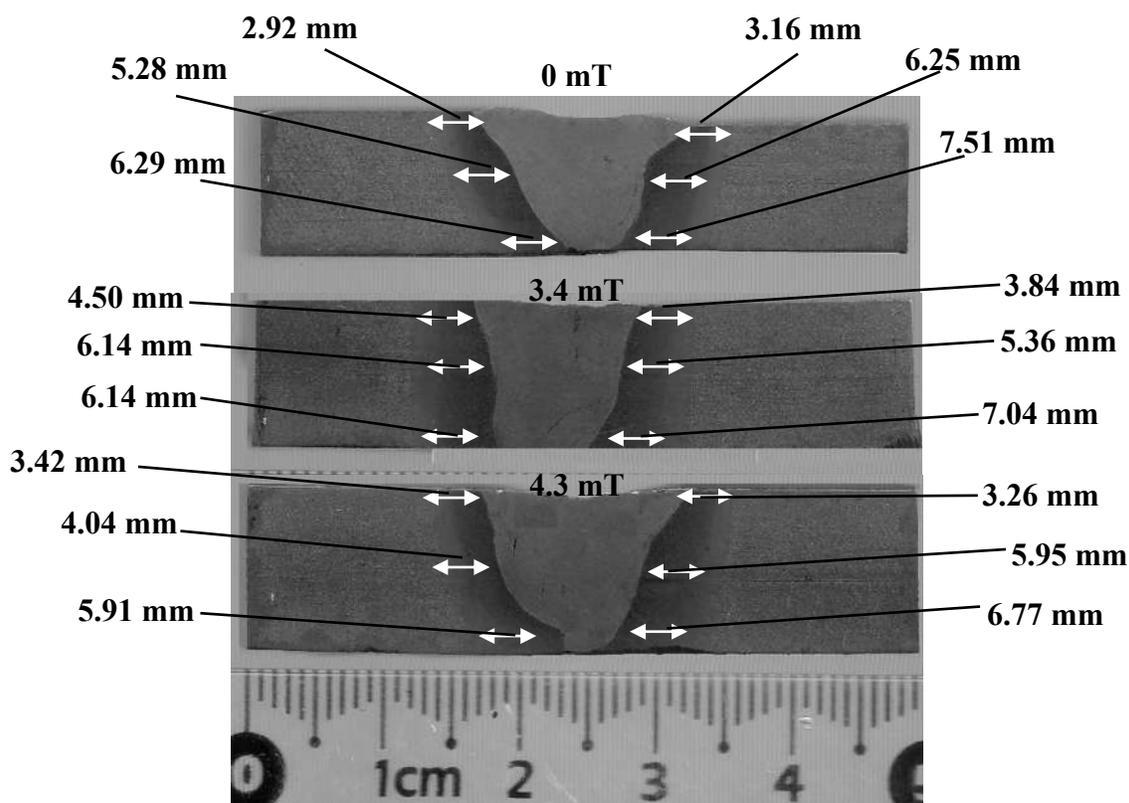


Figura 4.22 Medición de longitud de la ZAT.

El promedio de longitud de la ZAT sin interacción electromagnética fue, lado izquierdo 4.83 mm, lado derecho 5.64 mm.

En soldadura con 4.3 miliTeslas el promedio en la ZAT izquierda fue de 5.59 mm, en la ZAT derecha fue de 5.41 mm.

Finalmente, en la soldadura con 4.3 miliTeslas, el promedio de la longitud de la ZAT izquierda fue de 4.45 mm, y de la ZAT derecha fue de 5.32 mm.

Aunque la geometría del cordón no es igual en cada soldadura, el promedio de longitud de la ZAT es ligeramente menor en la condición con interacción de 4.3 miliTeslas.

4.1.3.5 Comparación del tamaño de grano en la ZAT.

Para comparar si hubo cambio del tamaño de grano en la zona afectada térmicamente, con ayuda del software “SigmaScan Pro 5”, se hicieron 50 mediciones dentro de un rectángulo de las mismas dimensiones, y se obtuvo un promedio de tamaño de grano. El procedimiento anterior se realizó para las tres condiciones de soldadura con, y sin interacción electromagnética. La medición se realizó en las tres condiciones en la ZAT de la parte superior de la soldadura.

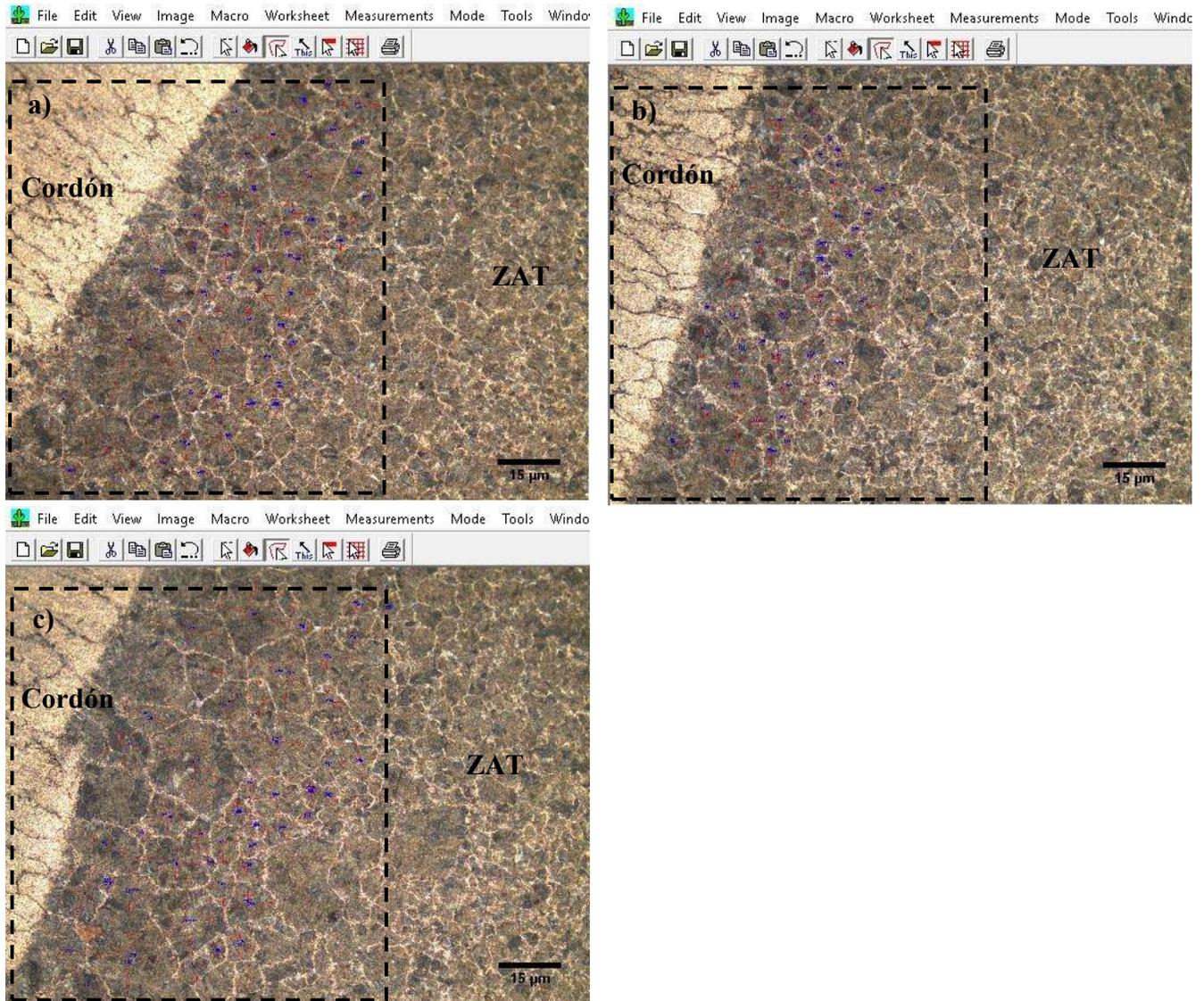


Figura 4.23 a) Soldadura sin interacción electromagnética. b) Soldadura con interacción 3.4 mT.
c) Soldadura con interacción de 4.3 mT.

La imagen 4.23 muestra el área y los granos que se midieron en la zona afectada térmicamente de cada condición de soldadura. Los resultados del promedio de tamaño de grano son los siguientes, →Soldadura sin interacción electromagnética, 9.109 μm ; con interacción de 3.4 mT, 7.714 μm ; y la soldadura con interacción de 4.3 mT, 9.47 μm .

El menor promedio de tamaño de grano fue en la soldadura con interacción electromagnética de 3.4 mT.

A continuación, la imagen 4.24 muestra los granos que fueron medidos en la ZAT, pero ahora ubicada en la zona central de la soldadura.

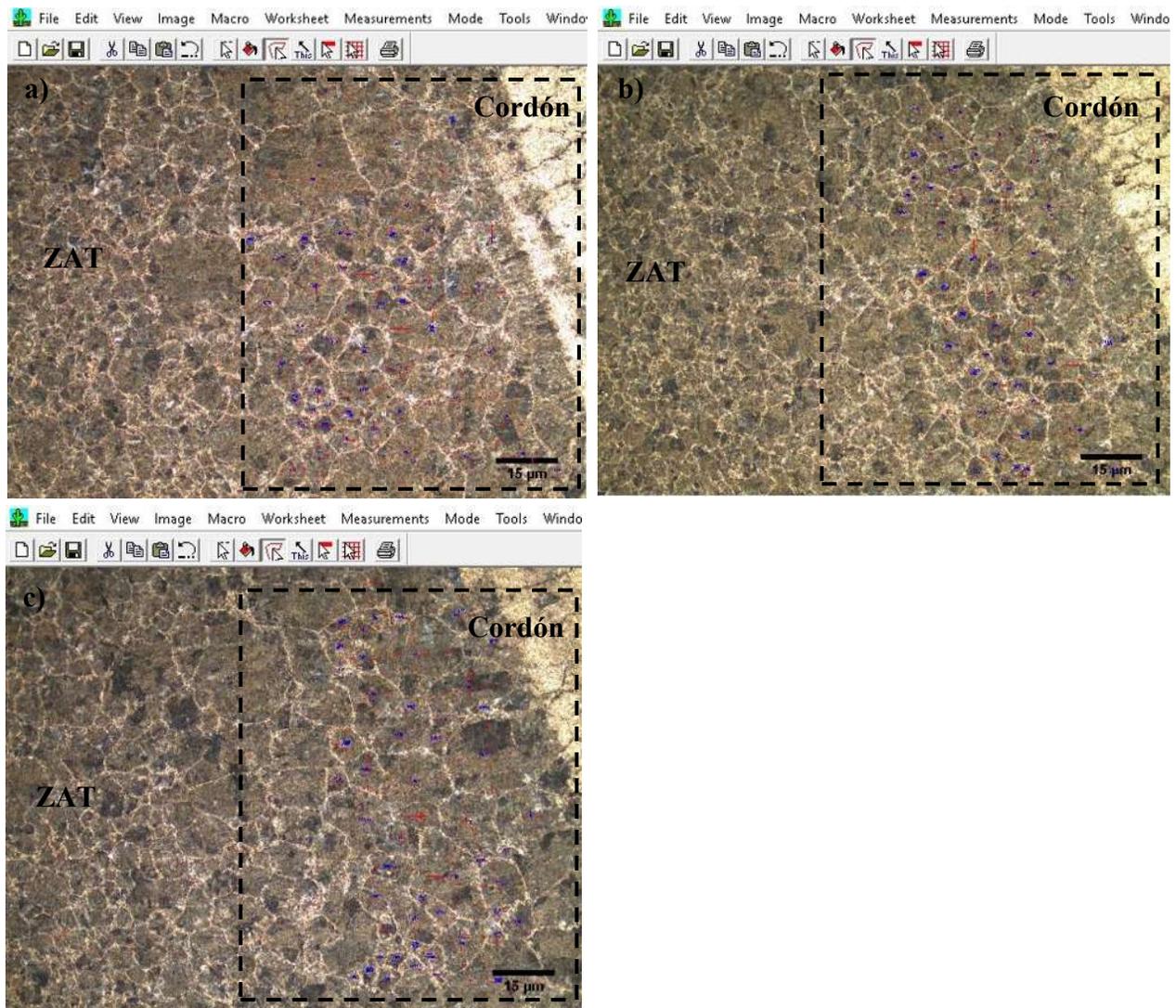


Figura 4.24 a) Soldadura sin interacción electromagnética. b) Soldadura con interacción 3.4 mT.
c) Soldadura con interacción de 4.3 mT.

En las micrografías anteriores aparentemente el tamaño de grano es igual en las tres condiciones, sin embargo, si se observa un poco más minuciosamente, se puede observar que ligeramente se refina el grano en las soldaduras con interacción electromagnética.

Los resultados del tamaño promedio de grano en la zona afectada térmicamente ubicada en la parte central izquierda (transversalmente) de las uniones, son las siguientes:

→ Soldadura sin interacción electromagnética, $10.127\ \mu\text{m}$; con interacción de $3.4\ \text{mT}$, $8.41\ \mu\text{m}$; y la soldadura con interacción de $4.3\ \text{mT}$, $8.49\ \mu\text{m}$.

Por último, se compararon los promedios del tamaño de grano de las mismas condiciones, pero ahora en la zona afectada térmicamente ubicada en la parte inferior derecha (transversalmente, de cada condición de soldadura).

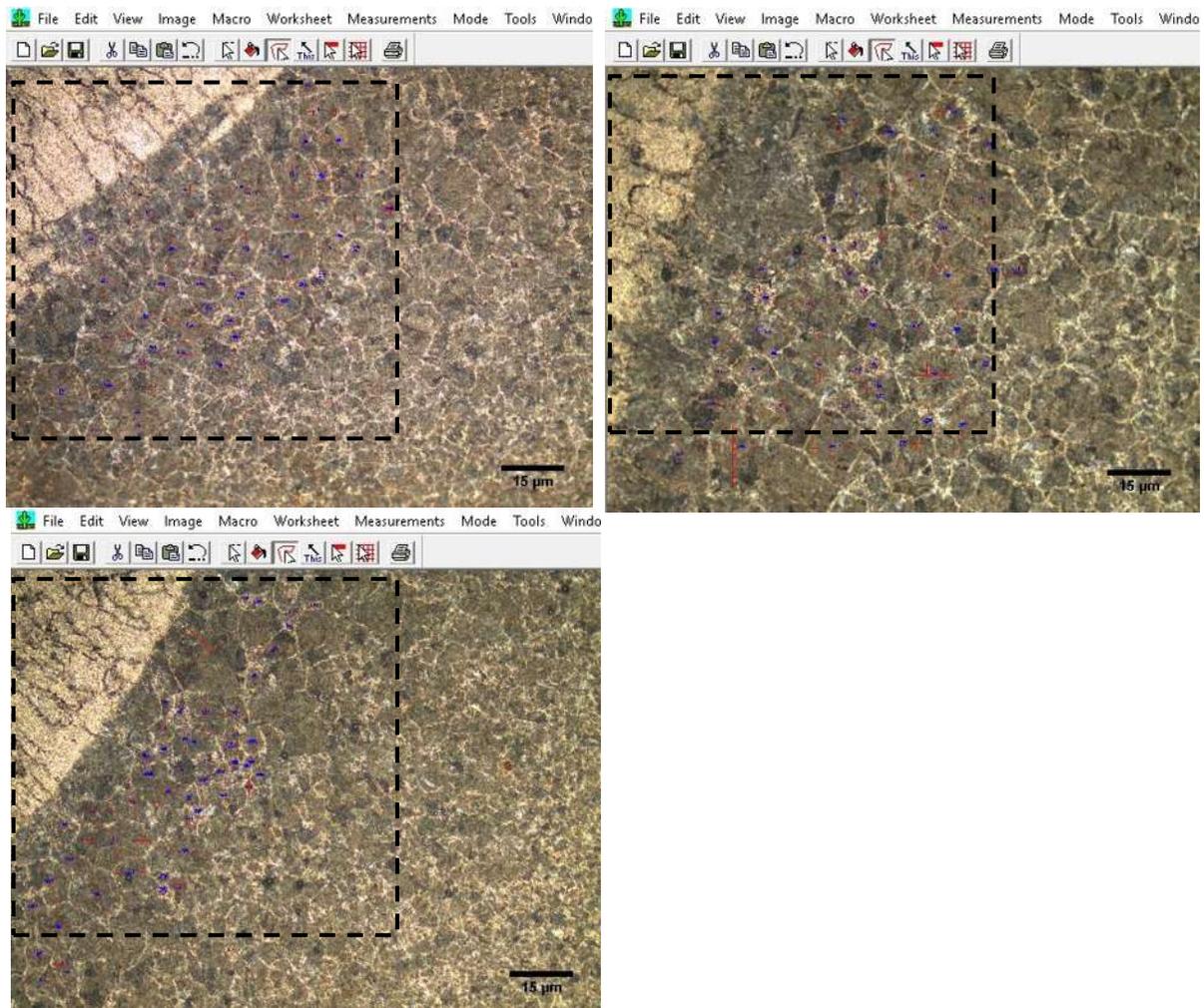


Figura 4.25 a) Soldadura sin interacción electromagnética. b) Soldadura con interacción $3.4\ \text{mT}$.
c) Soldadura con interacción de $4.3\ \text{mT}$.

La figura 4.25 muestra el área donde fueron medidos los granos para obtener el promedio. Los resultados fueron:

→Soldadura sin interacción electromagnética, 8.983 μm ; con interacción de 3.4 mT, 10.460 μm ; y la soldadura con interacción de 4.3 mT, 6.627 μm .

En este caso la soldadura con mayor interacción electromagnética tuvo el menor promedio de tamaño de grano en la zona afectada térmicamente de la zona inferior derecha del cordón vista transversalmente.

No se puede decir que el tamaño de grano es proporcional directa o inversamente a la soldadura con interacción electromagnética, ya que los resultados no siguen un patrón o un comportamiento predecible.

4.2 Perfiles de microdureza

4.2.1 Perfiles de microdureza de metal base

Los valores de microdureza obtenidos de la muestra de metal base, se muestran en la figura 4.26

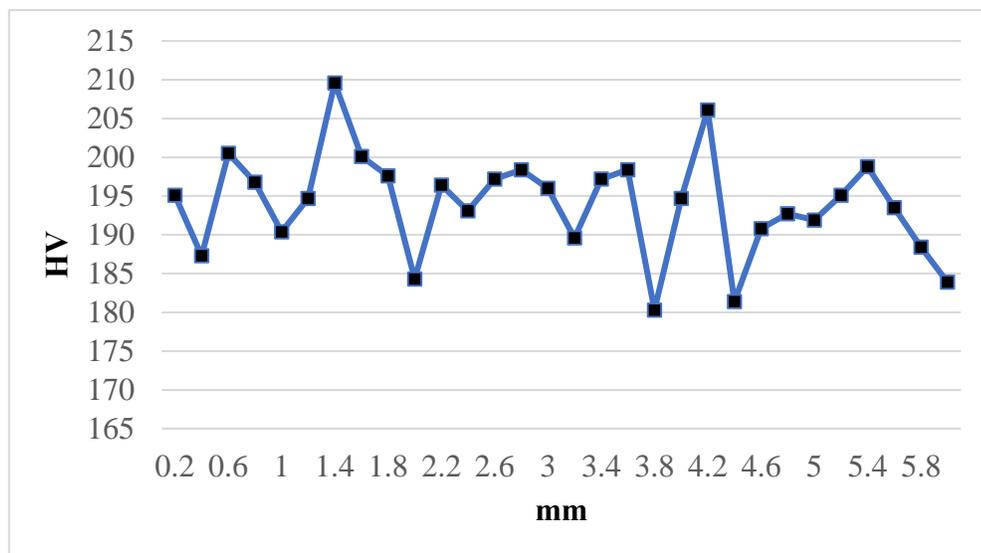


Figura 4.26 Perfil de microdureza del metal base

El valor de microdureza mínimo fue de 180 Vickers, y el máximo fue de 210 Vickers.

El promedio fue de 194 HV.

Estos valores de microdureza obtenidos, se deben a que el material está formado por una matriz ferrítica-perlítica, los cuales arrojan valores de microdureza por debajo de aceros aleados y de alto carbono.

De acuerdo a las aplicaciones para las que se usa este tipo de acero AISI 1045, que son principalmente elementos de transmisión de movimiento, no se necesitan valores altos de dureza, ya que esta propiedad no juega un papel fundamental en esas tareas.

4.2.2 Pruebas de microdureza de soldaduras de varias pasadas

Los perfiles de microdureza se obtuvieron iniciando, desde un extremo de la muestra donde se ubica el metal base, después a través de la zona afectada térmicamente, el cordón de soldadura, la siguiente zona afectada térmicamente y hasta llegar al metal base nuevamente que se encuentra en el extremo opuesto de la muestra.

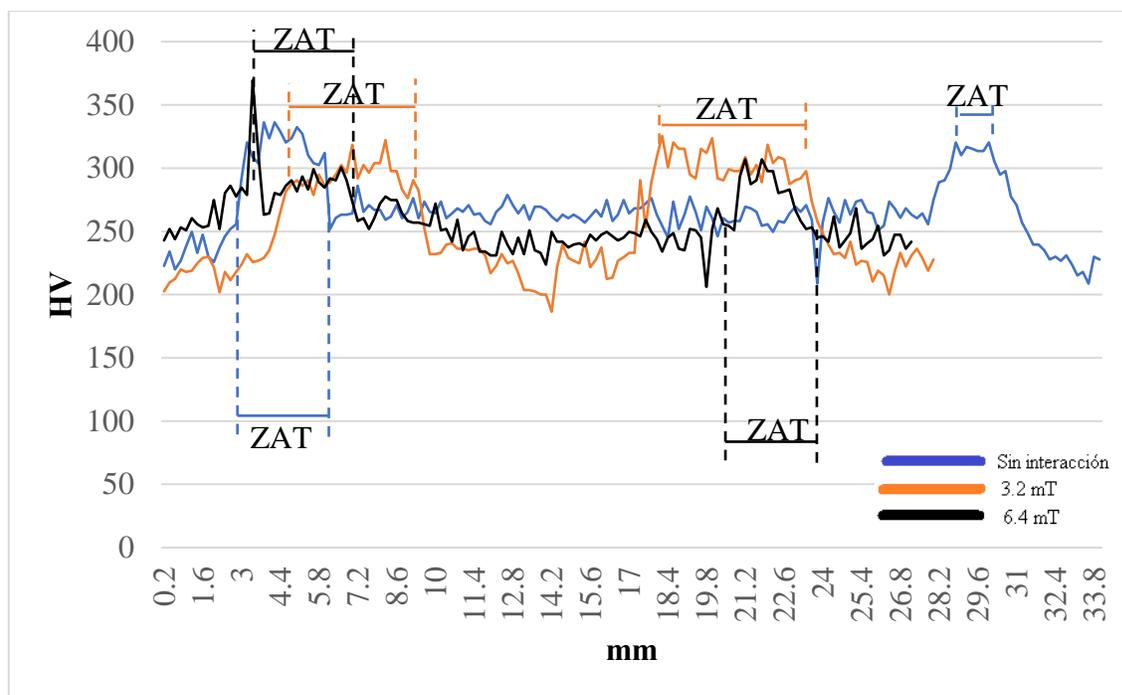


Figura 4.27 Perfil de microdureza de la parte superior de las muestras.

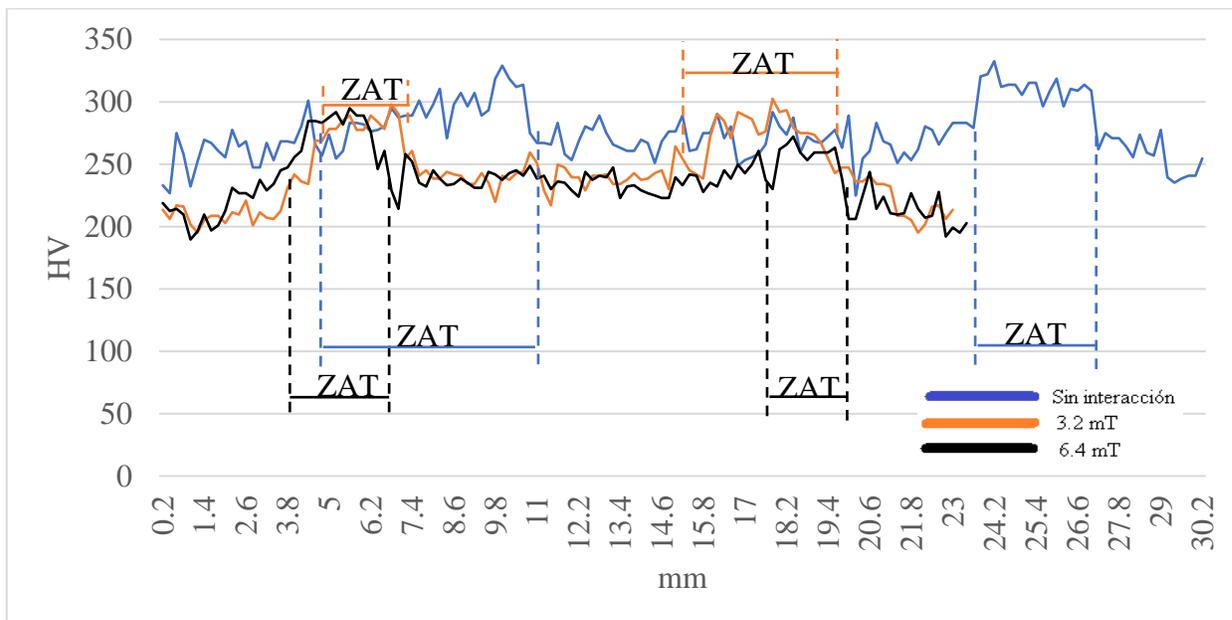
La figura 4.27 muestra el perfil de microdureza, que se realizó en la parte superior de las muestras.

Se hicieron tres barridos, de forma transversal en la parte superior, en la parte central y en la parte inferior del cordón. Para obtener un perfil completo de microdureza de la pieza.

La microdureza es la resistencia que tiene un material a la indentación superficial, por lo que, de acuerdo a la gráfica anterior, los valores más altos de microdureza se registran en la zona afectada térmicamente en todos los casos, esa zona es como si hubiera recibido un tratamiento térmico de temple, ya que durante el proceso de soldadura se alcanzan temperaturas altas y se enfría rápidamente al aire, permitiendo que esa zona adquiera dureza, pero frágil y poco dúctil.

También se puede observar en los perfiles de microdureza es que la ZAT varía en el ancho debido a la condición utilizada durante la soldadura, sobre todo la aplicación o no de la interacción electromagnética.

A continuación, la figura 4.28 muestra el perfil de microdureza obtenido de la zona central del cordón, para las tres condiciones diferentes de soldadura.



4.28 Perfil de microdureza de la parte central de las muestras.

De igual manera los valores más altos de microdureza son en la zona afectada térmicamente, seguido del cordón y después el metal base. En la soldadura con interacción de 6.4 mT, los valores de microdureza son ligeramente menores que en las otras dos condiciones.

Ahora en la figura 4.29, se muestra la gráfica del barrido inferior que se realizó a las muestras con las tres diferentes condiciones.

En el eje de las Y, se indican los valores de microdureza en escala Vickers, y en el eje de las X, es la distancia en milímetros.

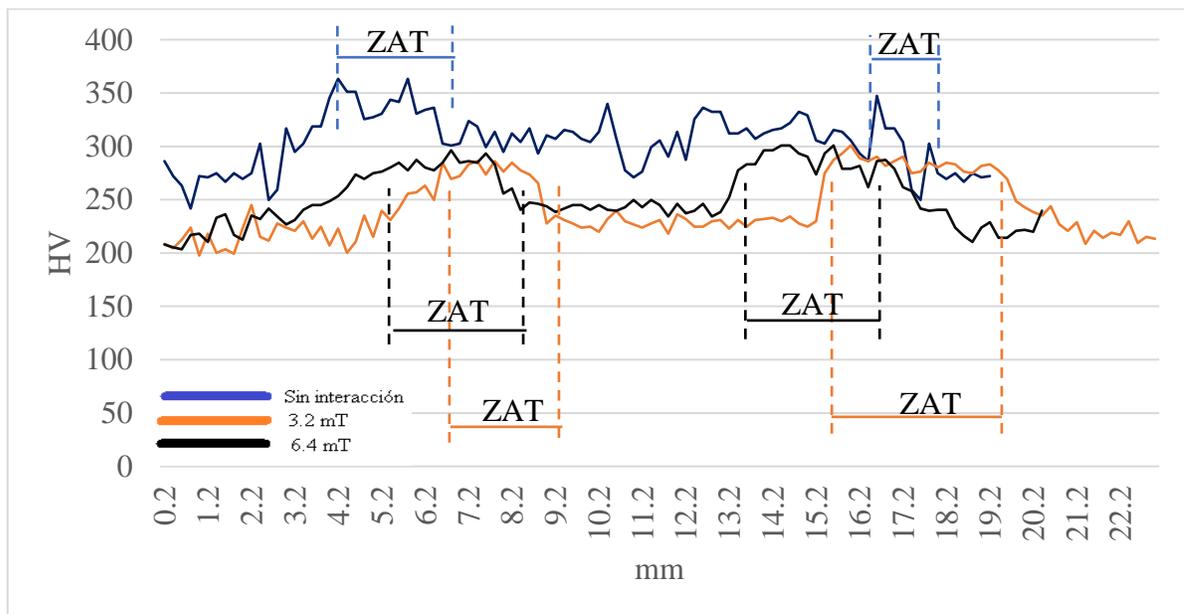


Figura 4.29 Perfil de microdureza de la parte inferior de las muestras

Los valores de microdureza en la zona afectada térmicamente, fueron menores en la muestra con soldadura con interacción electromagnética de 6.3 miliTeslas de intensidad.

4.2.3 Pruebas de microdureza de soldaduras de una pasada

Los perfiles de microdureza en las muestras soldadas con una sola pasada, también se obtuvieron en las zonas superior, central e inferior de las soldaduras. Las indentaciones se hicieron cada 200 micras, para tener información suficiente del comportamiento en microdureza en ambas zonas

afectadas térmicamente, cordón y zonas de transición. Lo anterior se hizo para cada condición de soldadura con y sin interacción electromagnética.

La figura 4.30 muestra el perfil de microdureza obtenido en la parte superior (transversalmente) de las soldaduras.

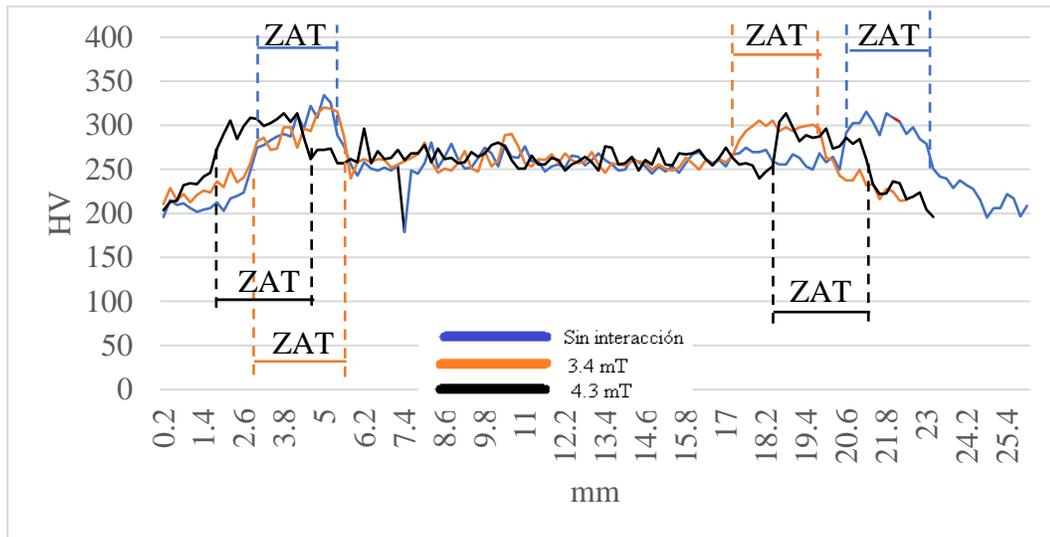


Figura 4.30 Perfil de microdureza de la parte superior de las muestras.

Los valores de microdureza en la zona afectada térmicamente en las tres gráficas, son muy similares, hay muy poca variación de una respecto a otra. A continuación la figura 4.31 muestra el perfil de microdureza de las soldaduras en la parte central (transversalmente), de cada una de ellas.

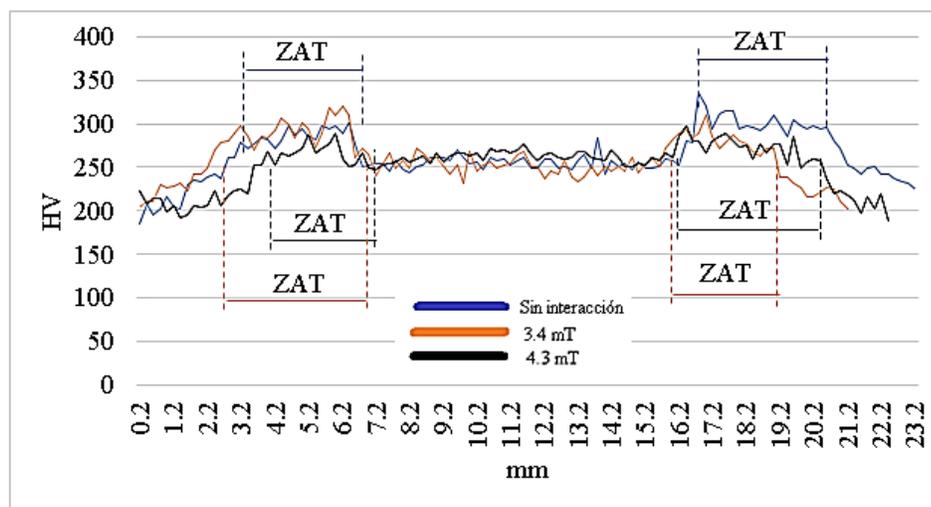


Figura 4.31 Perfil de microdureza de la parte central de las muestras.

En esta zona central de la muestra, en algunos puntos la soldadura con interacción de 6.4 mT, fue ligeramente menor en la zona afectada térmicamente.

Por último, la figura 4.32 muestra los perfiles de microdureza en la parte inferior (transversalmente), en las muestras.

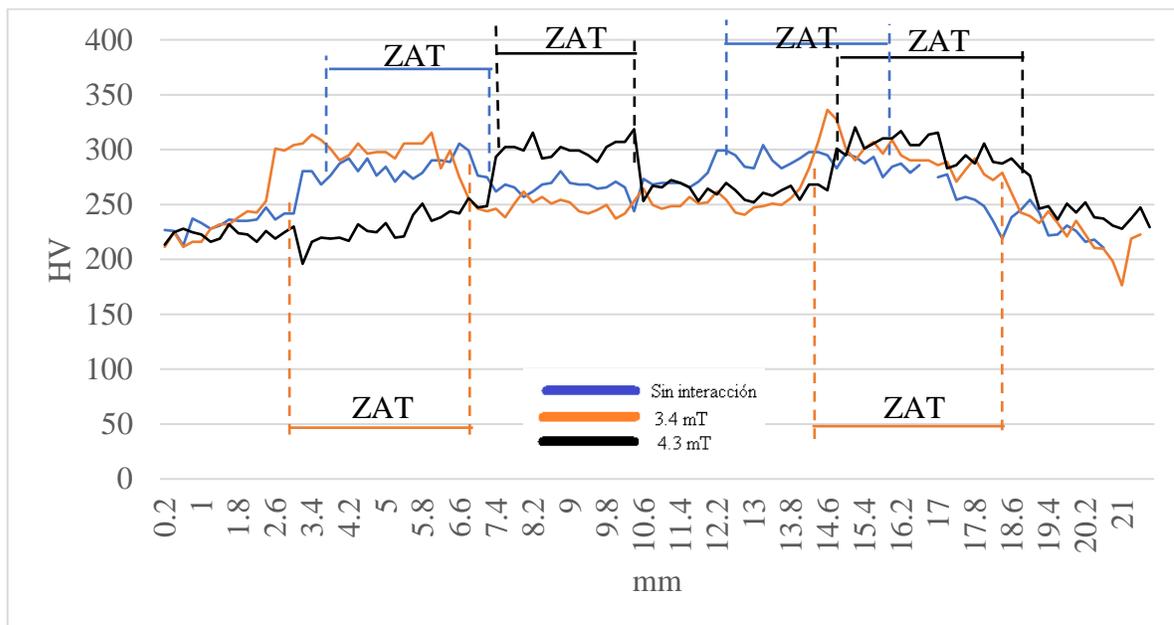


Figura 4.32 Perfil de microdureza en la parte inferior de las muestras.

En las gráficas podemos observar que, en este caso, la soldadura sin interacción electromagnética tiene los valores de microdureza ligeramente por debajo que las otras dos condiciones.

En todos los perfiles de microdureza, los valores más altos que se registraron, siempre fue en la zona afectada térmicamente.

También es posible observar un ligero cambio en la longitud de ancho en la ZAT, cuando se aplica el campo electromagnético de menor intensidad, se puede apreciar ligeramente que disminuye lo ancho, ya que la región donde la dureza aumenta (que corresponde a la ZAT), es más amplia. En el caso de la interacción electromagnética de mayor intensidad, se puede observar que lo ancho de la ZAT vuelve a aumentar incluso aún más que en las uniones soldadas sin campo electromagnético.

4.3 Resultados de pruebas de impacto Charpy

4.3.1 Metal base

Los resultados de las pruebas de impacto del metal base se muestran en la figura 4.33.

Las primeras dos probetas nos arrojaron el mismo valor de energía absorbida, que fue de 16 Joules, en la tercera probeta, el valor fue 11 Joules.

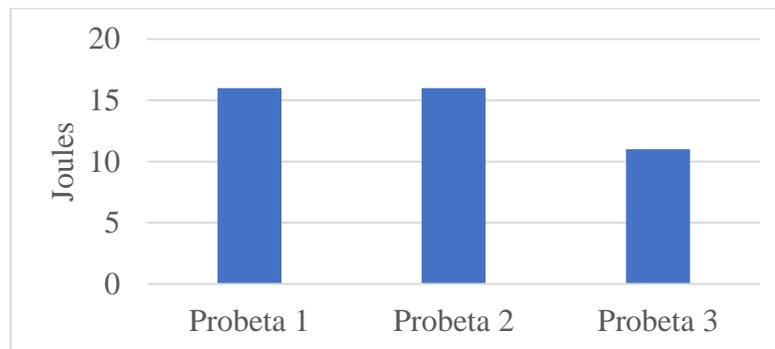


Figura 4.33 Gráfica que indica los valores de energía absorbida en las probetas Charpy

Debido a que la tenacidad es la capacidad de absorber energía, los resultados de este ensayo son expresados en Joules, y comparando los valores obtenidos en este ensayo con los valores reportados en otros tipos de aceros (aleados, tratados térmicamente, etc.) se podría decir que este acero AISI 1045 presenta una tenacidad baja.

La tabla 4.1 muestra también los valores de energía absorbida de estas probetas.

Tabla 4.1 Valores de energía absorbida en probetas de metal base.

Probeta	Energía absorbida (J)
1	16.5
2	11
3	11

4.3.2 Pruebas de impacto Charpy de soldadura de múltiples pasadas

En este caso se fabricaron tres probetas de cada condición de soldadura, es decir, para la soldadura sin interacción electromagnética, y las soldaduras con interacción electromagnética.

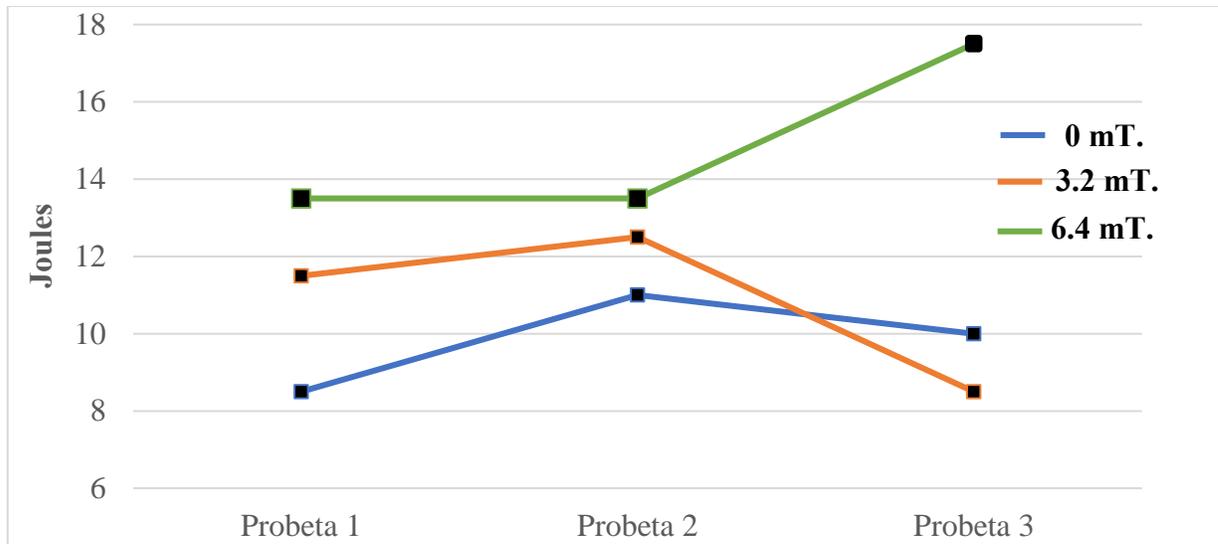


Figura 4.34 Gráfica que indica los valores de energía absorbida en las probetas Charpy

Los valores medidos por la máquina de ensayo Charpy, nos arrojó los datos de energía absorbida que se muestran en la figura 4.34.

Los valores mostrados en la gráfica anterior se encuentran a continuación en forma de tabla.

Tabla 4.2 Valores de energía absorbida, probetas con soldadura de múltiples pasadas.

	Energía absorbida (J)		
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3
Sin interacción	8.5	11	10
3.2 mT	11.5	12.5	8.5
6.4 mT	13.5	11.5	17.5

La tenacidad en la zona afectada térmicamente de aceros de medio y alto carbono, es baja, debido a la presencia de perlita en esa zona, que es una microestructura que se caracteriza por su fragilidad y baja tenacidad. Las probetas en este ensayo se fracturaron completamente, partiéndose en dos partes cada una. Lo cual indica que no fueron capaces de absorber cantidad considerable de energía.

Como podemos observar, no hay gran diferencia entre la cantidad de energía absorbida de las diferentes condiciones de las probetas, ya que solo hay variación de pocas unidades en Joules de uno respecto a otro. Aun así, con muy poca diferencia, las probetas con interacción

electromagnética de 6.4 mT, fueron las que absorbieron más energía, y las de sin interacción absorbieron menos energía.

4.3.3 Pruebas de impacto Charpy de soldadura de una pasada

En cuanto a las probetas de impacto Charpy que fueron soldadas con una sola pasada, la figura 4.28 muestra los valores de energía absorbida de cada probeta.

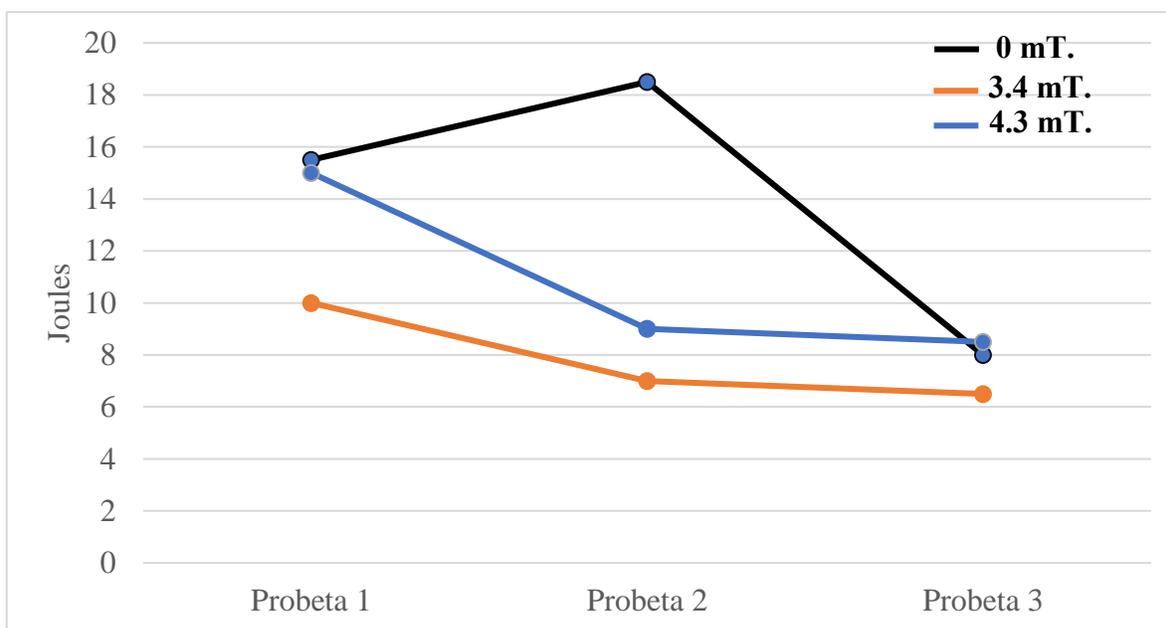


Figura 4.35 Gráfica que indica los valores de energía absorbida en las probetas Charpy

Los valores graficados en la figura anterior se muestran a continuación en forma de tabla.

Tabla 4.3 Valores de energía absorbida, probetas con soldadura de una sola pasada.

	Energía absorbida (J)		
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3
Sin interacción	15.5	18.5	8
3.4 mT	10	7	6.5
4.3 mT	15	9	8.5

Al llevar a cabo los ensayos, todas las piezas se fracturaron completamente y se partieron en dos, esto quiere decir que el tipo de fractura es frágil, y al observar los valores de tenacidad también nos indica lo mismo, una fractura frágil en esta zona.

Es importante mencionar también, que el material en esta zona (ZAT), tiene una baja tenacidad debido al tamaño de grano que se presenta, el cual es burdo, lo cual baja considerablemente la propiedad mecánica de la unión.

4.4 Análisis de los ensayos de tensión.

Todos los ensayos de tensión fueron llevados a cabo a una velocidad de 6 mm/min. Se obtuvieron las gráficas esfuerzo-deformación, donde se pueden observar las diferentes zonas de comportamiento del material.

4.4.1 Ensayo de tensión metal base.

Se fabricaron tres probetas para tensión, con el material base AISI 1045, donde a continuación la figura 4.36 muestra las gráficas obtenidas.

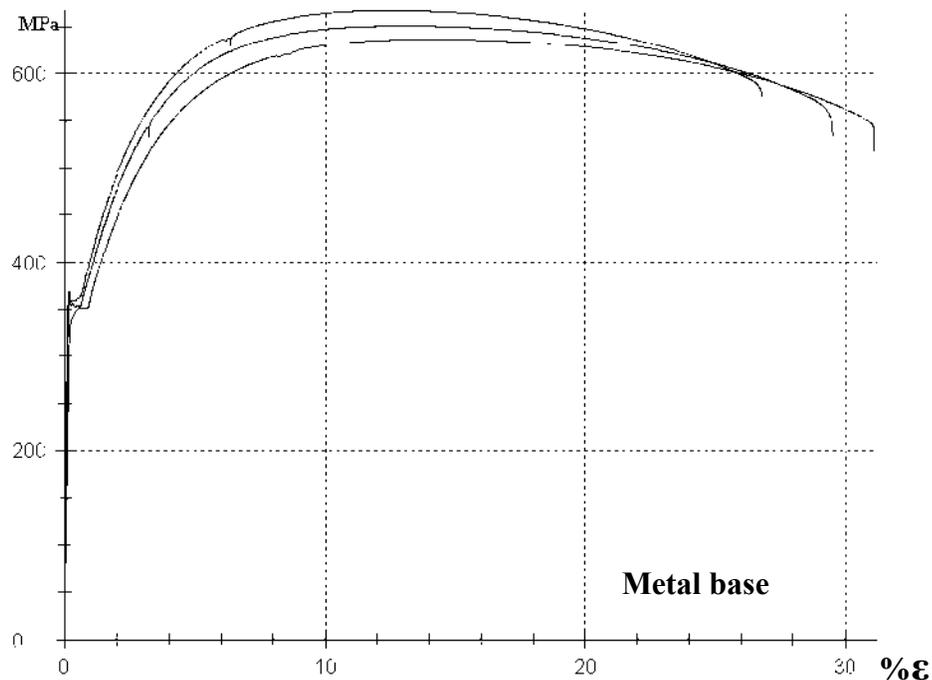


Figura 4.36 Gráfica esfuerzo-deformación de metal base.

Las tres gráficas muestran un límite elástico de entre 350 y 360 MPa. A partir de ahí el material se empieza a deformar plásticamente, hasta llegar a su esfuerzo máximo que está entre 630 y 670 MPa aproximadamente, a partir de ahí se formó el cuello en el material y siguió deformando hasta la fractura.

4.4.2 Ensayo de tensión en soldadura de múltiples pasadas.

Las probetas de tensión se maquinaron con una muesca donde está ubicada la zona afectada térmicamente, esto con el propósito de concentrar en esa zona los esfuerzos, y que la fractura se propague a través de la ZAT, que es la zona de estudio central de este proyecto. Para poder comparar su comportamiento mecánico bajo esfuerzos de tensión.

A continuación, se muestra en la figura 4.37 las curvas del diagrama esfuerzo-deformación de las probetas que fueron fabricadas con la unión de soldadura sin interacción electromagnética.

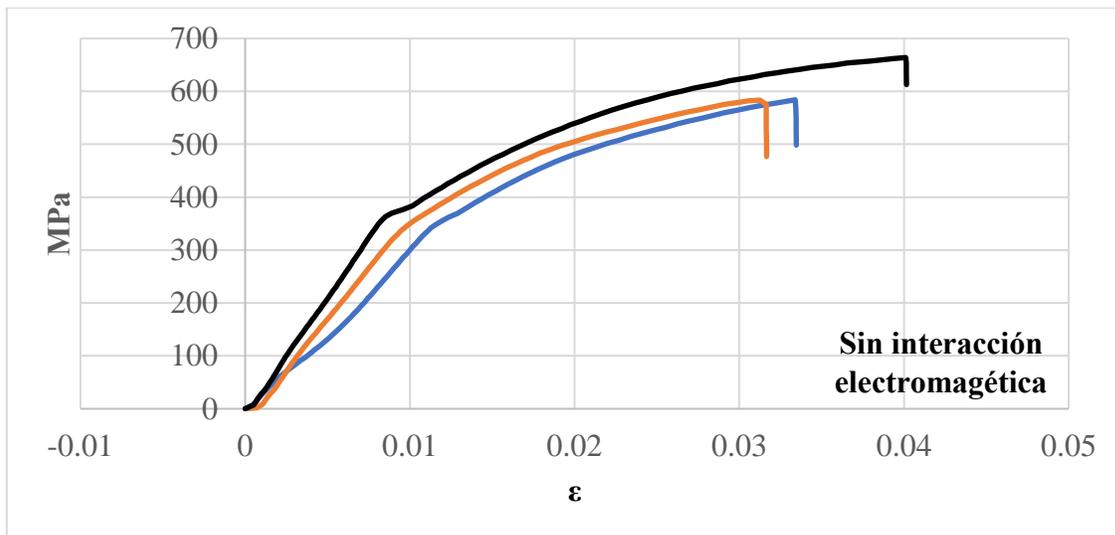


Figura 4.37 Diagrama esfuerzo-deformación de soldadura sin interacción electromagnética.

Las tres curvas anteriores muestran un límite elástico de aproximadamente 350 MPa, a partir de ahí las uniones siguieron deformándose, y dos de ellas alcanzaron un esfuerzo máximo de aproximadamente 590 MPa, y la restante alcanzó un esfuerzo máximo de 670 MPa, aproximadamente.

Analizando el comportamiento de las curvas, de acuerdo a su pendiente y que son en cierta forma horizontal después del límite elástico, se puede decir que tienen un comportamiento intermedio entre dúctil y frágil. Si definimos la ductilidad como la capacidad de un material para ser deformado, y la fragilidad la definimos como un material que no se deforma plásticamente.

Lo anterior es resultado de que, en la zona afectada térmicamente, las microestructuras presentes (principalmente martensita) no favorecen buenas propiedades mecánicas, y el tamaño de grano burdo, también es factor que impide buena propiedad mecánica en esta zona afectada por el calor.

A continuación, en la figura 4.38 se muestran las curvas del ensayo de tensión, de las uniones soldadas con interacción electromagnética de 3.2 mT.

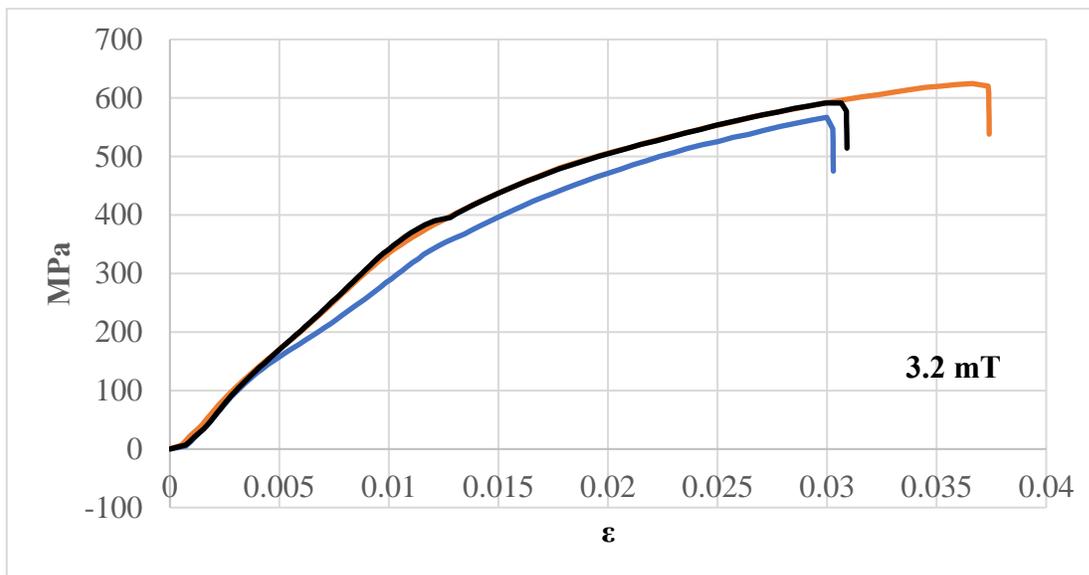


Figura 4.38 Diagrama esfuerzo-deformación de soldadura con interacción de 3.2 mT.

Las curvas de la figura anterior muestran un límite elástico de entre 350 y 390 MPa, después el material siguió deformándose en cada muestra, hasta alcanzar un esfuerzo máximo de entre 570 y 620 MPa, antes de llegar al punto de fractura.

En las curvas también se puede observar que la pendiente que corresponde a la zona de deformación elástica, tiene menos ángulo de inclinación que las curvas de las muestras soldadas sin interacción electromagnética.

La cantidad de deformación hasta que el material llega a su punto de fractura es similar a las uniones soldadas sin interacción electromagnética.

Así como también el límite elástico y el esfuerzo máximo alcanzado, son similares a los valores de las uniones sin interacción electromagnética.

Por último, en la figura 4.39 también se muestra la gráfica que contiene las curvas de las uniones soldadas con interacción electromagnética.

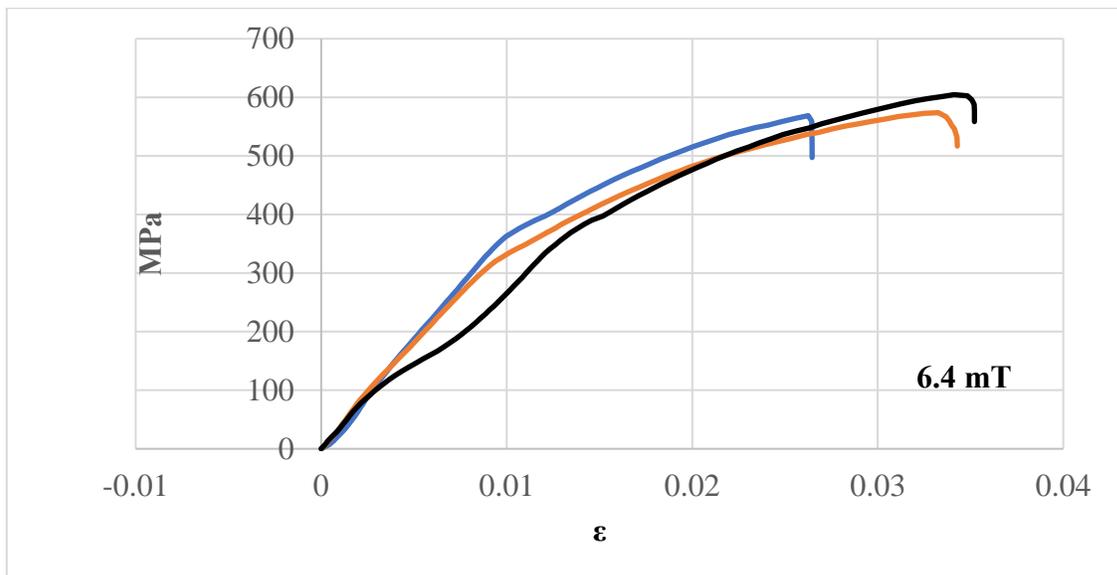


Figura 4.39 Diagrama esfuerzo-deformación de soldadura con interacción de 6.4 mT.

Se puede observar que las curvas muestran un límite elástico de aproximadamente 350 MPa, antes de que el material empiece a deformarse plásticamente. También se puede ver, que el esfuerzo máximo alcanzado está entre 570 y 610 MPa, para después llegar al punto de fractura.

Si comparamos estos valores mencionados, con los valores de la soldadura con interacción de 6.4 mT, se puede concluir que no hay diferencia considerable entre una condición y otra.

4.4.3 Ensayo de tensión en soldadura de una pasada.

El ensayo de tensión para soldadura de una pasada, también se hizo con una velocidad de 6 mm/min. Así como también las probetas se maquinaron con muescas que corresponden a la

ubicación de la zona afectada térmicamente, para que los esfuerzos se concentraran en esa parte y la pieza fracturara ahí, y evitar que la fractura se diera en el metal base o en el cordón de soldadura.

Las curvas del diagrama esfuerzo-deformación para las probetas con soldadura sin interacción electromagnética se muestran en la figura 4.40. Es importante mencionar que efectivamente la fractura se dio a través de la zona afectada térmicamente en cada pieza.

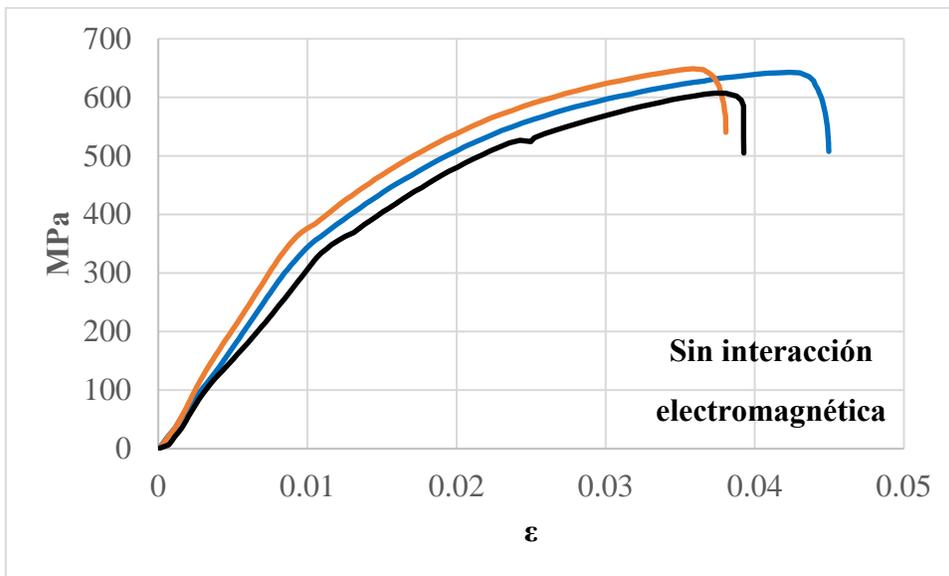


Figura 4.40 Diagrama esfuerzo-deformación de soldadura sin interacción electromagnética.

Podemos observar que el límite elástico en las tres curvas es de 350 MPa, después se alcanza un esfuerzo máximo de 600 a 650 MPa, para finalmente llegar a la fractura. A continuación, en la figura 4.41 se muestra el diagrama esfuerzo-deformación para las probetas con soldadura con interacción de 3.4 mT.

En este caso las curvas en esta unión muestran que el límite elástico es de 380 MPa, y el esfuerzo máximo alcanzado es de 650 MPa. Ambos valores son similares a la condición anterior de soldadura sin interacción electromagnética. También la cantidad de deformación que sufrieron las probetas son muy similares.

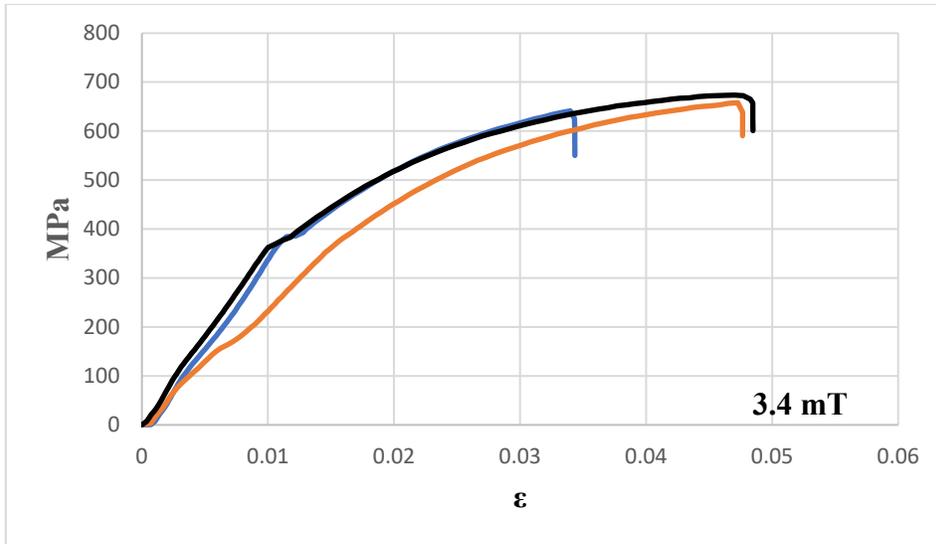


Figura 4.41 Diagrama esfuerzo-deformación de soldadura con interacción de 3.4 mT.

Finalmente, la figura 4.42 muestra el diagrama esfuerzo-deformación de las curvas generadas por las uniones que fueron soldadas con interacción electromagnética de 4.3 mT.

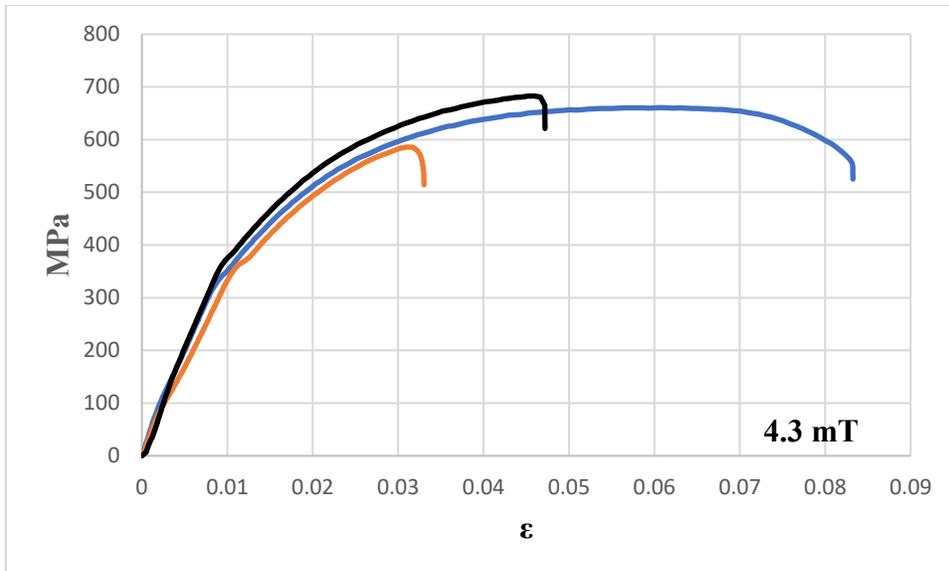


Figura 4.42 Diagrama esfuerzo-deformación de soldadura con interacción de 4.3 mT.

El límite elástico mostrado por las tres curvas es de 350 MPa, después muestra una deformación plástica, donde una curva alcanzó un esfuerzo máximo de 600 MPa, otra curva 650 MPa, y la restante alcanzó 690 MPa de esfuerzo máximo. La muestra que alcanzó los 650 MPa fue la probeta

que se deformó más que las otras dos, ya que se deformó plásticamente el doble en comparación que las otras.

Podemos concluir que las diferentes condiciones de soldadura no influyeron notablemente para cambiar el comportamiento de la unión bajo las diferentes cargas de tensión. Los valores de límite elástico y esfuerzo máximo fueron en promedio los mismos en las diferentes condiciones, así como la cantidad de deformación plástica no varió de manera drástica.

4.5 Análisis MEB, soldadura de una sola pasada.

4.5.1 Imágenes MEB en la ZAT.

Las siguientes imágenes fueron tomadas con microscopía electrónica de barrido, en la zona afectada térmicamente, se puede ver a gran detalle la morfología dentro de los granos austeníticos.

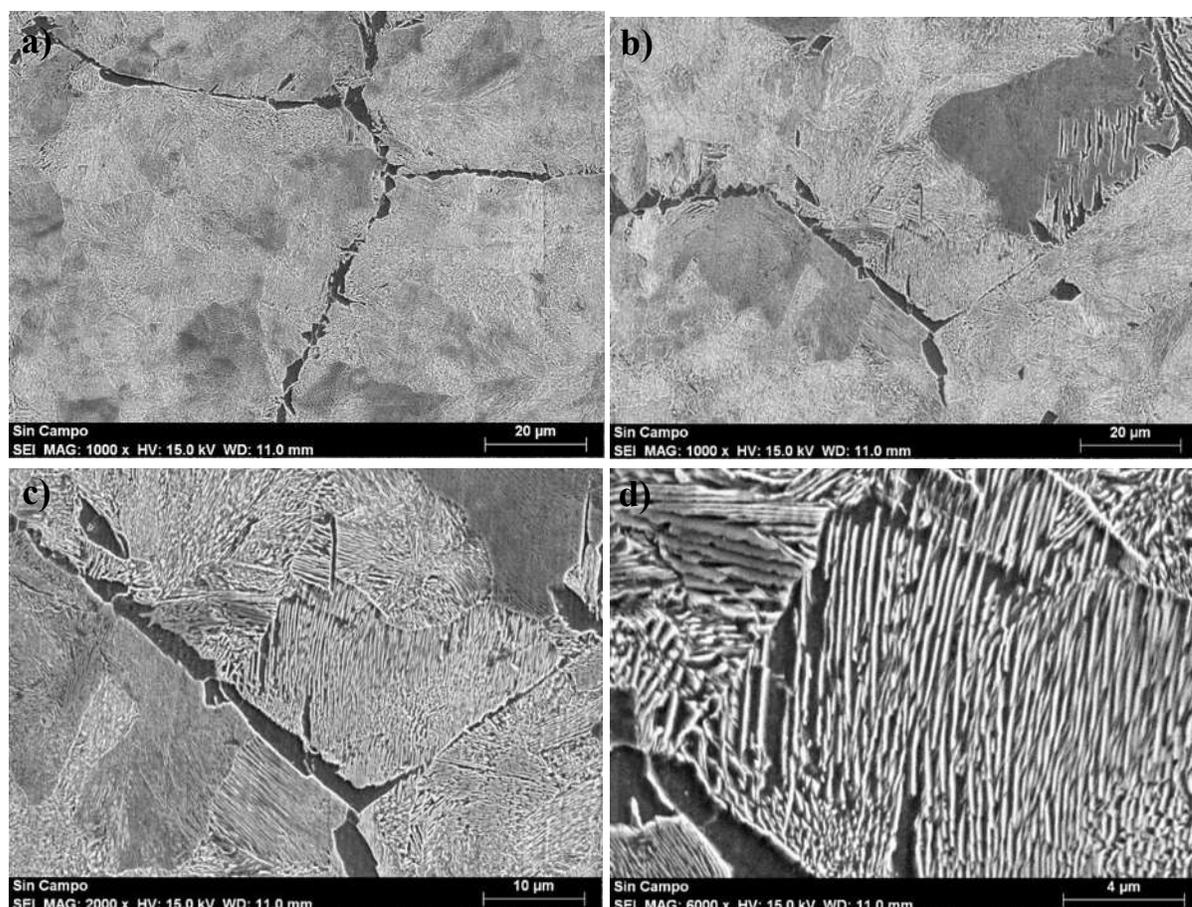


Figura 4.43 Imágenes MEB en la ZAT, soldadura sin interacción electromagnética.

La figura anterior 4.43 muestra las imágenes obtenidas en la zona afectada térmicamente. En las imágenes se puede apreciar perfectamente el límite de grano que delimita el grano austenítico, este límite de grano está formado por ferrita proeutectoide. Al interior del grano se pueden observar agujas finas, que corresponden a la perlita, que contiene carburos de Fe_3C muy finos.

La siguiente figura 4.44, muestra las imágenes que fueron obtenidas en la zona afectada térmicamente de la muestra que fue soldada con una interacción electromagnética de 3.4 mT.

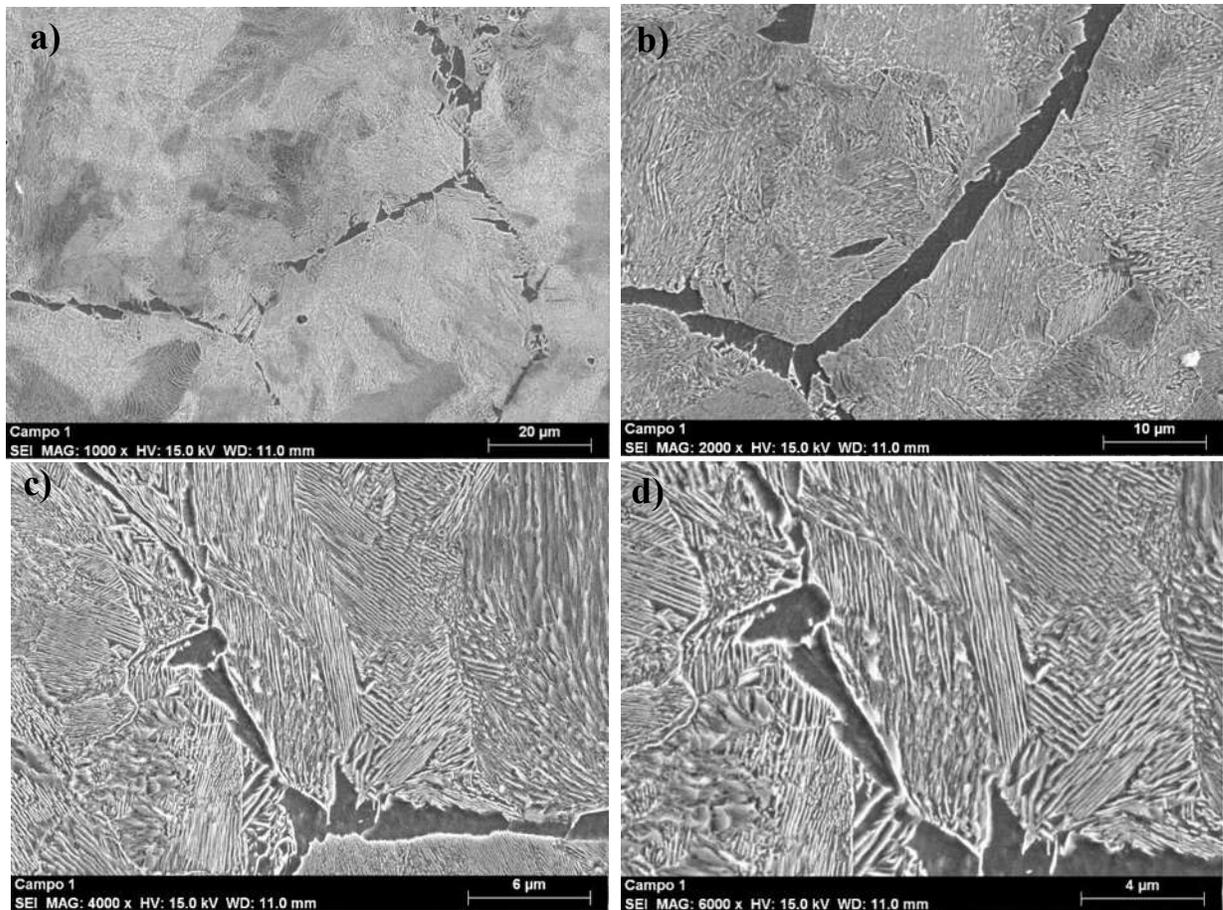


Figura 4.44 Imágenes MEB en la ZAT, soldadura con interacción de 3.4 mT.

En las imágenes anteriores se puede ver cómo el límite de grano austenítico está muy bien delimitado por la fase ferrita proeutectoide, además, dentro del grano podemos ver agujas orientadas en diferentes direcciones, correspondientes a carburos de Fe_3C [58].

Las imágenes MEB correspondientes a las muestras soldadas con interacción de 4.3 mT, se muestran en la figura 4.45, en la cual muestra cuatro imágenes obtenidas a diferentes aumentos.

En la figura 4.45b) se puede observar que la ferrita que forma el límite de grano, experimentó una especie de fragmentación, dividiéndose en partes más pequeñas.

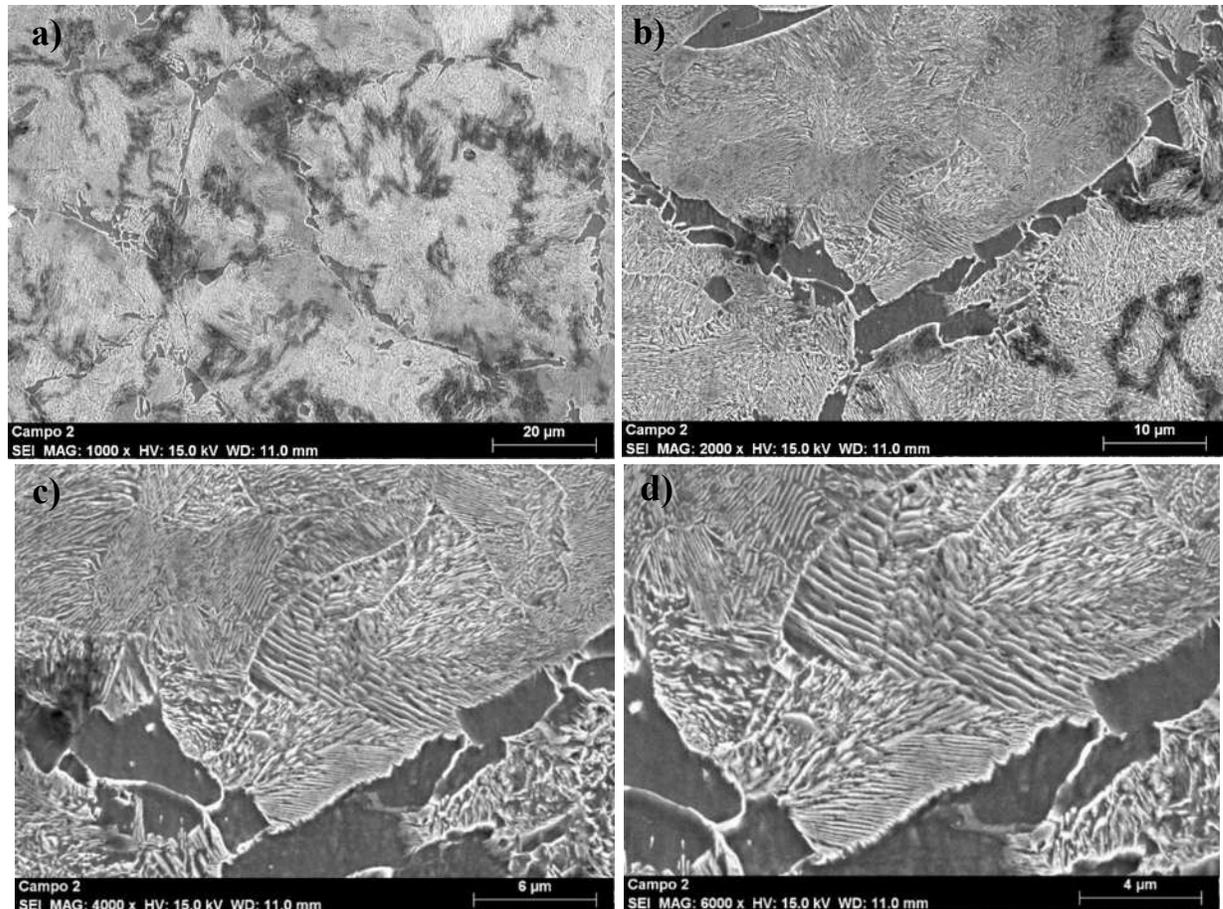


Figura 4.45 Morfología en la ZAT, soldadura con interacción de 4.3 mT.

A su vez, dentro del grano austenítico se pueden apreciar subgranos en forma de agujas finas con diferentes orientaciones. La formación de las finas láminas dentro de los granos de perlita se debe, en todos los casos, a la difusión del carbono que se encuentra en los límites de grano austenítico.

Las microestructuras observadas en la ZAT en las diferentes condiciones de soldadura, son similares, no se observan cambios importantes en forma, tamaño o distribución.

4.5.2 Análisis fractográfico de las pruebas de impacto Charpy.

Las imágenes MEB de la superficie fracturada en las probetas fracturadas de impacto Charpy, se muestran a continuación. La figura 4.46 corresponde a la muestra que fue soldada sin interacción electromagnética.

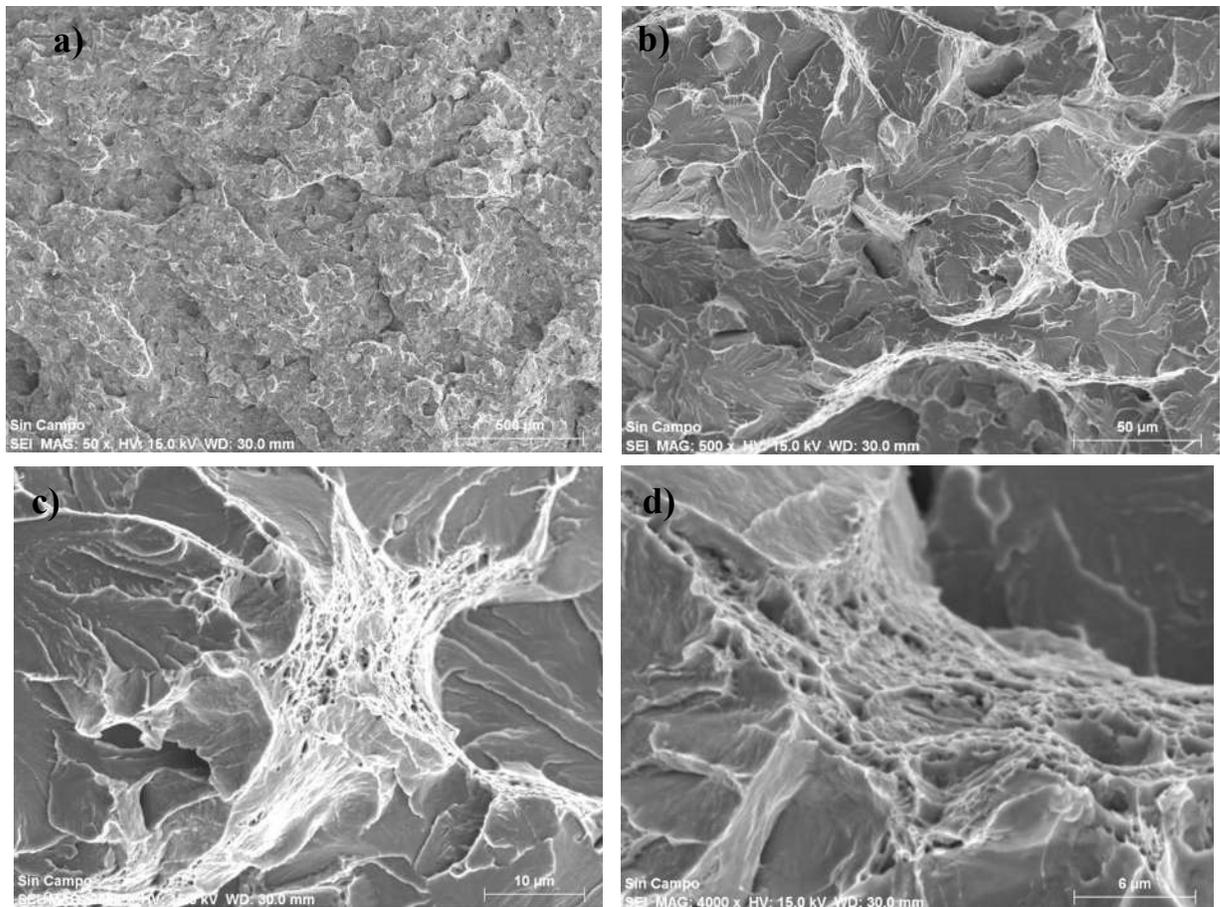


Figura 4.46 Fractografía, prueba de impacto Charpy de soldadura sin interacción electromagnética.

En las imágenes anteriores, se pueden observar gran cantidad tanto de zonas claras, así como de zonas oscuras, lo cual nos indica que, tiene característica de haber fracturado frágilmente en unas zonas, y dúctilmente en otras [59].

Lo anterior se debe a que el acero tiene una composición química de medio carbono, por lo cual la ZAT, no es completamente frágil, ni tampoco tiene una buena ductilidad como la tienen otros materiales.

En las imágenes también es importante mencionar que no se observan inclusiones de fases secundarias o primarias, que pueden propiciar la fractura, y es normal ya que el acero AISI 1045 no tiene elementos de aleación.

A continuación, se muestran las imágenes de la fractura en la muestra soldada con interacción electromagnética de 3.4 mT.

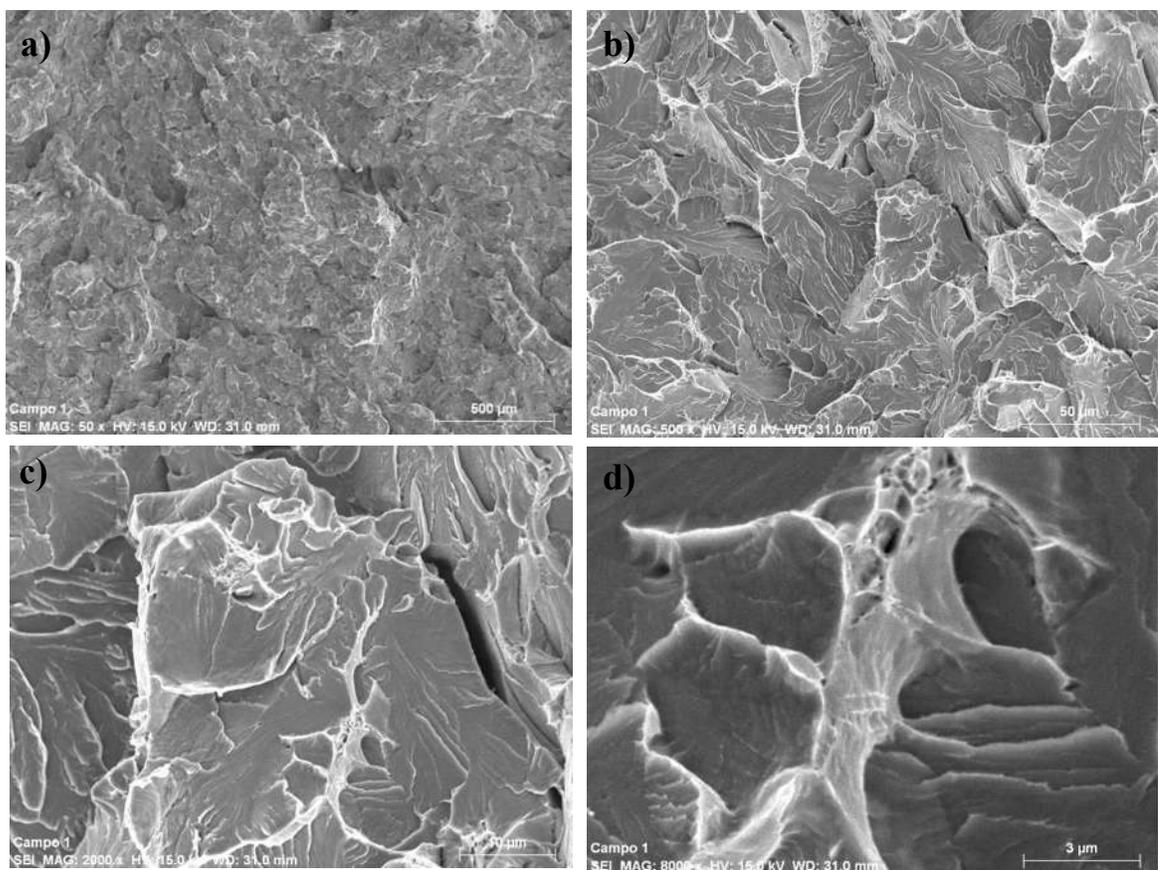


Figura 4.47 Fractografía de ensayo Charpy, soldadura con 3.4 mT de interacción electromagnética.

La fractura muestra zonas frágiles, y también zonas dúctiles. Se observan también micro fisuras en las zonas frágiles.

Como último análisis, en la figura 4.48 se tienen las imágenes de fractografía en las muestras que fueron soldadas con una interacción electromagnética de 4.3 mT.

Cabe mencionar que la fractura en todos los casos fue a través de la zona afectada térmicamente, ya que la muesca que tiene en el centro cada prueba de impacto, se maquinó de tal manera que ahí se ubicara la ZAT de cada soldadura, y así poder hacer la comparación.

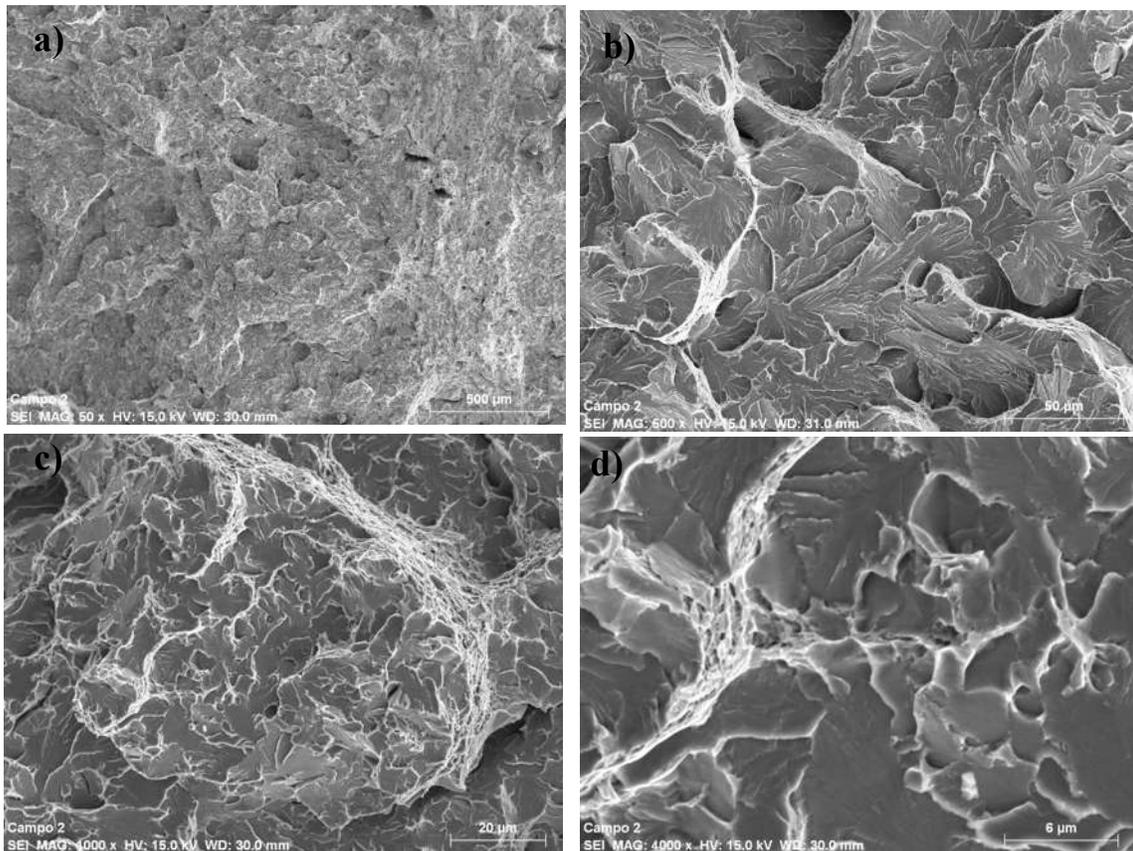


Figura 4.48 Fractografía de ensayo Charpy, de soldadura con interacción de 4.3 mT.

En este caso las imágenes de también muestran zonas con la característica de fractura frágil, así como también zonas características de una fractura dúctil. De igual manera se observan claramente los micro agujeros en las zonas de fractura frágil [60].

Se puede concluir que en todos los casos las imágenes nos revelan una fractura en parte frágil y en parte dúctil.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

1. Desde el punto de vista microestructural, no se observan cambios importantes en cuanto al tipo, la cantidad y morfología de las fases presentes entre las diferentes condiciones de soldadura, tanto en múltiples pasadas y una pasada. Y a su vez con y sin interacción electromagnética.

En cuanto al tamaño de grano austenítico en la ZAT, no se observó un refinamiento de grano en las uniones soldadas con interacción electromagnética como se esperaba. El tamaño de grano no cambia considerablemente entre una condición y otra.

2. Las pruebas de impacto Charpy de las muestras con soldadura de múltiples pasadas, arrojan resultados muy similares en las diferentes condiciones de soldadura, ya que los valores de energía absorbida de unas muestras y otras, es de solo unas pocas unidades de Joules (6.5 a 18.5 J), lo cual no es determinante para mejorar o empeorar la propiedad mecánica.

3. En los valores de microdureza obtenidos en las muestras con soldaduras de varias pasadas, se puede observar que la microdureza disminuyó ligeramente (de 330 a 260 HV), en la zona afectada térmicamente en el caso de la unión soldada con interacción electromagnética de 6.4 mT.

En las muestras de soldadura de una sola pasada, los valores de microdureza en la zona afectada térmicamente, no variaron en gran medida entre una condición y otra.

4. Las imágenes obtenidas de MEB en la zona afectada térmicamente de las uniones de una pasada, muestran la misma morfología y tipo de microestructuras en la ZAT, entre una condición y otra, es decir, no se aprecian cambios importantes.

En el análisis fractográfico, en todas las muestras se tienen puntos que indican tanto una fractura frágil, como una fractura dúctil en baja escala. En la comparación de fractografías de probetas con, y sin interacción electromagnética, no hay cambios claramente visibles, ya que el campo magnético no es capaz de cambiar drásticamente la forma de fractura del material.

Finalmente se concluye que para este tipo de acero AISI 1045, la interacción electromagnética de baja intensidad no fue capaz de modificar el tamaño de grano y la microestructura, y por consiguiente las propiedades mecánicas en la ZAT de las uniones realizadas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Orozco Roldán Francisco Ramón, López Gálvez Cristóbal. *Soldadura en atmósfera natural*. Ediciones Paraninfo, S.A. 2013.
- [2] Giachino Joseph W, Weeks William. *Welding skills and practices*. American Technical Society, Chicago. USA. 2007.
- [3] López Morelos Víctor Hugo, García Marco, García Rafael. *Efecto de la interacción electromagnética de baja intensidad en la microestructura y propiedades mecánicas de soldaduras de acero inoxidable dúplex*. Ingenius. Revista de Ciencia y Tecnología, núm 12. Pp 40-45. 2014.
- [4] Luis B. López Vázquez. *Aceros y fundiciones*. Editorial Club Universitario. 2015
- [5] Vélez Moreno Ligia María. *Materiales industriales. Teoría y aplicaciones* Instituto Tecnológico Metropolitano. Textos Académicos. 2008.
- [6] Callister E D. *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. Editorial. Reverte. 1995.
- [7] DeGarmo E. Paul, Temple Black J, Kohser Ronald. *Materiales y procesos de fabricación*. Editorial. Reverte. 1988.
- [8] Maury Ramírez Heriberto, Niebles Núñez Enrique Esteban, Torres Salcedo Jaime. *Diseño para la fabricación y ensamble de productos soldados. Un enfoque metodológico y tecnológico*. Ediciones Uninorte. 2009.
- [9] Kalpakjian Serope, R Schmid Steven. *Manufactura, ingeniería y tecnología*. Editorial Pearson Education. 2002.
- [10] L Mott Robert. *Diseño de elementos de máquinas*. Editorial Pearson education. 2006.
- [11] Bernau R L. *Elementos de Metalografía y de Acero al Carbono*. Editorial. Andrés Bello. 1958.
- [12] Gil Bercero José Ramón, Barroso Herrero Segundo, Camacho López Ana María. *Introducción al conocimiento de los materiales y a sus aplicaciones*. Editorial. UNED. 2010.
- [13] Morral F. R, Jimeno Emilio, Molera P. *Metalurgia general, volumen 2*. Editorial. Reverte. 1985.
- [14] G. Fink Donald, Wayne Beaty H, M. Carrol John. *Manual práctico de electricidad para ingenieros*. Editorial. Reverte. 1981.
- [15] Groover Mikell P. *Fundamentos de manufactura moderna*. Editorial Pearson education. 1997.

- [16] F. Ashby Michael, H. Jones David. *Materiales para ingeniería 2: Introducción a la microestructura, el procesamiento y el diseño*. Editorial. Reverte. 2009.
- [17] Lancaster J. *Metallurgy of Welding*. Editorial Arington Publishing. 2012.
- [18] Giachino Joseph W, Weeks William. *Técnica y práctica de la soldadura*. Editorial. Reverte. 2007
- [19] Bailey Norman, Coe F R, Gooch T G. *Welding steel without hydrogen cracking*. Editorial Woodhead Publishing. 1993.
- [20] Lampman Steve. *Weld integrity and performance*. Book adapted from ASM International. 1997.
- [21] Stuart Sam. *Welding for Challenging Environments*. Editorial Pergamon Press. 2014.
- [22] Raj. B. *Frontiers in Materials Science*. Editorial Universities Press. 2005
- [23] Evans Ulick. *Corrosiones Metálicas*. Editorial. Reverte. 1987
- [24] Martínez Gómez Lorenzo. *Acero*. Editorial Fondo de Cultura Económica. 2012
- [25] Cembrero Cil Jesús. *Ciencia y tecnología de materiales: problemas y cuestiones*. Editorial Pearson Educación. 2005.
- [26] Hernández Albañil Héctor, Espejo Mora Edgar. *Mecánica de fractura y análisis de falla*. Colección Sede Universidad Nacional de Colombia. 2002.
- [27] Barroso Herrero Segundo, Carsí Cebrián Manuel. *Procesado y puesta en servicio de materiales*. Editorial UNED. 2013.
- [28] Messler Robert. *Joining of Advanced Materials*. Editorial Butterworth-Heinemann. 2013.
- [29] Bhadeshia Harry, Honeycomb Robert. *Steels: Microstructure and Properties*. Editorial Butterworth-Heinemann. 2011.
- [30] Lippold John. *Welding Metallurgy and Weldability*. Editorial Wiley. 2015.
- [31] Stephens Ralph, Fatemi Ali, Stephens Robert, Fuchs Henry. *Metal fatigue in Engineering*. Editorial Wiley. 2000.
- [32] Messler Robert. *Principles of Welding: Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy*. Editorial Wiley. 2008.
- [33] Zhang Hongyan, Senkara Jacek. *Resistance Welding: Fundamentals and Applications*. Editorial Taylor & Francis. 2005.
- [34] Easterling Kenneth. *Introduction to the Physical Metallurgy of Welding*. Editorial Butterworth-Heinemann. 2013.

- [35] Fidalgo Sánchez José Antonio, Fernández Pérez Manuel, Fernández Noemí. *Tecnología Industrial II*. Editorial Paraninfo S.A. 2016.
- [36] Tisza Miklós. *Physical Metallurgy for Engineers*. Editorial ASM International and Freund Publishing House. 2001.
- [37] Hakan Cemil, Pan Jiansheng. *Handbook of Thermal Process Modeling Steels*. Editorial CRC Press. 2008.
- [38] Totten George E. *Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel*. Editorial ASM International. 2002.
- [39] Midea Sandra. *Heat Treating, Including Steel Heat Treating in the New Millennium*. Editorial ASM International. 2000.
- [40] Campbell Flake. *Elements of Metallurgy and Engineering Alloys*. Editorial ASM International. 2008.
- [41] Hashmi M.S.J. *Comprehensive Materials Processing*. Editorial Newnes. 2014.
- [42] P. T. Houldcroft Feng. *Submerged Arc Welding*. Editorial Woodhead Publishing. 1990.
- [43] Singh Jasvinder, Singh Chandan, Singh Rajdeep. *Influence of welding parameters on bead geometry in saw*. Editorial BookRix. 2018.
- [44] Orozco Roldán Francisco Ramón, López Gálvez Cristóbal. *Soldadura en atmósfera protegida*. Editorial. Paraninfo. 2013.
- [45] Molera Solé Pere, *Soldadura industrial: clases y aplicaciones*. Editorial. Marcombo. 1991.
- [46] Jeffus Larry. *Soldadura: principios y aplicaciones*. Editorial. Paraninfo. 2009.
- [47] Rowe Richard, Jeffus Larry. *Manual de soldadura GMAW (MIG-MAG)*. Editorial. Paraninfo. 2008.
- [48] Allen Tripler Paul, Mosca Gene. *Física para la ciencia y la tecnología*. Editorial. Reverte. 2005.
- [49] M Portis Alan. *Campos electromagnéticos*. Editorial. Reverte 1985.
- [50] Douglas C Giancoli. *Física volumen 2*. Editorial Pearson educación. 2006.
- [51] García M, López Morelos Víctor H, García R, Lemús José, *Agitación electromagnética durante la soldadura de un acero inoxidable dúplex*. Ingenius Revista de Ciencia y Tecnología No. 12. 2014.
- [52] García Rentería M A, López Morelos V H, García Hernández R, Dzib Pérez L, García Ochoa E M, González Sánchez J. *Improvement of localised corrosion resistance of AISI 2205*

Duplex Stainless Steel joints made by gas metal arc welding under electromagnetic interaction of los intensity. Applied Surface Science, Volume 321, pp 252-260. 2014.

[53] Curiel F F, García R, López V H, González Sánchez J. *Effect of magnetic field applied during gas metal arc welding on the resistance to localised corrosión of the heat affected zone in AISI 304 Stainless Steel.* Corrosion Science, Voume 53, Issue 7, pp 2393-2399. 2011.

[54] Pérez Ruiz Eduardo A, Galeano Perilla Angy C, Negrín Hernández Luis I. *Evaluación de la dureza y microestructura del acero 1045 templado en sustanciasrefrigerantes no tradicionales.* Scientia et Technica Año XXI, Vol. 21, No. 3. 2016.

[55] De Araújo Freitas Vera Lúcia, De Macedo Silva Edgard, C. Víctor Hugo, Tavares Joao Manuel. *Microstructural characterization of carbon steels using ultrasonic velocitymeasurements.* 20 th International Congress of Mechanical Engineering. Pp15-20. 2009.

[56] Borgenstam A, Hillert A. *Kinetics of bainite transformation in steels.* Volume 1 in Woodhead Publishing Series in Metals and Surface Engineering. Pp 468-501. 2012.

[57] Mani Elakkiya, Udhayakumar Thendralarasu. *Effect of prior austenitic grain size and tempering temperature on the energy absorption characteristics of low alloy quenched and tempered steels.* Materials Science And Engineering: A 92-98. 2018.

[58] Porter D A, Easterling K E. *Phase transformations in metals and alloys.* Editorial by Van Nostrand Reinhold Company Ltd. 1981.

[59] Anglada Gomila Marc J. *Fractura de materiales.* Universidad Politécnica de Catalunya. 2002.

[60] Griffith A A. *The phenomena of rupture and Flow in solids.* Loondon: Royal Society of London. Pp 163-198. 1921.