



UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ

**EFFECTO DE LA INTENSIDAD DE CORRIENTE EN LOS
ESFUERZOS RESIDUALES DE JUNTAS SOLDADAS A
TOPE POR EL PROCESO SMAW EN EL ACERO AISI 1018**

Autores:

Turipe S. Moises J.
Cl: 17.249.993

Lamus M. Daniel L.
Cl: 18.470.597

Tutor:

Ing. Giovanni Pizzella P.
C.I.: V- 4.455.859

Urb. Yuma II, calle N°3, Municipio San Diego
Teléfono (0241) 8714240 (master) – Fax: (0241) 8712394



REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA INGENIERÍA MECÁNICA

**EFFECTO DE LA INTENSIDAD DE CORRIENTE EN LOS
ESFUERZOS RESIDUALES DE JUNTAS SOLDADAS A
TOPE POR EL PROCESO SMAW EN EL ACERO AISI 1018**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
INGENIERO MECÁNICO**

Autores:

Turipe S. Moises J.

Cl: 17.249.993

Lamus M. Daniel L.

Cl: 18.470.597

Tutor:

Ing. Giovanni Pizzella P.

C.I.: V- 4.455.859

San Diego, octubre 2017



REPUBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA INGENIERÍA MECÁNICA

ACEPTACIÓN DEL TUTOR

Quien suscribe, Ingeniero Giovanni Pizzella P. portador de la cédula de identidad N° V-4.455.859, en mi carácter de tutor del Informe de Trabajo Especial de Grado presentado por los ciudadanos Daniel L. Lamus M. portador de la Cedula de Identidad N° V-18.470.597 y Moises J. Turipe S. portador de la Cédula de Identidad N° V- 17.249.993 , titulado **“EFECTO DE LA INTENSIDAD DE CORRIENTE EN LOS ESFUERZOS RESIDUALES DE JUNTAS SOLDADAS A TOPE POR EL PROCESO SMAW EN ACERO AISI 1018”**. Presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Mecánico, considero que dicho trabajo reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación pública y evaluación por parte del jurado examinador que se designe.

En San Diego, a los veinticinco días del mes de Octubre del año dos mil diecisiete.

Ing. Giovanni Pizzella P.
C.I.: V- 4.455.859
Tutor Académico



FI-M-072-2018-1

Valencia, 25 de Enero de 2018.

Ciudadanos:

Turipe Moises

C.I: 17.249.993

Lamus Daniel

C.I: 18.470.597

Presente.-

Cumplo con informarle que la Comisión de Trabajo de Grado y Pasantías de la Facultad de Ingeniería en su reunión N° 1-2018 de fecha 25/01/2018 aprobó el proyecto de trabajo de grado titulado **“EFECTO DE LA INTENSIDAD DE CORRIENTE EN LOS ESFUERZOS RESIDUALES DE JUNTAS SOLDADAS A TOPE POR EL PROCESO SMAW EN ACERO AISI 1018.”** Presentado por usted(es) como requisito para optar al título de Ingeniero Mecánico.

Se ratifica la designación del Ing. Giovanni Pizzella, C.I. 4.455.859 y la Ing. Alicia Yanez de Pizzella, C.I. 4.598.880 como Tutores Académicos que lo asesorarán en el desarrollo de este proyecto.

Atentamente,

Prof. Zulay Salcedo
Decana de la Facultad de Ingeniería



c. c. Coordinación de Pasantías y Trabajo de Grado (1).

ZS/fr

ÍNDICE

CONTENIDO	Pp
LISTA DE CUADROS.....	xiv
LISTA DE FIGURAS.....	xv
RESUMEN.....	xvii
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO	
I EL PROBLEMA	
1.1 Planteamiento del Problema.....	3
1.2 Formulación del Problema.....	4
1.3 Objetivos.....	4
1.3.1 Objetivo General.....	4
1.3.2 Objetivos Específicos.....	4
1.4 Justificación.....	5
1.5 Limitaciones.....	5
1.6 Alcance.....	6
II MARCO TEÓRICO	
2.1 Antecedentes.....	7
2.2 Fundamentos Teóricos.....	9
2.2.1 Aleaciones Hierro - Carbono.....	9
2.2.2 Acero.....	9
2.2.3 Clasificación de los aceros.....	11
2.2.4 Códigos de Identificación de las Series de Aleación para Aceros, según la AISI.....	12
2.2.5 Características del Acero AISI 1018.....	12
2.2.5.1 Tratamientos térmicos recomendados.....	13
2.2.5.2 Propiedades mecánicas mínimas estimadas según SAE J1397.....	14
2.2.6 Soldadura.....	14
2.2.6.1 Tipos de soldaduras.....	14
2.2.7 Esfuerzos Residuales.....	17
2.2.7.1 Métodos de Alivios de Esfuerzos Residuales.....	25
2.2.7.2 Métodos para Cálculos Esfuerzos Residuales.....	29
2.2.8 Ensayos Mecánicos.....	33
2.2.8.1 Ensayo de Dureza.....	33
2.2.8.2 Ensayo de Tracción.....	36
2.2.9 Ensayos Metalográficos.....	40
2.2.9.1 Macroscopia... ..	40
2.2.9.2 Microscopia.....	40
2.3 Definición de Términos Básicos.....	41

III MARCO METODOLÓGICO	
3.1 Tipo de Investigación.....	42
3.2 Nivel de la investigación.....	42
3.3 Diseño de la Investigación.....	43
3.4 Población y muestra.....	43
3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	44
3.6 Técnicas de Procesamiento y Análisis de datos.....	44
3.7 Fases de Desarrollo de la Investigación.....	44
3.7.1. Fases Metodológicas.....	44
IV RESULTADOS	
4.1 Caracterización del materia Base.....	50
4.2 Obtener valores experimentales de los esfuerzos residuales globales por medio del método de microdureza.....	54
4.3 Obtener valores experimentales de los esfuerzos residuales utilizando el ensayo de tracción.....	73
4.4 Hallar la relación entre el amperaje empleado en el proceso de soldadura y los esfuerzos residuales provocados por el mismo..	76
4.5 Comparación entre métodos utilizados para determinar los esfuerzos residuales.....	78
4.6 Ensayo de Microscopia.....	79
4.7 Ensayo Macroscópico.....	90
4.8 Análisis de resultados.....	90
V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
5.1 Conclusiones.....	99
5.2 Recomendaciones.....	100
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	
Bibliografía.....	101
ANEXOS	
Anexo A.....	110
Anexo B.....	112
Anexo C.....	115

APÉNDICE

Apéndice A.....	106
-----------------	-----

LISTA DE TABLAS

TABLAS	CONTENIDO	p.p.
1	Resultado del análisis por fluorescencia de Rayos X.....	16
2	Valores de dureza Vickers (HV) para material base.....	50
3	Valores de dureza Vickers (HV), Dureza (MPa) y Esfuerzo de fluencia para material base.....	51
4	Parámetros del ensayo.....	51
5	Propiedades Mecánicas del material sin soldar.....	53
6	Tiempo de la soldadura de cada pieza según el amperaje.....	55
7	Valores de dureza Vickers (HV) promedios para las probetas soldadas con 80 A.....	59
8	Valores de dureza Vickers (HV) promedios para las probetas soldadas con 90 A.....	60
9	Valores de dureza Vickers (HV) promedios para las probetas soldadas con 100 A.....	62
10	Valores de dureza Vickers (HV) promedios para las probetas soldadas con 110 A.....	63
11	Valores de dureza Vickers (HV) promedios para las probetas soldadas con 120 A.....	64
12	Valores de dureza Vickers (HV) promedios a lo largo de la pieza para cada amperaje de estudio.....	66
13	Valores de dureza HV promedios (MPa) a lo largo de la pieza para cada amperaje de estudio.....	68
14	Valores de esfuerzos de fluencia (MPa) a lo largo de la pieza para cada amperaje de estudio, obtenidos de valores de dureza HV.....	70
15	Valores de esfuerzos residuales (MPa) a lo largo de la pieza para cada amperaje de estudio, obtenidos de valores de dureza HV.....	71
16	Cargas para desplazamiento de 0,75mm en ensayo de tracción para todos los amperajes y probetas tratadas térmicamente.....	74
17	Cargas residuales para los diferentes amperajes.....	75
18	Esfuerzos residuales para los diferentes amperajes.....	75
19	Valores de esfuerzos residuales para todos los amperajes a 4	

	n del cordón de soldadura.....	77
20	Comparación y diferencia porcentual entre esfuerzos residuales obtenidos por ensayo de microdureza y por ensayo de tracción.....	78

LISTA DE FIGURAS

CONTENIDO

FIGURAS

1	Diagrama de Fe-C.....	10
2	Códigos de Identificación para Aceros según AISI.....	12
3	Composición química del acero estructural AISI 1018.....	13
4	Tratamientos térmicos recomendados	13
5	Propiedades Mecánicas Mínimas para Aceros AISI 1018.....	14
6	Tipos de Soldaduras.	16
7	Esquema de Proceso de Soldadura SMAW.....	17
8	Historia de las tensiones y temperaturas para la barra central en el sistema de las tres barras	20
9	Estados transitorios y finales durante la soldadura.....	21
10	Distribución de tensiones residuales longitudinales y transversales de soldadura.....	23
11	Tiempo de cambio del centro de deflexión de una barra de metal bajo la influencia del movimiento longitudinal de una fuente de calor.....	24
12	Representación esquemática de la distorsión ocurrida en una junta soldada en V.....	24
13	Factores que contribuyen a las tensiones.....	25
14	Transmisión de onda en dos medios diferentes.....	33
15	Tipos de ensayos de dureza.....	35
16	Máquina para el Ensayo de Tracción.....	37
17	Grafico esfuerzo vs deformación.....	37
18	Dimensiones de probetas para ensayo de tracción.....	38
19	Espectrómetro Marca OXFORD.....	47
20	Análisis Químico.....	47

21	Microestructura del material base a 100X y 200X de aumento...	48
22	Microdurómetro Buehler.....	49
23	Máquina para ensayo de tracción.....	51
24	Esfuerzo vs Deformación material base.....	53
25	Dimensiones de la probeta a soldar.....	54
26	Tratamiento térmico a las probetas testigos.....	56
27	Distribución de los puntos de medición.....	57
28	Microestructura a 80 Amperios sin tratamiento termico.....	80
29	Microestructura a 80 Amperios con tratamiento termico.....	81
30	Microestructura a 90 Amperios sin tratamiento termico.....	82
31	Microestructura a 90 Amperios con tratamiento termico.....	83
32	Microestructura a 100Amperios sintratamiento termico.....	84
33	Microestructura a 100 Amperios con tratamiento termico.....	85
34	Microestructura a 110 Amperios sin tratamiento termico.....	86
35	Microestructura a 110 Amperios con tratamiento termico.....	87
36	Microestructura a 120 Amperios sin tratamiento termico.....	88
37	Microestructura a 120 Amperios sin tratamiento termico.....	89
38	Relación entre la conductividad térmica y la temperatura.....	96
39	Relación entre los esfuerzos residuales y la temperatura pico...	96

LISTA DE GRAFICAS

GRAFICAS

CONTENIDO

1	Relación entre la distancia del cordón de soldadura (mm) y la dureza Vickers (HV).....	69
2	Relación entre la distancia al cordón de soldadura (mm) y el esfuerzo residual (MPa).....	74
3	Relación entre amperaje y esfuerzo residual obtenidos por ensayo de tracción.....	77
4	Relación entre amperaje y esfuerzo residuales.....	78
5	Comparación de Esfuerzos Residuales Vs amperajes obtenidos por ensayo de microdureza y por ensayo de tracción.....	79



REPUBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA INGENIERÍA MECÁNICA

**EFFECTO DE LA INTENSIDAD DE CORRIENTE EN LOS
ESFUERZOS RESIDUALES DE JUNTAS SOLDADAS A
TOPE POR EL PROCESO SMAW EN EL ACERO AISI 1018**

Autores: Turipe S. Moises J, Lamus M. Daniel L.

Tutor: Pizzella P., Giovanni

Fecha: Abril 09 de 2018

RESUMEN

El objetivo de la presente investigación es determinar el efecto que tiene el amperaje usado con el proceso de soldadura SMAW sobre los esfuerzos residuales. Se realizó el estudio en acero AISI 1018 de 3,17 mm de espesor y se utilizaran cinco amperajes diferentes en el proceso; 80, 90, 100, 110 y 120 A. Para obtener los valores de los esfuerzos residuales se utilizó el método planteado por Masubushi K., usando primero el ensayo de microdureza y en el segundo el ensayo a realizar es de tracción. Se determinó la relación entre el amperaje utilizado en el proceso de soldadura y los esfuerzos residuales que este produce, se comprobó que el rango de amperajes de 80 a 120 A produce buenas soldaduras y que el amperaje más recomendable es de 90 A, ya que este genera los menores esfuerzos residuales con un valor de 99,74 MPa. También se observó la diferencia entre los resultados obtenidos por ambos métodos.

Descriptor: ensayos, dureza, esfuerzos residuales, uniones soldadas.

INTRODUCCIÓN

Generalmente los elementos de máquinas están conformados por la unión de varias piezas para satisfacer las necesidades requeridas. El proceso de soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido como material de aporte en uniones soldadas a tope, es uno de los métodos más utilizados para este fin. Sin embargo, gracias a las altas temperaturas que se originan en este proceso y a las posteriores contracciones durante el enfriamiento, es común la aparición de tensiones internas en el material, conocidos como esfuerzos residuales.

En muchos casos estas tensiones internas no son consideradas para el diseño de una junta soldada, lo que ocasiona que a éstas se les asigne una resistencia que no se corresponde con la realidad. Se pretende determinar el valor de estos esfuerzos, de modo de tener una información más precisa a la hora de diseñar y realizar soldaduras. Con esto se evitarán uso excesivo de material y los gastos que esto conlleva entre otros beneficios. Pero, ¿qué tanto se sobre diseñan estas estructuras?, eso es algo que no está propiamente establecido, ya que según la variación de muchos factores y el tipo de materiales utilizados (tanto en partes a soldar y material de aporte en el proceso de soldadura) afectan el módulo de los esfuerzos residuales que estas uniones conllevan.

Como parte de un compendio de estudios, encargados de analizar diversos factores que actúan como variadores de los esfuerzos residuales; esta investigación pretende, mediante ensayos, determinar dichos esfuerzos generados por una unión soldada, según la variación del cordón de soldadura que les une; con la finalidad de poder tener un patrón de referencia a la hora de diseñar alguna estructura que requiera unión por soldadura a tope con arco eléctrico y electrodo revestido.

Se pretende determinar el valor de estos esfuerzos, de modo de tener una información más precisa a la hora de diseñar y realizar soldaduras. Con esto se evitarán uso excesivo de material y los gastos que esto conlleva entre otros beneficios.

El informe se desarrolló en los siguientes capítulos:

Capítulo I: Explica todo lo relacionado al planteamiento y formulación del problema, además de los objetivos a alcanzar en este proyecto, así como también las limitaciones que se presentan.

Capítulo II: Se refiere a toda terminología y conceptos necesarios que servirán de base para el desarrollo del estudio, además de un breve resumen sobre los antecedentes relacionados con la investigación.

Capítulo III: Consta de las distintas fases metodológicas a emplear en el desarrollo de las estrategias, que son establecidas para cumplir con los objetivos propuestos.

Capítulo IV: Detalla los resultados mediante las fases metodológicas definidas en el capítulo anterior.

El trabajo aquí presentado, está estructurado de manera de que el lector pueda ir adquiriendo los conocimientos básicos que le permitirán entender a cabalidad la tecnología referida y las herramientas a desarrollar.

CAPÍTULO I

1.1 Planteamiento del Problema.

Desde la invención de la soldadura ésta se ha convertido en la elección predilecta por la industria para la construcción de piezas soldadas. Uno de los métodos más utilizados en la soldadura es el de arco eléctrico, uno de ellos es el SMAW (soldadura por arco eléctrico protegido) su uso extendido se debe a su sencillez, su economía y su versatilidad.

Desde sus inicios, el proceso de soldadura ha evolucionado enormemente pero aún quedan parámetros cuyos valores óptimos no se conocen con exactitud. Algo que se conoce con seguridad, es el hecho de que al realizar una soldadura a una superficie metálica, se presentan una serie de cambios en las propiedades del material, como por ejemplo, en el caso de estudio, el hecho de la aparición de esfuerzos residuales en el material. En términos ingenieriles, los esfuerzos residuales se presentan debido a una modificación superficial o simplemente a un pequeño cambio de geometría en el material, afectando en él sus propiedades mecánicas. Los esfuerzos residuales se desarrollan a través de la aplicación de diferentes procesos de manufactura, a los cuales están sometidos muchos de los materiales. En el proceso de soldadura los esfuerzos residuales se generan como consecuencia de dilataciones y contracciones que aparecen como producto de un calentamiento local del material.

Algo que no se ha estudiado a profundidad, son los valores exactos de estos esfuerzos residuales, lo cual crea el problema de la incertidumbre a la hora de diseñar dichas uniones, esto supone un sobrediseño de la soldadura y a su vez implica gastos innecesarios de material, tiempo y dinero. Estos esfuerzos residuales pueden ser considerados nocivos en las estructuras soldadas, sobre todo cuando se trata de esfuerzos de tracción, pero cuando los esfuerzos son a compresión estos pueden ser beneficiosos ya que pueden mejorar la resistencia a la fatiga del material.

Se han realizado estudios sobre los esfuerzos residuales en diferentes materiales, en este caso se obtendrá el valor de estos esfuerzos, así como el comportamiento del mismo en un acero AISI 1018. Esto se debe a que es uno de los aceros de baja aleación más utilizado en

la industria, por su bajo costo y su gran uso. También tiene una buena resistencia al desgaste y si es templado logra una muy buena dureza con un comportamiento muy homogéneo.

La evaluación de los esfuerzos residuales se puede llevar a cabo mediante los procesos de medición del tipo destructivo tales como: hole drilling (taladrado), ring core (núcleo anular), curvatura de deflexión, seccionamiento y microdureza (el cual se puede catalogar como ensayo semidestructivo), así como no destructivos entre los que se pueden mencionar los procesos de: difracción de rayos x, métodos magnéticos y ultrasonido.

En razón de lo expuesto, se plantea la siguiente investigación, en la cual se determinarán los esfuerzos residuales que se producen en el acero AISI 1018 por motivo de la soldadura tipo SMAW a diferentes intensidades de corriente. Siendo el método de microdureza el elegido para el estudio a realizar.

1.2 Formulación del Problema.

Con este trabajo se pretende determinar el efecto de la intensidad de corriente en los esfuerzos residuales de juntas soldadas a tope, mediante el método SMAW, en acero AISI 1018, para así dar respuesta a la siguiente interrogante: ¿Cómo influye la intensidad de corriente en los esfuerzos residuales de juntas soldadas a tope, mediante el método SMAW?

1.3 Objetivos de la Investigación.

1.3.1 Objetivo General.

Determinar el efecto de la intensidad de corriente en los esfuerzos residuales de juntas soldadas a tope, mediante el método SMAW, en acero AISI 1018.

1.3.2 Objetivos Específicos.

1. Establecer los parámetros de trabajo para la ejecución de la soldadura del proceso SMAW.
2. Obtener valores experimentales de los esfuerzos residuales globales por medio del método de microdureza.
3. Obtener valores experimentales de los esfuerzos residuales utilizando el ensayo de tracción.

4. Hallar la relación entre el amperaje empleado en el proceso de soldadura y los esfuerzos residuales provocados por el mismo.
5. Comparación entre los métodos utilizados para determinar los esfuerzos residuales.

1.4 Justificación del Problema.

Este proyecto podrá ser usado por la comunidad de la Universidad José Antonio Páez para referencias futuras, será útil para cualquier persona que requiera información sobre el proceso de soldadura SMAW, también sobre el material acero AISI 1018 y sobre todo los esfuerzos residuales que produce el proceso de soldadura sobre el acero AISI 1018. Al tomar en consideración lo anteriormente mencionado se evita el uso de factores de seguridad muy grandes, lo que implica una mayor precisión a la hora de realizar cálculos de soldadura y esto trae como consecuencia menor uso de material de aporte, impactando directamente en la reducción de costos a la hora de realizar soldadura.

Este trabajo también podrá ser compilado con los demás trabajos que estudian esfuerzos residuales para otras condiciones de soldadura o materiales y de esta forma editar un folleto que muestre la relación existente entre los esfuerzos residuales y los procesos de soldadura.

1.5 Limitaciones.

Conseguir un soldador que este calificado por la American Welding Society (AWS), es una limitante importante, además de la disponibilidad de las máquinas y herramientas de ensayo, en un laboratorio de materiales calificado, por el uso que éste tiene en el periodo de clases, tanto si es en la Universidad José Antonio Páez como en la Universidad de Carabobo o por razones económicas en alguna empresa privada de la zona.

Por otra parte los reactivos y materiales utilizados en la preparación de las probetas y el costo de las láminas de acero AISI 1018.

El tiempo de la investigación está estipulado en ocho meses, sin embargo, en el transcurso del desarrollo de la investigación pueden surgir nuevas variables que tiendan a extender este período de investigación.

1.6 Alcance.

Se utilizará un acero al carbono AISI 1018, debido a que es uno de los aceros más usados en la industria, lo que facilitará su obtención al momento de realizar los ensayos. Al acero se le realizará un ensayo de microdureza después de haberle realizado la soldadura.

El proceso de soldadura a utilizar será el SMAW (Shielded metal arc welding). Se realizará siguiendo las normas americanas ASME / AWS A5.29. Se utilizará un electrodo E-6013 siendo este uno de los electrodos recomendados para este tipo de soldadura en el acero al carbono AISI 1018.

Para los ensayos se mantendrán constantes el espesor del acero AISI 1018 y el diámetro del electrodo (1/8 pulg ó 3,17 mm). Las probetas serán soldadas a tope, mediante el método de arco eléctrico con electrodo revestido (SMAW). Se soldarán cinco grupos con diferentes intensidades de corriente, cada grupo está conformado por diez probetas. Los amperajes seleccionados corresponden al rango de amperajes recomendados por la AWS para el electrodo seleccionado E-6013 con un diámetro de 3,175mm (1/8"). Los amperajes a utilizar son: 80, 90, 100, 110 y 120 A.

Previo a la realización de las soldaduras, a cada probeta se le realizará un tratamiento térmico, de modo de aliviar las tensiones existentes en ellas, así asegurando que los esfuerzos calculados sean sólo consecuencia de la soldadura.

Solo se considerarán esfuerzos residuales globales de la junta.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la Investigación.

La finalidad de este capítulo es presentar los antecedentes necesarios para definir el contexto de esta investigación, y por el otro, desarrollar los fundamentos y herramientas teóricas requeridas para la realización de este trabajo especial de grado.

Kronfle M. y Viteri A. (1.983), en su trabajo titulado **“Efecto de los esfuerzos residuales sobre las propiedades de las uniones soldadas”** llevó a cabo un estudio en la Escuela Superior Politécnica del Litoral, en Guayaquil, Ecuador. Dicho estudio se enfoca en la influencia de los esfuerzos residuales, producto de soldaduras, sobre el desempeño de las uniones soldadas. Se expusieron las causas por las que se producen, así como los diversos métodos existentes para la medición y alivio de los mismos. En la parte experimental, se efectuó el proceso de soldadura bajo condiciones diferentes, a la vez que se investigó la producción y alivio de los esfuerzos residuales. Como resultado de este trabajo se concluyó lo siguiente: “de los resultados de la investigación de esfuerzos residuales por el método de recubrimientos quebradizos, se concluye que paralelos al cordón de soldadura y a los costados del mismo, se encuentran los esfuerzos de compresión; y en la parte central del cordón, los esfuerzos residuales de tensión”

Así mismo, Bello E. y Marchena M, (2.009), realizaron un trabajo titulado **“Determinación de los esfuerzos residuales en uniones soldadas a tope a través de la teoría de Masubuchi”**, en el trabajo determinaron los esfuerzos residuales con las condiciones mencionadas anteriormente, usando el método de soldadura de arco eléctrico con electrodo revestido (SMAW). Para obtener dichos esfuerzos utilizaron modelos teóricos, experimentales, para luego validar los resultados aplicando la modelación mediante el método de los elementos finitos MEF. El estudio arrojó los siguientes

resultados: “Se validó el modelo Computarizado al comparar los resultados obtenidos a través de la simulación con el análisis teórico y el ensayo con las probetas. La diferencia entre el análisis teórico y la simulación fue de 17%, mientras que el obtenido al compararlo con los resultados experimentales fue de 8,5%. Lo que demuestra que se puede valorar una tecnología desarrollada, evitando la técnica de ensayo y error”.

En este mismo orden de ideas, Kudryavtsev Y., Kleiman J. y Gustcha O. (2.008), en el trabajo titulado **“Ultrasonic Measurement of Residual Stresses in Welded Railway Bridge”**, realizaron la medición de los esfuerzos residuales en las soldaduras de un riel ferroviario. Los esfuerzos residuales se midieron antes y después de la aplicación del tratamiento térmico, usado para redistribuir dichos esfuerzos. Para medir los esfuerzos residuales utilizaron el método de ultrasonido. Los esfuerzos residuales medidos antes del tratamiento tuvieron un valor mínimo de 200 MPa y un valor máximo de 240 MPa. La aplicación del tratamiento logró la redistribución de los esfuerzos y los llevó del valor anterior a -10 MPa, esta redistribución también produce el aumento de un 45% del rango del límite de esfuerzo, para este tipo de elemento soldado paso de 85 MPa a 123 MPa.

Así mismo, Aguilera y Granado (2.003), en su trabajo de grado titulado **“evaluación del comportamiento mecánico del acero X65 sometido a soldadura del tipo arco sumergido”**, realizado en la Universidad de Carabobo. Llevaron una investigación la cual se basó en aplicar la soldadura a diferentes amperajes, 450 A y 500 A, donde se concluyó que el amperaje de la soldadura tiene un gran impacto sobre las propiedades del material.

Por último, Díaz P. (2.005), en su trabajo titulado **“Simulación de un proceso termodinámico para predecir esfuerzos residuales en uniones de placas soldadas a tope”**, llevado a cabo en la Universidad Metropolitana en Caracas. Llevó a cabo un estudio por medio de simulación donde se pudo concluir que: “la distribución de esfuerzos residuales típicos en este tipo de soldadura de placas relativamente gruesas, se pueden caracterizar por un estado de esfuerzos plano (plano XY), donde predominan los esfuerzos longitudinales en la dirección x (σ_x), seguidos de los esfuerzos transversales en la dirección

y σ_y) y por último los esfuerzos transversales en la dirección z (σ_z) son bajos comparados con los anteriores (σ_{zmax} aproximadamente el 10% del esfuerzo de fluencia, S_y)”.

2.2 Fundamentos Teóricos.

2.2.1 Aleaciones Hierro - Carbono

El sistema de aleaciones binario más importante es el hierro-carbono. Los aceros y fundiciones son aleaciones hierro-carbono. La clasificación de las aleaciones férreas según el contenido en carbono comprende tres grandes grupos: hierro cuando contiene menos del 0,008 % en peso de C, acero cuando la aleación Fe-C tiene un contenido en C mayor del 0,008 y menor del 2,11 % en peso (aunque generalmente contienen menos del 1 %), y fundición cuando la aleación Fe-C tiene un contenido en C superior al 2,1 % (aunque generalmente contienen entre el 3,5 y el 4 % de C).

En la figura 1 se presenta el diagrama Hierro – Carbono, en el cual se muestra de forma gráfica los cambios presentes en las aleaciones de hierro – carbono, entre ellos cambios de fase, cambios estructurales. Todo esto en una relación de porcentaje de carbono (en el eje de las abscisas, de 0 a 6,67% de carbono), y la temperatura (en el eje de las ordenadas, de 0 a 1.600 o 1.800 grados centígrados generalmente).

2.2.2 Acero

Como se dijo anteriormente, el acero es la aleación de hierro y carbono, donde el carbono no supera el 2,1% en peso de la composición de la aleación, alcanzando normalmente porcentajes entre el 0,2% y el 0,3%. Porcentajes mayores que el 2,1% de carbono dan lugar a las fundiciones, aleaciones que al ser quebradizas y no poderse forjar (a diferencia de los aceros), se moldean. La definición anterior, sin embargo, se circunscribe a los aceros al carbono en los que éste último es el único aleante o los demás presentes lo están en cantidades muy pequeñas pues de hecho existen multitud de tipos de acero con composiciones muy diversas que reciben denominaciones específicas en virtud ya sea de los elementos que predominan en su composición (aceros al silicio), de su susceptibilidad a ciertos tratamientos (aceros de cementación), de alguna característica potenciada (aceros inoxidables) e incluso en función de su uso (aceros estructurales). Usualmente estas

aleaciones de hierro se engloban bajo la denominación genérica de aceros especiales, razón por la que aquí se ha adoptado la definición de los comunes o "al carbono" que amén de ser los primeros fabricados y los más empleados, sirvieron de base para los demás.(ver figura1)

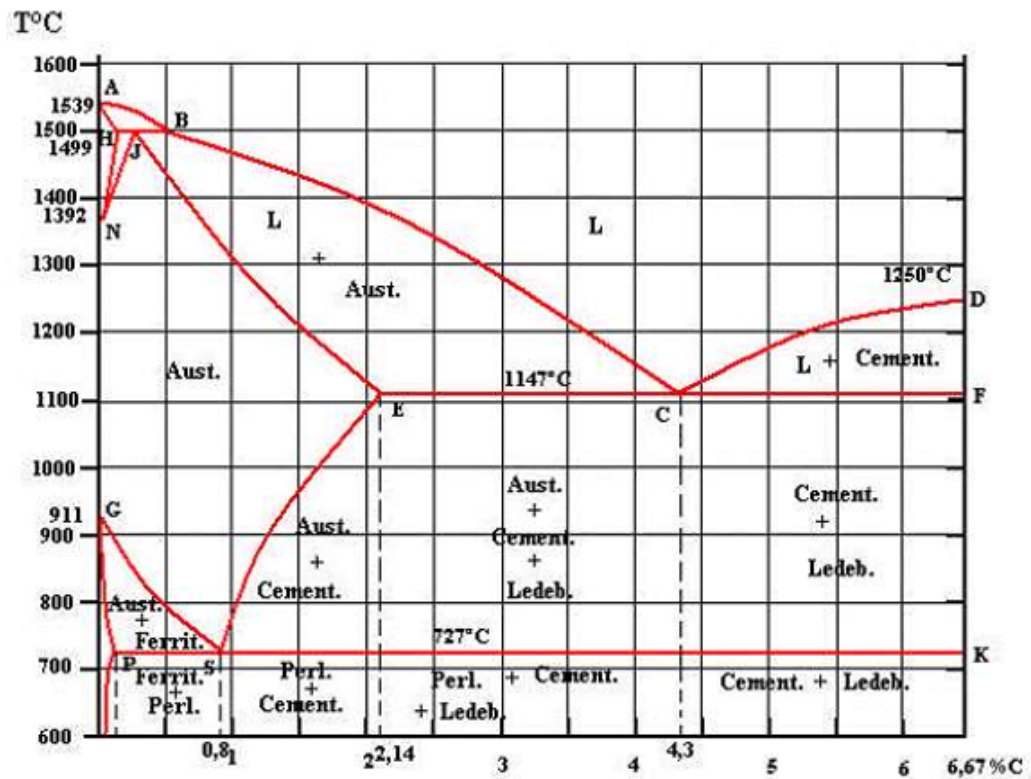


Figura 1: Diagrama de Fe-C.

Fuente: Askeland, Donald R. and Phule, Pradeep P. (2004).

Por la variedad ya apuntada y por su disponibilidad (sus dos elementos primordiales abundan en la naturaleza facilitando su producción en cantidades industriales) los aceros son las aleaciones más utilizadas en la construcción de maquinaria, herramientas, edificios y obras públicas, habiendo contribuido al alto nivel de desarrollo tecnológico de las sociedades industrializadas.

2.2.3 Clasificación de los Aceros por su Composición

Acero bajo en carbono: menos del 0,25% de C en peso. Son blandos pero dúctiles. Se utilizan en vehículos, tuberías, elementos estructurales, etcétera. También existen los aceros de alta resistencia y baja aleación, que contienen otros elementos aleados hasta un 10% en peso; tienen una mayor resistencia mecánica y pueden ser trabajados fácilmente.

Acero medio en carbono: entre 0,25% y 0,6% de C en peso. Para mejorar sus propiedades son tratados térmicamente. Son más resistentes que los aceros bajos en carbono, pero menos dúctiles; se emplean en piezas de ingeniería que requieren una alta resistencia mecánica y al desgaste.

Acero alto en carbono: entre 0,60% y 1,4% de C en peso. Son aún más resistentes, pero también menos dúctiles. Se añaden otros elementos para que formen carburos, por ejemplo, con wolframio se forma el carburo de wolframio, WC; estos carburos son muy duros. Estos aceros se emplean principalmente en herramientas.

Aceros aleados: Con los aceros no aleados, o al carbono, es imposible satisfacer las demandas de la industria actual. Para conseguir determinadas características de resiliencia, resistencia al desgaste, dureza y resistencia a determinadas temperaturas se debe recurrir a éstos. Mediante la acción de uno o varios elementos de aleación en porcentajes adecuados se introducen modificaciones químicas y estructurales que afectan las características mecánicas, resistencia a oxidación y otras propiedades.

2.2.4 Códigos de Identificación de las Series de Aleación para Aceros, según la AISI

A continuación se muestra la figura 2 donde se encuentran los códigos de la series de aleación para aceros

Código AISI	Características
10xx	Básicos de hogar abierto y Bessemer ácidos.
11xx	Básicos de hogar abierto y Bessemer ácidos, azufre alto, fósforo bajo.
12xx	Básicos de hogar abierto, azufre alto, fósforo alto.
13xx	Magnesio 1,75.
40xx	Molibdeno 0.2 o 0.25.
41xx	Cromo 0.5, 0.8 o 0.95 y molibdeno 0.12, 0.2 o 0.3
43xx	Níquel 1.83, Cromo 0.5 o 0.8 molibdeno 0.25.
44xx	Molibdeno 0.53.

Figura 2: Códigos de Identificación para Aceros según AISI.

Fuente: Grupo PALMEXICO, México, 2.008

46xx	Níquel 0.85 o 1.83 molibdeno 0.2 o 0.25.
47xx	Níquel 1.05, cromo 0.45 y molibdeno 0.2 o 0.35.
48xx	Níquel 3.5 y molibdeno 0.25.
50xx	Cromo 0.4.
51xx	Cromo 0.8, 0.88, 0.93, 0.95 o 1.
5xxx	Carbono 1.04 y cromo 1.03 o 1.45.
61xx	Cromo 0.6 o 0.95 Vanadio 0.13 o 0.15 mínimo.
86xx	Níquel 0.55, cromo 0.5 y molibdeno 0.2.
87xx	Níquel 0.55, cromo 0.5 y molibdeno 0.25.
88xx	Níquel 0.55, cromo 0.5 y molibdeno 0.35.
92xx	Silicio 2.0.
94bxx	Níquel 0.45, cromo 0.4 y molibdeno 0.12 y boro 0.0005 mínimo.

Figura 2: Códigos de Identificación para Aceros según AISI.(Cont.)

Fuente: Grupo PALMEXICO, México, 2.008

2.2.5 Características del Acero AISI 1018

El Acero AISI 1018 es un acero estructural al carbono, de alta ductilidad y buena soldabilidad, utilizado en construcción de estructuras metálicas, tuberías, construcción de maquinarias cuando es endurecido superficialmente mediante tratamiento de cementación o

carbonitrurado seguido de temple y revenido. La composición química de una colada de acero AISI 1018 puede verse en la Figura 3.

A 1018/A 1018M

TABLE 1 Chemical Composition^A For Hot Rolled, Heavy Thickness Coils

Designations SS, HSLAS, and HSLAS-F
% Heat Analysis, Element Maximum unless otherwise shown

Designation	C	Mn	P	S	Cu ^{B,C}	Ni ^B	Cr ^{B,D}	Mo ^{B,D}	V	Cb	Ti	N
SS												
Grade 30 [205]	0.25	1.50	0.035	0.04	0.20	0.20	0.15	0.06	0.008	0.008	0.008	0.014
Grade 33 [230]	0.25	1.50	0.035	0.04	0.20	0.20	0.15	0.06	0.008	0.008	0.008	0.014
Grade 36 [250]	0.25	1.50	0.035	0.04	0.20	0.20	0.15	0.06	0.008	0.008	0.008	0.014
Grade 40 [275]	0.25	1.50	0.035	0.04	0.20	0.20	0.15	0.06	0.008	0.008	0.008	0.014

Figura 3: Composición química del acero estructural AISI 1018.
Fuente: ASTM international standards Worldwide (2.016)

El acero AISI 1018 se produce en una amplia variedad de formas, que incluyen: Perfiles estructurales, Tubos, Láminas. Barra redonda, cuadrada, hexagonal y solera, laminadas o forjadas en caliente, estiradas en frío y peladas o maquinadas. Planchas laminadas en caliente.

Métodos de unión

Las piezas hechas a partir de acero AISI 1018 son fácilmente unidas mediante casi todos los procesos de soldadura (ver figura 4). Los más comúnmente usados para el AISI 1018 son los menos costosos y rápidos como la Soldadura por Arco Metálico Protegido (SMAW, Shielded Metal Arc Welding), Soldadura con Arco Metálico y Gas (GMAW, Gas Metal Arc Welding), y soldadura oxiacetilénica. El acero AISI 1018 es también comúnmente atornillado y remachado en las aplicaciones estructurales: edificios, puentes, torres, etc.

2.2.5.1 Tratamientos térmicos recomendados (valores en ° C)

FORJADO	NORMALIZADO	RECOCIDO		TEMPLADO	REVENIDO	PUNTOS CRÍTICOS APROX.	
		ABLANDAMIENTO	REGENERACIÓN			Ac1	Ac3
1100-1250	870-900	650-700 enfriar al aire	850-890 enfriar en horno	Cementar 925	150-250	724	840

Figura 4: Tratamientos térmicos recomendados (valores en °C)
Fuente: Grupo PALMEXICO (2017)

2.2.5.2 Propiedades mecánicas mínimas estimadas según A 1018/A 1018M – 01^a.(ver figura 5)

A 1018/A 1018M

TABLE 2 Mechanical Property Requirements^A For Hot Rolled Heavy Thickness Coils

Designations SS, HSLAS, and HSLAS-F				
Designation	Yield Strength min	Tensile Strength min	Elongation in 2 in. [50 mm], min, % for thicknesses to 1 in. [25 mm] incl	Elongation in 8 in. [200mm], min, % for thicknesses 0.180 in.[4.5 mm] to 1 in. [25 mm] incl
SS	KSI [MPa]	KSI [MPa]		
Grade 30 [205]	30 [205]	49 [340]	22.0	17.0
Grade 33 [230]	33 [230]	52 [360]	22.0	16.0
Grade 36 [250]	36 [250]	53 [365]	21.0	15.0
Grade 40 [275]	40 [275]	55 [380]	19.0	14.0

Figura 5: Propiedades Mecánicas Mínimas para Aceros AISI 1018.

Fuente: ASTM “Steel--Plate, Sheet, Strip, Wire_ Stainless Steel Bar (2004)

2.2.6 Soldadura.

La soldadura es un proceso de fabricación en donde se realiza la unión de dos materiales, (generalmente metales o termoplásticos), usualmente logrado a través de la coalescencia (fusión), en la cual las piezas son soldadas fundiendo ambas y agregando un material de relleno fundido (metal o plástico).

2.2.6.1 Tipos de Soldaduras

La AWS ha clasificado una gran variedad de procesos de soldadura, simplificándolos, tomando en cuenta su principio básico y su uso actualmente (Ver Figura 6).

Soldadura al Arco Eléctrico SMAW

Este tipo de soldadura es uno de los procesos de unión de metales más antiguos que existe, su inicio data de los años 90 de siglo XVIII. En la que se utilizaba un electrodo de carbón para producir el arco eléctrico, pero no es sino hasta 1907, cuando el fundador de ESAB, Oscar Kjellber desarrolla el método de soldadura con electrodo recubierto, también

conocido como método SMAW (Shielded Metal Arc Welding). Fue el primer método aplicado con grandes resultados, no solo de orden técnico, sino también de orden económico, ya que este proceso permitió el desarrollo de procesos de fabricación mucho más eficaces, y que hasta hoy en día solamente han sido superados por modernas aplicaciones, pero que siguen basándose en el concepto básico de la soldadura al arco con electrodo auto protegido.

El calor generado por el arco funde la superficie del metal base formando una pileta líquida y al electrodo que lo transfiere a través del arco al metal fundido y se convierte en el metal de soldadura depositado, que va solidificando a medida que el electrodo se mueve a lo largo de la junta estableciendo la unión metalúrgica. El revestimiento del electrodo produce una atmósfera de gas de protección al arco, al área inmediata y a la escoria que cubre al depósito. Las aplicaciones más comunes del proceso de soldadura SMAW son las estructuras metálicas en general, recipientes a presión, construcciones navales, tuberías, gasoductos, maquinarias, etc. El electrodo usado para este proceso consta de una varilla (o alambre) metálica (acero) recubierto de revestimiento de materias primas debidamente mezcladas, tales como óxidos naturales, silicatos naturales, productos volátiles, fundentes, ferroaleantes y aglomerantes. (Ver figura 7).

2.2.7 Esfuerzos Residuales

Los esfuerzos residuales son aquellos que permanecen sobre un cuerpo cuando este se encuentra en reposo y en equilibrio con sus alrededores. La existencia de estos esfuerzos puede ser perjudicial ya que disminuyen la tolerancia que tiene el material al momento de serle aplicada cargas externas, en el caso de estudio, los esfuerzos residuales son causados por un proceso de soldadura. Por otra parte, estos esfuerzos pueden ser usados para diseñar materiales o componentes que sean resistentes al daño que éstos puedan sufrir.

Así mismo, estos esfuerzos pueden ser especialmente problemáticos debido a su tendencia a concentrarse en las uniones y debido a la posibilidad de perjudicar a la microestructura de la zona afectada por el calor creada por la soldadura (ZAC). La medición de los esfuerzos residuales es particularmente importante para lograr la

introducción, a nivel comercial, de ciertos métodos de soldadura como son: soldadura por rayo de electrones, soldadura por inercia, soldadura por fricción rotativa.

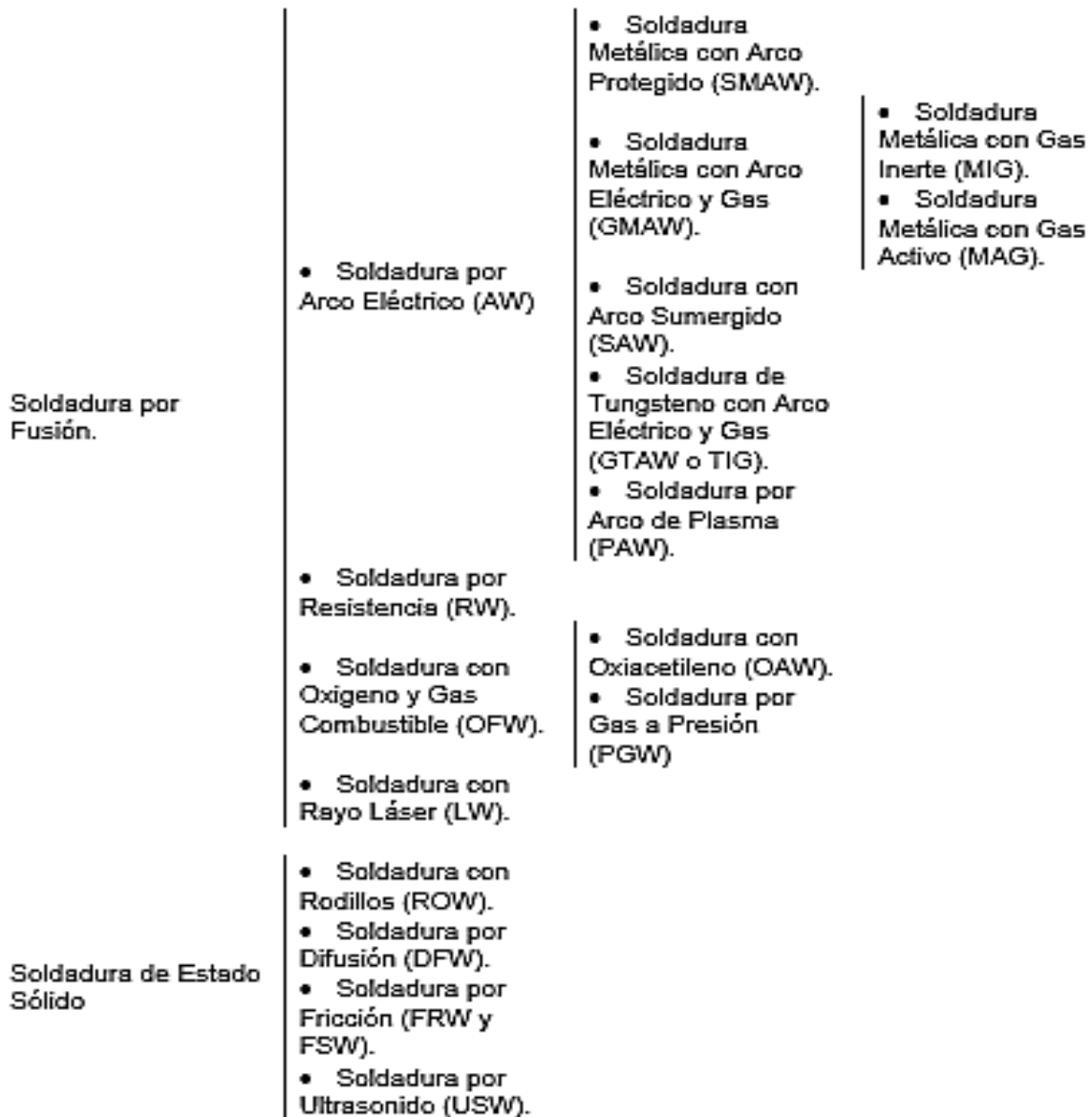


Figura 6: Tipos de Soldaduras.
Fuente: Couto J. y Mendoza J. (2.009).



Figura 7: Esquema de Proceso de Soldadura SMAW.
Fuente: ITW Welding, <http://www.itwelding-spain.com>.

Estas mediciones ayudan al desarrollo de tratamientos térmicos post-soldadura, y a la validación del método de elementos finitos.

Por otra parte, los esfuerzos residuales por tracción pueden reducir el rendimiento o causar la falla del material. Estos pueden aumentar las fallas por fatiga y degradación por el medio ambiente. También pueden reducir la capacidad de carga del material y contribuir a la fractura frágil, así como causar otros tipos de daños como deformación plástica y resquebrajamiento del material. Es de hacer notar que los esfuerzos residuales pueden ser medidos por métodos no destructivos como son: rayos X, difracción de neutrones, método magnético y ultrasónico. Existen métodos destructivos localizados como son: taladrado y anillo anular, y otros métodos donde se secciona el material a inspeccionar entre los que se encuentran: el de división, el de rebanado de capas, y el de contorno. El método a usar debe ser seleccionado tomando en cuenta el volumen del material, su geometría y el acceso que se tiene al mismo.

Finalmente la predicción de esfuerzos residuales por modelación numérica de soldadura ha evolucionado mucho en los últimos años. El simular con exactitud el proceso de soldadura es sumamente difícil, por lo que es necesario realizar simplificaciones al proceso e idealizar el material. Por lo que estas herramientas de modelación son sumamente útiles, pero la verificación con procesos experimentales es esencial para obtener resultados exactos. En las estructuras soldadas la aparición de los esfuerzos residuales puede ser

minimizada al hacer una selección adecuada del material, del proceso de soldadura y de sus parámetros. Estos esfuerzos residuales pueden ser reducidos aplicando varias técnicas especiales de soldadura incluyendo: soldadura de bajo estrés y sin distorsión así como soldadura con disipación de calor en la última pasada. Estos también pueden ser disminuidos mediante procesos térmicos como tratamientos térmicos post-soldadura o por métodos mecánicos como alivio de tensiones por vibración. Si estos métodos se aplican de manera incorrecta pueden hacer que los esfuerzos residuales aumenten de magnitud en vez de disminuir.

La soldadura implica la aplicación de calor altamente localizado en metales que responden a la ley física de expansión contracción, capaces de afectar su estructura y en condiciones de movimiento restringido, de esta manera se puede afirmar que durante el calentamiento que la soldadura impone a una pequeña parte de las piezas, el aumento de volumen de esta resulta impedido por el calentamiento desigual del metal base y por el grado de embridamiento que tenga la misma, por lo que el crecimiento de volumen libre será función directa del gradiente de temperatura "DT" y del coeficiente "a" de dilatación del material calentado, coincidiendo con lo planteado por Masubuchi K, Glizmanenko, Guliaev y otros.

Otro concepto a explicar es que la tensión térmica de compresión resultante corresponderá a aquella que produce una reducción de volumen equivalente a la acción de impedimento de movimiento. Cuando la máxima temperatura alcanzada, no exceda de cierto valor, dicha tensión se encontrará en el campo elástico y su valor será igual al múltiplo de la deformación específica (DL/Lo) por el módulo de elasticidad del material.

En el caso de una unión soldada, en la zona de influencia térmica (ZIT), donde se supera el valor de temperatura del campo elástico, la tensión de compresión tiende a superar la de fluencia a esa temperatura, pero en ningún momento lo logra. El proceso inverso ocurre durante el enfriamiento en condiciones de movimiento restringido, las zonas que se vieron durante la deformación plástica en caliente, resultan cortas para ocupar los nuevos espacios alcanzados y aparecen entonces, tensiones térmicas de

tracción. Al alcanzarse la temperatura ambiente habrán quedado tensiones térmicas permanentes de tracción cuyo valor es del orden del límite de fluencia del material.

Para que se pueda comprender el fenómeno anterior se explica un clásico sistema de tres barras utilizado por Masubushi K, el cual de una forma elemental explica las variaciones que se producen en una barra central. Al calentar exclusivamente la barra central aparecen tensiones de compresión en la misma, pues su dilatación está restringida por dos barras laterales, tal como muestra la curva A-B, alcanzando el límite de fluencia del metal de la barra en el punto "B" (para este caso 170 °C). Las tensiones de compresión en la barra decrecen siguiendo la variación del límite de fluencia del metal con las temperaturas crecientes, lo que se muestra en el tramo de curva B-C. (Ver figura 4).

Alcanzada la temperatura máxima de »600 °C correspondiente al punto "C" comienza el enfriamiento de la barra, las tensiones de compresión decaerán rápidamente y la tensión cambia de signo hasta alcanzar el punto "D" correspondiente a la tensión de fluencia, posteriores decrecimientos de la temperatura hacen que las tensiones de tracción sobre la barra se mantengan permanentemente iguales al valor del límite de fluencia a cada temperatura. De esta forma habrá quedado sometida a una tensión residual de tracción igual al límite de fluencia del metal a temperatura ambiente. Para mantener la condición de equilibrio las tensiones en las barras laterales serán de compresión y su valor será la mitad que la tensión en la barra central. La línea E' B' indica, que tensiones residuales iguales al límite de fluencia se producirá calentando la barra central a cualquier temperatura que exceda 315 °C. (Ver figura 8).

Por lo que se concluye que cualquier proceso que aporte calor en forma localizada sobre una pieza de acero y de tal manera que a la temperatura final se produzcan deformaciones plásticas, dejará en dicha pieza tensiones residuales de valor generalmente igual o muy próximo al límite de fluencia del material a temperatura ambiente.

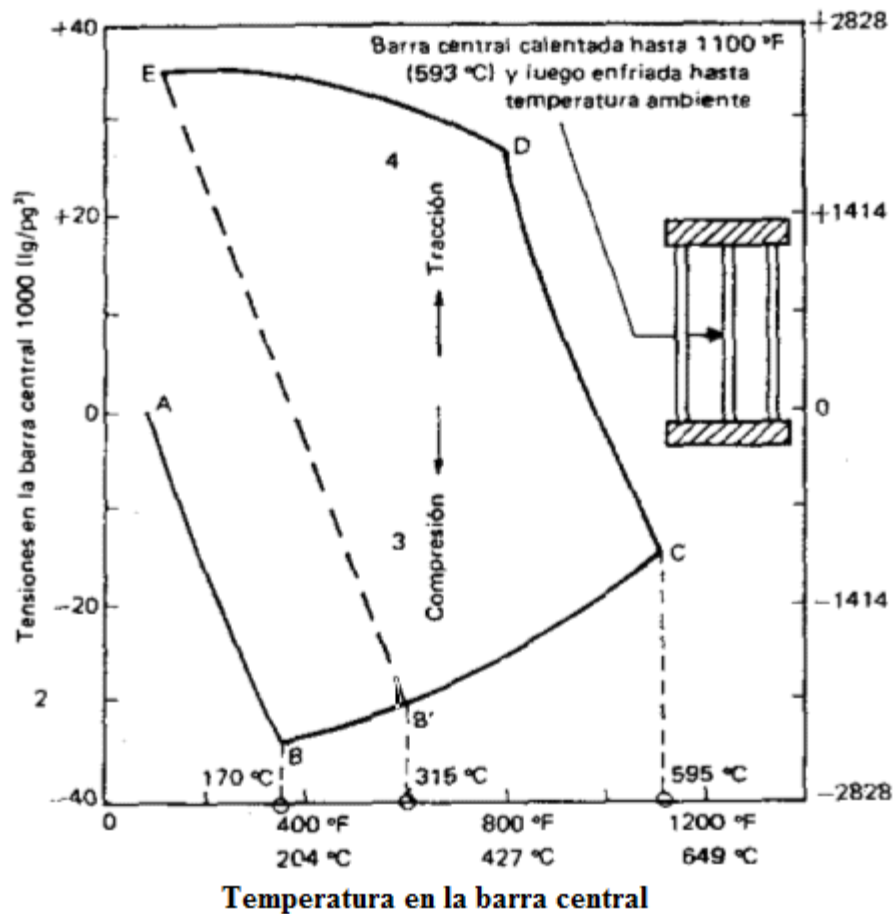


Figura 8: Historia de las tensiones y temperaturas para la barra central en el sistema de las tres barras.

Fuente: Metal Univers. (2006). Publicación de Metal Univers (Nº 38). España: Nova Àgora, S.L,

Cuando se unen dos o más piezas mediante un cordón de soldadura ocurren fenómenos similares a los explicados mediante el clásico sistema de las tres barras, donde coincide el cordón con la barra central y el metal base con las barras laterales. El curso de los acontecimientos térmicos y movimientos de expansión contracción se puede dividir en 4 secciones lo cual Masubushi K. analiza, según la Figura 9.

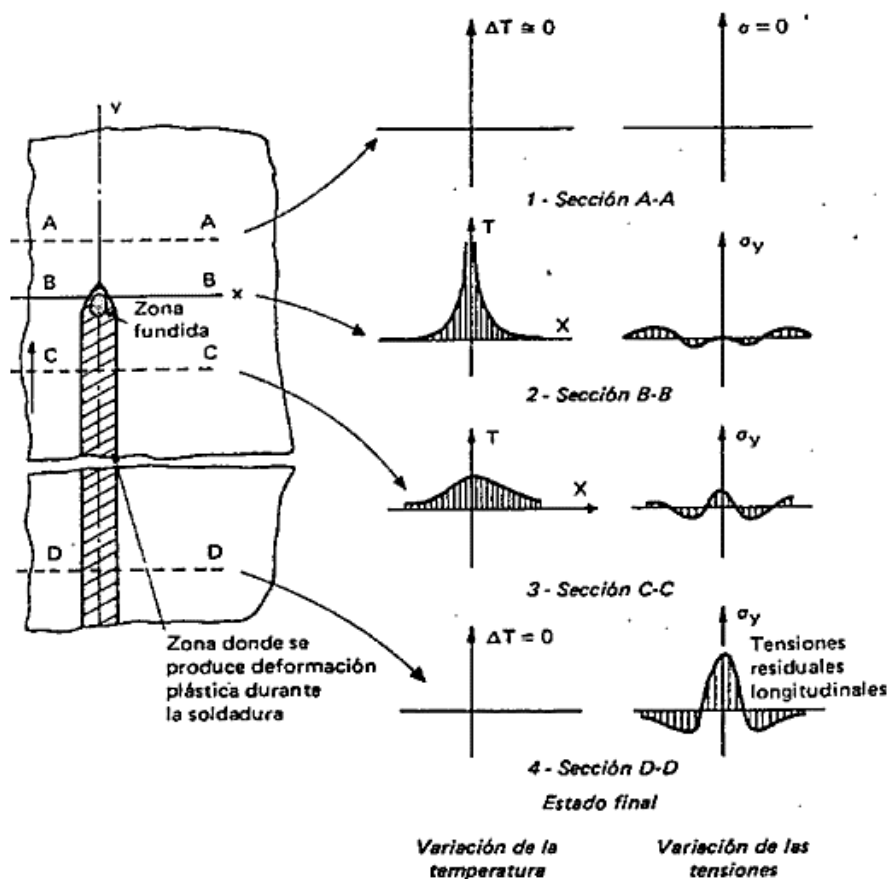


Figura 9: Estados transitorios y finales durante la soldadura.

Fuente: Metal Univers. (2006). Publicación de Metal Univers (Nº 38). España: Nova Àgora, S.

A continuación se explica (sobre la base de lo planteado por Masubushi K.) el curso de acontecimientos térmicos y movimientos de expansión contracción cuando se efectúa un cordón de soldadura sobre una chapa lo cual se puede dividir en 4 secciones, como muestra la Figura 9.

La sección A-A.

Ubicada delante de la fuente de calor todavía no ha experimentado perturbación alguna como consecuencia del arco situado en "B", por lo tanto su temperatura será la inicial "T₀" y la pieza se encuentra libre de tensiones residuales atribuibles a ese arco.

La sección B-B.

Ubicada en el centro del arco experimenta un súbito crecimiento de temperatura hasta alcanzar el valor máximo, se produce la elevación de temperatura de las zonas adyacentes. Este aumento de temperatura provoca la dilatación de las masas y consecuentemente aparecen tensiones de compresión en las zonas adyacentes al metal fundido. En las zonas más alejadas y frías, responsables de embridamiento de las zonas que se expanden aparecen tensiones de tracción para mantener el equilibrio de tensiones de la pieza. El metal fundido carece de resistencia mecánica, por lo que en el centro de la soldadura la tensión tendrá valor cero.

La sección C-C.

Estará enfriándose después de haber sido transitada por el arco en razón de la conductividad térmica del metal, tan pronto como pase el arco comenzará la evacuación del calor hacia el resto de la pieza con lo que descenderá la temperatura de la zona calentada por este. En lo que respecta al estado de tensiones se observa que al enfriarse las zonas dilatadas en condición de embridamiento, surgen tensiones de tracción en la zona de soldadura y en la zona afectada por el calor. En zonas alejadas aparecen tensiones de compresión para que se cumpla la condición de equilibrio.

La sección D-D.

Suficientemente alejada del arco como para que se haya producido el enfriamiento total, se encontrará nuevamente la temperatura inicial de la pieza, las tensiones tendrán su valor máximo final que corresponde al estado permanente definitivo de las tensiones residuales. (Fuente: Bello E., Marchena M., (2008). Determinación de los esfuerzos residuales en uniones soldadas a tope a través de la teoría de Masubushi. Trabajo Especial de Grado. Universidad de Carabobo, Carabobo Venezuela).

Es importante señalar, que durante los estados transitorios, como en la condición final, deberán satisfacerse las condiciones clásicas de equilibrio de las fuerzas y momentos totales actuantes, es decir, que la sumatoria de las fuerzas residuales es nula, lo que implica ausencia de traslación y rotación.

Las tensiones residuales surgen tanto en el plano perpendicular como en el longitudinal, siendo esta última de mayor magnitud, además a medida que se alejan de la línea de fusión de soldadura ambas disminuyen. (Ver figura 10).

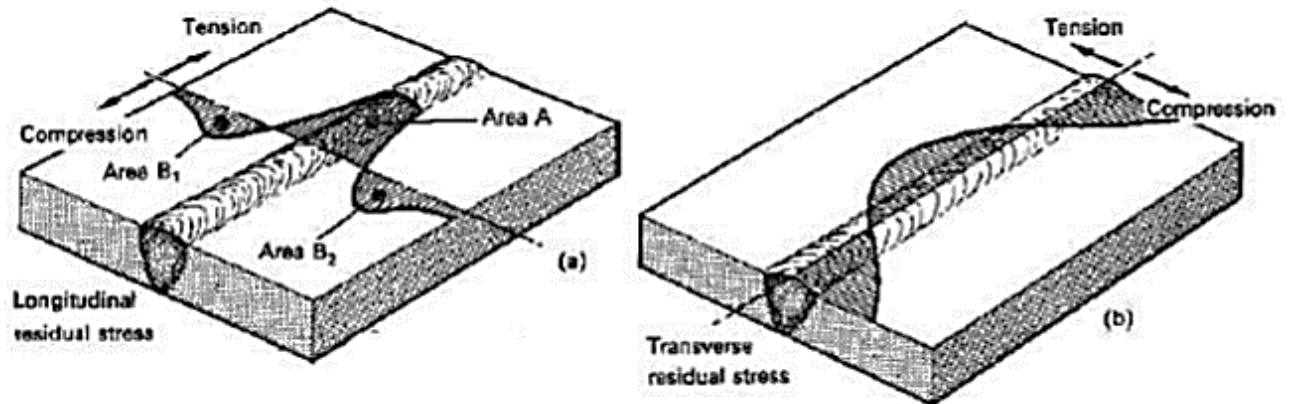


Figura 10: Distribución de tensiones residuales longitudinales y transversales de soldadura.

Fuente: Metal Univers. (2006). Publicación de Metal Univers (Nº 38). España: Nova Àgora, S.

La figura 11 muestra la deflexión que le ocurre a una barra de metal rectangular cuando se somete a un aporte de calor ya sea por el movimiento de una soldadura por arco o una antorcha de oxicorte, en la curva AB ocurre el calentamiento del material este se expande, si los esfuerzos residuales que se generan después de la expansión del metal desaparecieran se obtiene la curva B'C'D', pero como estos quedan incluidos dentro de la finalización del ciclo se obtiene la curva BCD.

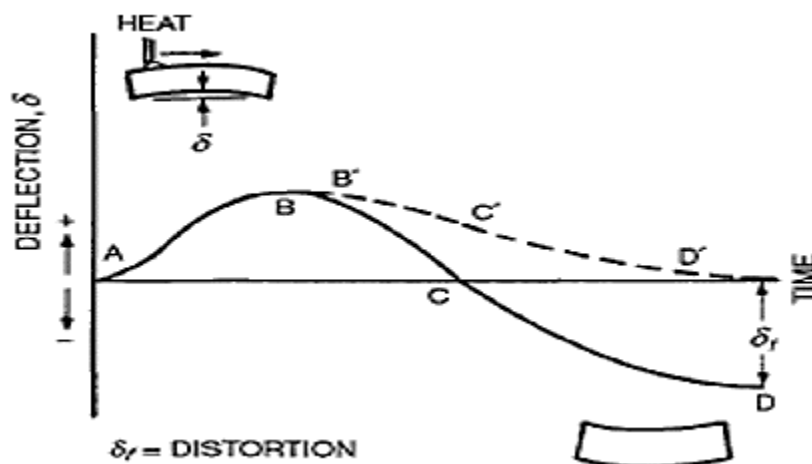


Figura 11: Tiempo de cambio del centro de deflexión de una barra de metal bajo la influencia del movimiento longitudinal de una fuente de calor.
Fuente: AWS Welding Handbook 9na Edición vol. 1, science and techno.

Al igual que en la figura 12 se observa que el metal más cercano a la fuente de calor se expande y el más lejano se contrae generándose así en el momento del enfriamiento a temperatura ambiente esfuerzos residuales.

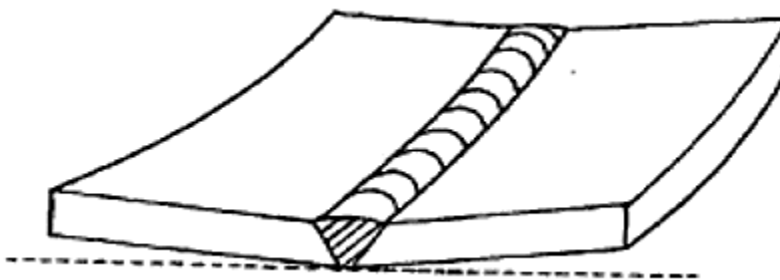


Figura 12: Representación esquemática de la distorsión ocurrida en una junta soldada en V.
Fuente: AWS Welding Handbook 9na Edición vol. 1, science and techno.

Los esfuerzos residuales se clasifican de acuerdo al mecanismo que la producen:

1. Las producidas por diferencias estructurales. (Ver Figura 13).

2. Las producidas por una desigual distribución de las tensiones no elásticas, incluyendo las tensiones plásticas y térmicas.

Parámetros	Descripción
Estructurales	*Geometría de la estructura *Espesor de la Chapa *Tipo de junta
del Material	*Material de metal base *Material del metal aporte
de Fabricación	*Procesos de soldadura *Parámetros del proceso *Parámetros de las piezas

Figura 13: Factores que contribuyen a las tensiones residuales

Fuente: Origen de las tensiones residuales en la soldadura y sus consecuencias. [on line]. Disponible en: <http://www.mg.com/trabajos36/tensiones-residuales/tensiones-residuales2.shtml> Parámetros

Lo anteriormente expuesto demuestra que cuando se utiliza el proceso de soldadura, ya sea para construir o reparar puede traer alteraciones en los materiales y/o estructuras y que numerosos autores coinciden con sus análisis de la problemática al igual que en este trabajo por lo que es considerar sus consecuencias nocivas.

Las tensiones residuales afectan en forma significativa a fenómenos que suceden a bajos niveles de aplicación de tensión, tales como: 1. Fractura frágil. 2. Fisuración por tenso corrosión. 3. Carga crítica de piezas expuestas a colapso elástico. 4. Estabilidad dimensional después del mecanizado

2.2.7.1 Métodos de Alivio de Esfuerzos Residuales

1. Alivio de Tensiones por Vía Térmica

Este tratamiento, ampliamente utilizado en la industria, consiste en calentar los conjuntos soldados hasta una temperatura inferior a la de transformación y mantenerlos en ella un tiempo suficientemente largo como para que se uniforme en toda la pieza y puedan efectuarse los reajustes dimensionales necesarios para establecer el

estado de equilibrio a los nuevos valores de la tensión de fluencia correspondiente a dicha temperatura. Las temperaturas empleadas para el tratamiento térmico de alivio de tensiones son normalmente de alrededor de 600°C para los aceros estructurales comunes y pueden llegar a 700/750°C en aceros de alta aleación a base de molibdeno.

Por otra parte, en algunos materiales no resulta aconsejable la permanencia a temperaturas del orden indicado por el riesgo de afectar desfavorablemente su aptitud para hacer frente satisfactoriamente a las solicitaciones del servicio,

2. Martillado de los Cordones de Soldadura

Este método consiste en golpear cada cordón con un mazo pesado y golpes lentos, el empleo de un mazo liviano y golpes rápidos endurece la superficie del metal, ya que no se logran deformaciones profundas, sino que fragiliza la cáscara del metal sin aliviar la tensión. En esencia, desde que la soldadura se halla en estado de tracción, si el metal es desplazado plásticamente en dirección del espesor fluirá en el plano perpendicular con lo que se producirá un efectivo alivio de las tensiones longitudinales y transversales. A pesar de su sencillez y efectividad no resulta un método de producción recomendable por la imposibilidad de cuantificar sus resultados y de asegurar la uniformidad y repetitividad de los mismos siendo por lo tanto de muy dificultoso control.

3. Aplicación de Vibraciones

Este método consiste en hacer vibrar la pieza mediante un vibrador de velocidad variable, provisto de un amplificador electrónico. Haciendo variar la velocidad puede alcanzarse la frecuencia de resonancia la que se mantiene un período de tiempo relacionado con el peso del elemento a tratar, el cual, usualmente varía entre 10 y 30 minutos.

La reducción es en función del número de ciclos de tensiones impuestos, la mejor reducción ocurre en el primer ciclo, algunas nuevas reducciones tienen lugar en algunos cientos de ciclos y una relativa pequeña reducción ocurre con un largo número de ciclos, debido a que ocurren cambios no metalúrgicos y se forman grietas de fatiga. Existe lamentablemente, un total desconocimiento científico acerca de cómo trabaja. Se cree que

la energía vibratoria introducida en la pieza reorganiza la estructura de la red cristalina con lo que alivia la tensión.

Finalmente, la efectividad del método de alivio de tensiones por vibración puede ser diferente en vibraciones en metales suaves que en metales endurecidos. El alivio de tensiones residuales por medio de vibraciones no modifica la estructura metalográfica de la soldadura ni de la zona de influencia térmica (ZIT), por lo que no deberán esperarse mejoramientos de las propiedades mecánicas de éstas con esta técnica.

4. Alivio por Explosión

El uso de sustancias explosivas para el tratamiento de cordones de soldadura por explosión es uno de los métodos de mayor perspectiva para el mejoramiento de las propiedades de las uniones soldadas, debido a la gran capacidad energética, la posibilidad de obtener gran potencia, la sencillez y lo económico de la operación.

El método se destaca por sus ventajas técnicas y económicas, el cual consiste en someter localmente la zona de soldadura a la acción directa de la detonación de una carga explosiva, lo cual garantiza la formación de un frente lineal de detonación, perpendicular al eje lineal de la carga. Durante esto en el material de la chapa se provoca, en ángulo con su superficie una onda de choque de compresión, con velocidad de masa, cuya dirección coincide con el movimiento del frente de la onda de choque. Señalando que el ángulo de este frente con respecto a la superficie de la chapa, y también su posición con respecto al frente de detonación lo determina la relación D/C (donde C - es la velocidad de la onda expansiva en el material y D - es la velocidad de detonación de la sustancia explosiva).

5. Recocido

El término recocido se refiere al tratamiento térmico de un material expuesto a elevada temperatura durante un periodo de tiempo y, luego, enfriado lentamente. Corrientemente el recocido se lleva a cabo para (1) eliminar tensiones; (2) incrementar la plasticidad, la ductilidad y la tenacidad y/o (3) producir una microestructura específica. Existen varios tratamientos térmicos de recocido caracterizados por los cambios producidos. Muchas veces se trata de cambios microestructurales, responsables de la modificación de las propiedades mecánicas.

Todo proceso de recocido consta de tres etapas: (1) calentamiento a la temperatura prevista, (2) mantenimiento o "impregnación térmica" a esta temperatura y (3) enfriamiento, generalmente hasta temperatura ambiente. El tiempo es un parámetro importante en estos procedimientos. Durante el calentamiento y el enfriamiento existen gradientes de temperatura entre el interior y la superficie de la pieza; esta magnitud depende del tamaño y geometría de la pieza. Si la velocidad de cambio de temperatura es grande, se genera un gradiente de temperatura que induce tensiones internas que pueden conducir a deformaciones e incluso al agrietamiento. El tiempo de recocido debe ser suficientemente largo para permitir la necesaria reacción de transformación.

La temperatura de recocido también es importante; el recocido se acelera al aumentar la temperatura, ya que representa un proceso de difusión. En una pieza metálica se generan tensiones internas como respuesta a: (1) los procesos de deformación plástica, tales como mecanizado y estampación; (2) enfriamiento no uniforme en piezas conformadas a elevada temperatura (soldada, moldeada, etc.); y (3) una transformación de fase, inducida por enfriamiento, en la que la fase madre y la fase producto tienen distinta densidad.

Si no se eliminan estas tensiones residuales se pueden producir distorsiones y alabeos. La eliminación se produce por un tratamiento térmico de recocido de eliminación de tensiones, en el que la pieza se calienta hasta la temperatura recomendada, se mantiene hasta alcanzar una temperatura uniforme y, finalmente, se enfría al aire hasta temperatura ambiente. Generalmente la temperatura de recocido es relativamente baja para prevenir los efectos de la deformación por enfriamiento y para no afectar a otros tratamientos térmicos.

2.2.7.2 Métodos para el Cálculo de los Esfuerzos Residuales

1. Método del Hoyo Ciego

El método del hoyo ciego (hole drilling) generalmente se describe como semidestructivo porque el daño que causa es muy localizado y muchas veces no afecta apreciablemente el desempeño de la pieza. La medición se realiza: 1. Instalando un sensor indicador de esfuerzos (galga) en la región del componente que requiere ser analizada, 2. Se taladra un pequeño agujero en el centro de la galga, 3. Se hace la lectura de los esfuerzos relajados, 4. Se calculan los esfuerzos residuales iniciales a partir de los esfuerzos relajados

siguiendo un procedimiento estandarizado. Es necesario cierto grado de preparación superficial para garantizar una correcta unión entre el sensor indicador de esfuerzos y la pieza. Es fundamental evitar al máximo eliminar mucho material de la superficie, en especial, si los esfuerzos superficiales son importantes. Además de esto se debe escoger adecuadamente el tamaño y tipo de sensor al igual que el tamaño del taladro, ya que ellos determinarán la profundidad a la cual puede realizarse la medida.

El sensor tiene como función registrar la deformación producida por la relajación de esfuerzos producto de la remoción de material generada por la creación de un agujero en la pieza. El agujero se realiza a una profundidad aproximadamente igual al diámetro de la broca. Es importante tener cuidado en el momento de hacer el agujero para evitar una alteración significativa en los esfuerzos residuales iniciales.

2. Método del Anillo Anular

El método del anillo-anular (ring core) es una técnica mecánica usada para cuantificar las tensiones residuales principales dentro de una profundidad especificada del material. La técnica se basa sobre teoría elástico lineal y consiste en el disecar de un enchufe circular que contiene una galga de tensión.

Durante la operación en que se secciona el material se releva la tensión residual en la pieza. El cambio en la tensión es supervisado por una computadora en línea en función de profundidad cortada. Se determinan las tensiones residuales principales usando el derivado de la tensión contra datos de la profundidad. La técnica del anillo-corazón se puede utilizar en los metales, cerámicos y polímeros en los que se pueda usar la ley de elasticidad lineal.

3. Microdureza

La técnica de obtención de esfuerzos residuales por ensayo de microdureza es un método al que se le puede llamar semidestructivo, pues el daño que le hace al material es extremadamente pequeño (se le realiza una perforación a la pieza con una profundidad de unas micras).

La obtención de los esfuerzos residuales con este método, se realiza basándose en la teoría de Masubuchi K. (1.980), la cual dice que la diferencia encontrada entre el esfuerzo de fluencia de un material que no ha sido afectado y el esfuerzo de fluencia de un material

afectado (térmicamente en el caso de estudio) es el esfuerzo residual remanente en el material. Por lo tanto para el método de microdureza se consigue la dureza del material afectado y del material base, a partir de esa dureza se puede obtener el esfuerzo de fluencia de cada punto de estudio y se lleva a cabo la teoría de Masubuchi.

Tomando en cuenta lo planteado por Masubuchi, se pueden obtener los esfuerzos residuales como la diferencia de los esfuerzos de fluencia entre los puntos no afectados térmicamente y los puntos afectados térmicamente por la soldadura. Los esfuerzos de fluencia se determinaron realizando ensayos de dureza y usando la relación empírica que existe entre la dureza y el esfuerzo de fluencia. Por lo antes expuesto se pudieron obtener las siguientes ecuaciones:

$$\sigma_{res} = S_{y0}$$

S_y : Es el esfuerzo de fluencia [MPa]

HV: Es la dureza Vickers [MPa]

4. Difracción de Rayos X

La difracción de rayos X (DRX) es una técnica muy versátil, no es destructiva y mide los esfuerzos macro y micro. La medición se realiza colocando la muestra en un difractómetro, exponiéndola a rayos X que interactúan con la red cristalina para generar un patrón de difracción. Los rayos X son producidos cuando partículas eléctricamente cargadas, tales como electrones, con suficiente energía cinética son rápidamente desacelerados. Cuando un rayo X alcanza la superficie de una porción es dispersada por la capa de átomos de la superficie. La porción no dispersada penetra en la segunda capa de átomos donde otra vez una fracción es dispersada y la que queda pasa a la tercera capa. El efecto acumulativo de esta dispersión desde los centros regularmente espaciados del cristal es la difracción del haz.

La técnica de DRX realmente es una técnica de medición indirecta porque lo que verdaderamente mide es la deformación interpretada como la variación en la distancia interplanar relativa entre planos cristalinos, esta deformación causa cambios en el espaciamiento reticular desde su valor libre de esfuerzos a un nuevo valor que corresponde a la magnitud del esfuerzo aplicado. Un material está libre de esfuerzos cuando el valor de la distancia interplanar es independiente de la orientación de estos planos con respecto a la

función de la orientación del plano respecto

5. Método de la Curvatura

El método de la curvatura es una técnica destructiva y solo mide los esfuerzos macro. La deposición de una capa puede inducir esfuerzos que causan que el sustrato se curve, entonces, si la película está bajo esfuerzos de compresión tratará de expandirse y deformará al sustrato creándole una curvatura; en este caso el recubrimiento quedará en el lado convexo; si en cambio la película tiene un esfuerzo de tracción, tratará de contraerse,

quedando en el lado cóncavo de la curvatura. El cambio resultante en la curvatura durante la deposición de una capa hace posible calcular la correspondiente variación en esfuerzos como una función del espesor de la película depositada. El radio de la curvatura del sustrato

6. Método del Ultrasonido

El método del ultrasonido en la ingeniería es utilizado para el ensayo de los materiales, es una técnica de ensayo no destructivo (END) y tiene diversas aplicaciones, en especial para conocer el interior de un material o sus componentes según la trayectoria de la propagación de las ondas sonoras, al procesar las señales de las ondas sonoras se conoce el comportamiento de las mismas durante su propagación en el interior de la pieza y que dependen de las discontinuidades del material examinado, lo que permite evaluar aquella discontinuidad acerca de su forma, tamaño, orientación, debido que la discontinuidad opone resistencia (conocida como impedancia acústica) al paso de una onda. Las ondas pueden ser sónicas comprendidas en el intervalo de frecuencias entre 20 y 500 kHz y las ultrasónicas con frecuencias superiores a 500 kHz. En este método se utilizan instrumentos que transmiten ondas con ciertos intervalos de frecuencia y se aplican para detectar defectos como poros, fisuras, también para conocer las propiedades básicas de los líquidos y sólidos como la composición, estructura.

El análisis de los materiales mediante ultrasonido se basa en el principio físico: El movimiento de una onda acústica. Es sabido que la onda acústica es afectada por el medio a través del cual viaja y se distinguen los siguientes tipos: onda longitudinal, transversal y superficial (Rayleigh), según se muestra en la Figura 14, debido a ello ocurren los cambios asociados con el paso de una onda sonora de alta frecuencia a través de un material en uno o más de los cuatro parámetros siguientes: tiempo de tránsito, atenuación, reflexión y frecuencia. Estos parámetros a menudo pueden estar correlacionados con los cambios de las propiedades físicas, dureza, módulo de elasticidad, densidad, homogeneidad, estructura y grano del material.

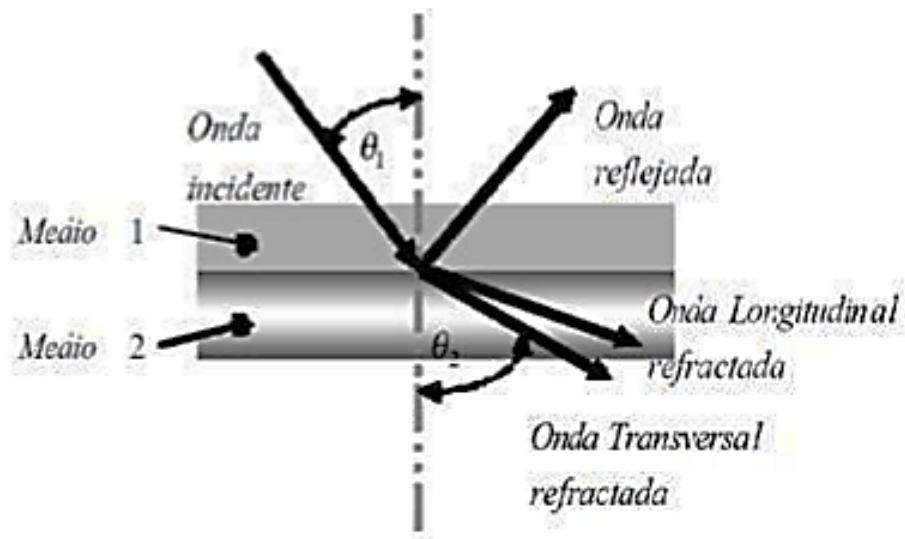


Figura 14: Transmisión de onda en dos medios diferentes.
Fuente: Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad de Carabobo.
 Vol. 8. UNMSM 2.005.

2.2.8 Ensayos Mecánicos

2.2.8.1 Ensayos de Dureza

La dureza de un material es la resistencia que se opone a la penetración de un cuerpo más duro. La resistencia se determina introduciendo un cuerpo de forma esférica, cónica o piramidal; el efecto que produce una fuerza determinada durante cierto tiempo en el material a ensayar indica su dureza. Como indicador de dureza se emplea la deformación permanente (plástica) del material.

Existen tres tipos de ensayo de dureza que son: dureza Rockwell, dureza Brinell y dureza Vickers. Todos los ensayos mantienen el mismo principio que es el de medir la huella dejada por un indentador, el cual varía dependiendo del ensayo realizado. (Ver Figura 15).

1. Dureza Rockwell

Para los materiales duros se emplea como elemento de penetración un cono de diamante de ángulo 120° , y para los semiduros y blandos una bolita de acero de $1/16''$, deduciéndose la fuerza Rockwell de la profundidad conseguida en la penetración. El cuerpo

empleado para la penetración se hace incidir sobre la superficie de la pieza a ensayar con carga previa de 10 Kg. La profundidad de penetración alcanzada constituye el valor de partida para la medición de la profundidad de la huella. Después se aumenta en 140 Kg la carga aplicada al cono (150 Kg), y en 90 Kg la aplicada a la bolita (100 Kg), bajándose nuevamente el valor previo. Se mide la profundidad de penetración que queda y en la escala del aparato se lee directamente la correspondiente dureza Rockwell C (HRc) cono o la Rockwell B (HRb) bolita.

2. Dureza Brinell

Este ensayo consiste en oprimir una bola de acero endurecido contra una probeta. De acuerdo con las especificaciones de la ASTM (ASTM E 10), las estipulaciones de las cuales se siguen aquí, se acostumbra usar una bola de 10 mm y una carga de 3.000 Kg, para metales duros, 1.500 Kg para metales de dureza intermedia y 500 Kg para materiales suaves.

El número de dureza de Brinell es nominalmente la presión por área unitaria (Kg/mm^2), de la huella que queda después de retirar la carga; se obtiene dividiendo la carga aplicada por el área de la superficie de la huella, la cual se supone esférica. Si P es la carga aplicada (Kg), D es el diámetro de la bola de acero (mm), y d es el diámetro de la huella (mm), entonces el número de dureza Brinell será:

$$HB = \frac{2P}{D[D - (D_2 - d_2)](1/2)} \quad \text{Ec.3}$$

3. Dureza Vickers

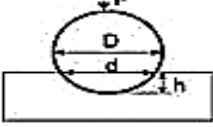
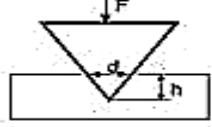
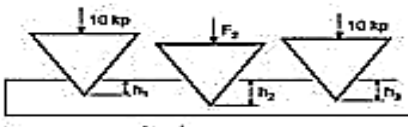
Para obtener la dureza Vickers de la superficie de un material se presiona contra la pirámide se mantiene algún tiempo bajo la carga P. Luego de retirada la carga se miden las dos diagonales de la impronta dejada, con ayuda de un microscopio. El valor medio de las diagonales (d) y el valor de la carga se sustituyen en la fórmula de trabajo para obtener el valor de la dureza Vickers.

$$HV = \frac{P}{A} = \frac{P}{\frac{d^2}{2 \sin \alpha/2}} = \frac{2P \sin \alpha/2}{d^2} \quad \text{Ec.4}$$

siguiente fórmula de trabajo

$$HV = 1,8544 \frac{P}{d^2} \quad \text{Ec.5}$$

El valor de dureza Vickers (HV) se expresa normalmente como: 440 HV 100 ésta notación indica una dureza Vickers de 440 bajo carga de 100 gramos aplicada por un tiempo de 10 a 15 s.

TIPO DE ENSAYO	BRINELL HB	VICKERS HV	ROCKWELL	
			HRB	HRC
Tipo de material	no muy duros	muy duros	blandos	duros
Penetrador	Bola de acero templado	pirámide regular de diamante	bola de acero	cono de acero con punta de diamante
Medida	superficie de la huella	superficie de la huella	profundidad de la huella	
Valor de dureza (resultado del ensayo)	$HB = F/S \text{ (Kg/mm}^2\text{)}$  $S = \pi D h = \pi D \frac{1}{2} (D - \sqrt{D^2 - d^2})$ Valor dureza igual sólo si $F = K \cdot D^2$	$HV = F/S \text{ (Kg/mm}^2\text{)}$  $S = 4 \cdot \frac{d \cos 45^\circ \cdot h}{2} = \frac{d^2}{2 \tan 65^\circ}$	$HRB = 130 - e$ $HRC = 100 - e$  $e = \frac{h_2 - h_1}{0,002}$ (h_1 y h_2 en mm)	
Ventajas e inconvenientes	Válido para la mayoría de los aceros. Si las deformaciones son pequeñas el margen de error es grande. Hay que medir con un microscopio la diagonal de la huella.	Es más exacta que Brinell pero más cara.	es el ensayo más rápido y sencillo pero también el menos preciso (no mide superficie de la huella, sólo su profundidad). El aparato de medida suele dar ya el resultado (no hace falta medir profundidades).	

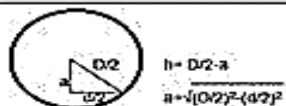


Figura 15: Tipos de ensayos de dureza.
Fuente: Fernández A. (2010)

2.2.8.2 Ensayo de Tracción

Este ensayo consiste en someter una muestra, denominada probeta, de sección uniforme y conocida, a una fuerza de tracción que va aumentando progresivamente. En forma

simultánea se van midiendo los correspondientes alargamientos de la probeta. En este ensayo se coloca la probeta en una máquina especial, (ver Figura 16), que consiste en dos (2) mordazas, una fija y una móvil. Se procede a medir la carga mientras se aplica el desplazamiento de la mordaza móvil. El ensayo de tracción es el apropiado para uso general en el caso de la mayoría de los metales y aleaciones no ferrosas, fundidas, laminados o forjados.

La máquina para realizar el ensayo de tracción impone la deformación desplazando el cabezal móvil a una velocidad seleccionada. La celda de carga conectada a la mordaza fija entrega una señal que representa la carga aplicada, algunas máquinas poseen una impresora que gráfica en un eje el desplazamiento y en el otro eje la carga leída. En la mayoría de los materiales de ingeniería, la curva tendrá una región elástica lineal, en la cual la deformación es reversible e independiente del tiempo.

Con los resultados de la elongación de la probeta, se puede graficar una curva de carga contra alargamiento, que generalmente se registran como valores de esfuerzo y deformación unitarios, y son independientes de la geometría de la probeta (ver figura 17).



Figura 16: Máquina para el Ensayo de Tracción
Fuente: Laboratorio Trexa, C.A. (2017)

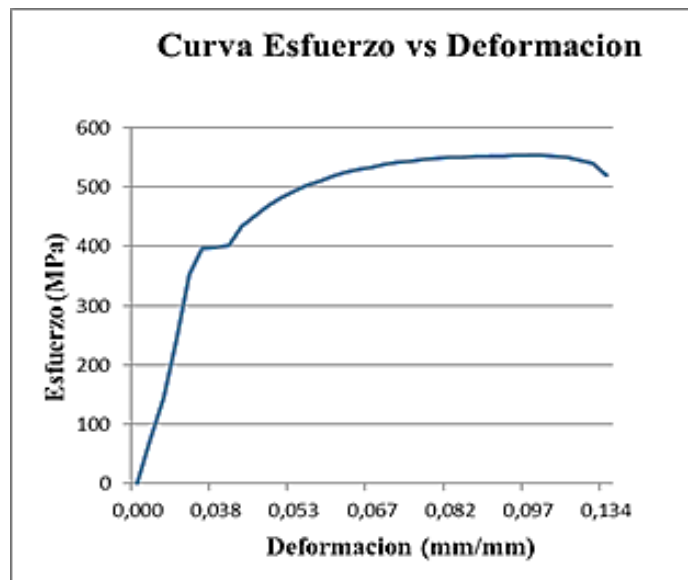


Figura 17: Grafico esfuerzo vs deformación
Fuente: Laboratorio de Materiales
Facultad de Ingeniería Universidad de Carabobo

Las probetas se mecanizan según la norma E8 de la ASTM, tomando en cuenta que el espesor del material base es de 3,17 mm se considera la pieza como “sub espécimen” por lo que se indica que las probetas deben tener las medidas que se muestran en la figura 18.

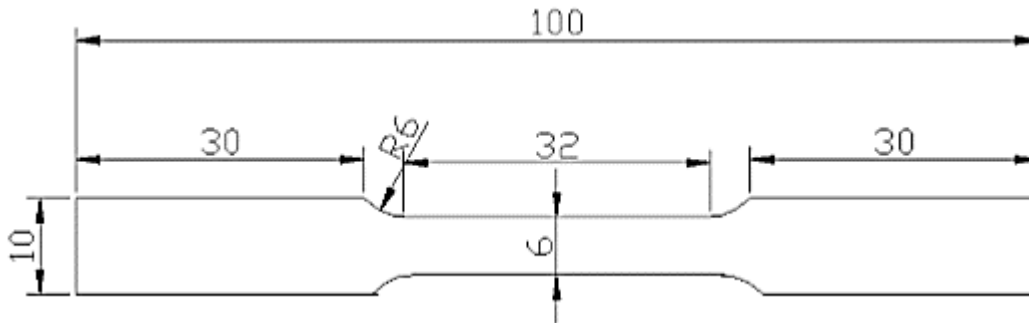


Figura 18: Dimensiones de probetas para ensayo de tracción. (Unidades en mm)

Fuente: Lamus-Turipe (2.017)

Para el caso de estudio es necesario permanecer en la zona elástica del material, se debe calcular la carga máxima que se utilizará en la máquina de tracción, también se utiliza la mínima velocidad que permite el equipo que es de 2 mm/min. El cálculo de la carga a utilizar y las operaciones a seguir para conseguir los esfuerzos residuales se explican a continuación: Primero se debe buscar el esfuerzo de fluencia para el acero AISI 1018, en la figura 5 se puede ver que es 370 MPa, luego se determina el área de la sección transversal de la sección calibrada de la probeta, apoyados en la figura 8 se calcula el área de la sección transversal calibrada como:

$$A = e \cdot a \quad \text{Ec.6}$$

Donde:

A : Es el área de la sección transversal de la zona calibrada de la probeta (mm^2).

e : Es el espesor de la probeta en la zona calibrada (mm).

a : Es el ancho de la zona calibrada de la probeta (mm)

Resolviendo se tiene que el área de la sección transversal de la sección calibrada de la probeta es:

$$A = 3,17 \text{ mm} \cdot 6 \text{ mm} = 19,05 \text{ mm}^2$$

Con la siguiente ecuación se calcula la carga de fluencia.

$$P_f = S_y \cdot A \quad \text{Ec.7}$$

Donde:

S_y : Es el esfuerzo de fluencia del material (370 MPa).

A : Es el área de la sección transversal de la sección calibrada de la probeta (mm²).

P_f : Es la carga para la cual el material con el área transversal (A) llega a su esfuerzo de fluencia.

Por lo que el valor de la carga de fluencia es:

$$P_f = S_y \cdot 19,05 = 7.049 \text{ N}$$

Con los valores obtenidos en los ensayos de tracción se buscan los valores de carga necesarios para realizar el mismo desplazamiento en todas las probetas, se selecciona un valor que se encuentre en la zona elástica del material, en este caso es de 0,75 mm. La diferencia existente entre las cargas de las probetas testigos y las probetas no testigos será la carga residual, estos valores de carga residual se dividen entre el área de la sección transversal de las probetas para obtener los esfuerzos residuales.

Lo anterior se puede expresar como:

$$P_{res} = P_T - P_{NT} \quad \text{Ec.8}$$

Luego:

$$\sigma_{res} = \frac{P_{res}}{A} \quad \text{Ec.9}$$

Donde:

P_{NT} : Es la carga necesaria para lograr un desplazamiento de 0,75 mm en las probetas no tratadas térmicamente (N).

P_T : Es la carga necesaria para lograr un desplazamiento de 0,75 mm en las probetas tratadas térmicamente (N).

P_{res} : Es la carga residual (N).

A : Es el área de la sección transversal de la probeta en la zona calibrada (mm²).

σ_{res} : Es el esfuerzo residual (MPa).

2.2.9 Ensayos Metalográficos

La metalografía es la parte de la metalurgia que estudia las características estructurales o de constitución de los metales y aleaciones, para relacionarlas con las propiedades físicas, mecánicas y químicas de los mismos. La importancia del examen metalográfico radica en que, aunque con ciertas limitaciones, es capaz de revelar la historia del tratamiento mecánico y térmico que ha sufrido el material.

A través de este estudio se pueden determinar características como el tamaño de grano, distribución de las fases que componen la aleación, inclusiones no metálicas como sopladuras, micro cavidades de contracción, escorias, etc., que pueden modificar las propiedades mecánicas del metal. En general a partir de un examen metalográfico bien practicado es posible obtener un diagnóstico y/o un pronóstico.

2.2.9.1 Macroscopía

Es la forma más sencilla de realizar un estudio, este consta en examinar la superficie metálica a simple vista, pudiendo determinar de esta forma las características macroscópicas, del cual se puede obtener datos sobre los tratamientos mecánicos sufridos por el material (es decir se puede determinar si el material fue trefilado, laminado, forjado, etc.) o determinar la distribución de defectos (grietas superficiales, rechupes, porosidades, partes soldadas, etc.). Guzmán F. (2.016).

2.2.9.2 Microscopia.

Este ensayo se basa en la amplificación de la superficie mediante instrumentos ópticos (microscopio), para observar características estructurales microscópicas (micro-estructura). Este tipo de examen permite realizar el estudio o controlar el proceso térmico al que ha sido sometido el metal, debido a que los mismos nos ponen en evidencia la estructura o los cambios estructurales que sufren es dicho proceso. Guzmán F. (2.016).

2.3 Definición de Términos Básicos

ASTM: American Society for testing and Materials.

AWS: American Welding Society.

SAE: Sociedad Norteamericana de Ingenieros Automotores (Society of Automotive Engineers).

SMAW: Shield Metal ArcWelding (Soldadura por arco con electrodo revestido)

Hv: Dureza Vickers

mm: Milímetros

kN: Kilo Newton

Amp: Amperios

MPa: Mega Pascal

Cs: Cordón de soldadura

Mb: Material base

ZAC: Zona afectada por el cordón de soldadura

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1 Tipo de Investigación

Según Arias F. (2.012): “La Investigación experimental es un proceso que consiste en someter a un objeto o grupo de individuos, a determinadas condiciones, estímulos o tratamiento (variable independiente), para observar los efectos o reacciones que se producen (variable dependiente), para observar los efectos o reacciones que se producen (variable dependiente)” y “La investigación documental es un proceso en la búsqueda, recuperación, análisis, crítico e interpretación de datos secundarios, es decir, los obtenidos y registrados por otros investigadores en fuentes documentales: impresos, audiovisuales o electrónicos. Como en toda investigación, el propósito de este diseño es el aporte de nuevos conocimientos”. Este estudio es una investigación experimental y documental ya que se buscaron referencias previas y se realizaron una serie de ensayos mecánicos y metalúrgicos ya normalizados al material antes y luego de ser sometido al proceso de soldadura SMAW. También puede decirse que esta investigación se define como una investigación fundamental, por tener como finalidad servir de base para futuras investigaciones, es una investigación explicativa ya que además de obtener los valores de las variables estudiadas, se estudia la relación que existe entre estas para lograr conocer el efecto que tiene la intensidad de corriente en los esfuerzos residuales causados por la soldadura a tope por arco eléctrico revestido en acero AISI 1018.

3.2 Nivel de la Investigación.

La investigación es de nivel descriptivo ya que se centra en medir con la mayor precisión posible los distintos fenómenos a estudiar en dicho trabajo, buscando especificar sus propiedades y características a partir de un modelo o criterio definido previamente, con el fin de arrojar los mejores resultados posibles, teniendo en cuenta que es esencial el reconocimiento de los niveles a estudiar, durante el tiempo destinado a la realización de la investigación. Según Arias F. (2.012): “La investigación descriptiva consiste en la

caracterización de un hecho, fenómeno, individuo o grupo, con el fin de establecer su estructura o comportamiento. Los resultados de este tipo de investigación se ubican en un nivel intermedio en cuanto a la profundidad de los conocimientos se refiere.”

3.3 Diseño de Investigación

Según Arias F. (2012): “El diseño de investigación es la estrategia general que adopta el investigador para responder al problema planteado. En atención al diseño, la investigación se clasifica en: documental, de campo y experimental”

El diseño de investigación que identifica este trabajo, es el de tipo experimental ya que busca controlar variables, para describir la situación y hechos que se pueden presentar, estableciendo un comportamiento de dicho conjunto de variables y así lograr establecer las causas para caracterizar las juntas soldadas de estudio, con el fin de establecer su microestructura y comportamiento mecánico, de esta manera realizar el análisis comparativo entre los distintos tipos de electrodos buscando verificar el comportamiento mecánico de dichos electrodos con el material base.

3.4 Población y Muestra

Según Arias (2012): “la población, o en términos más precisos población objetivo, es un conjunto finito o infinito de elementos con características comunes para los cuáles serán extensivas las conclusiones de la investigación. Esta queda delimitada por el problema y por los objetivos del estudio”. (p.81). “La muestra es un subconjunto representativo y finito que se extrae de la población accesible” (Arias, 2012, p. 83). Tomando esto de referencia tenemos que la muestra es un grupo que será seleccionado en la zona de estudio del proyecto que representara a la población total.

La población estará definida por una lámina de Acero AISI 1018 de 3 mm de espesor. Las muestras fueron conformadas por conjuntos soldados por placas de acero AISI 1018. La muestra está constituida por 50 probetas, de las cuales la mitad serán probetas testigos, éstas serán sometidas a un tratamiento térmico posterior a la soldadura con el objetivo de remover los esfuerzos residuales creados por la misma, las otras 25 probetas serán llamadas no testigo y permanecerán con los esfuerzos inducidos por la soldadura.

3.5 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos.

Arias (2.012) afirma:

“Una vez efectuada la operacionalización de las variables y definidos los indicadores, es hora de seleccionar las técnicas e instrumentos de recolección de datos pertinentes para verificar las hipótesis o responder a las interrogantes formuladas. Todo en correspondencia con el problema, los objetivos y el diseño de Las técnicas que se emplearon para recolectar la información fueron bajo observación directa, y la data de los ensayos destructivos y no destructivos.”

3.6 Técnicas de Procesamiento y Análisis de Datos.

Una vez organizados los datos obtenidos de cada ensayo, se procedió a aplicar técnicas de procesamiento de datos tales como tablas, imágenes y gráficos con el fin de determinar las tendencias de la información registrada, se realizaron comparaciones para establecer de esta manera las diferencias que presentaron cada muestra.

El procesamiento y análisis de estos datos estuvo dado de acuerdo a las normas que se mencionaran más adelante en el procedimiento experimental, referidas a cada ensayo o pruebas realizadas. Estas normas refieren parámetros y guías.

3.7 Fases de Desarrollo de la Investigación

El desarrollo de la presente investigación está comprendido por una serie de fases que permitirán dar respuesta a los objetivos planteados en un determinado orden, brindando a los investigadores una herramienta para la planificación y mejor aprovechamiento del tiempo dedicado al proyecto.

3.7.1. Fases Metodológicas.

Fase I: Establecer los parámetros de trabajo para la ejecución de la soldadura del proceso SMAW.

El procedimiento experimental se inicia con la caracterización del material base a manipular en la investigación, el cual es una lámina de Acero AISI 1018 de 3,18 mm de espesor. La composición química típica de este acero se presenta en la Figura 5 y se certificará experimentalmente con una análisis químico y con los ensayos de tracción, microdureza y microscopia.

Fase II: Obtener valores experimentales de los esfuerzos residuales globales por medio del método de microdureza.

A partir de los valores obtenidos, se traducen los valores de dureza HV a valores en MPa, luego tomando en cuenta la relación empírica existente entre la dureza y el esfuerzo de fluencia de los aceros, se utilizará la teoría de Masubuchi, con esto se obtienen los valores de esfuerzo residual.

Fase III: Obtener valores experimentales de los esfuerzos residuales utilizando el ensayo de tracción.

El ensayo de tracción se realizará con la Máquina para ensayo de tracción del laboratorio de la empresa Trexa. El ensayo se realiza siguiendo la norma E8 de la ASTM. Se realizará el ensayo de tracción a cinco probetas de cada grupo, adicionalmente se realiza el ensayo a cinco probetas testigos, estas probetas fueron sometidas a un tratamiento térmico con la finalidad de remover los esfuerzos residuales producidos por la soldadura.

Fase IV: Hallar la relación entre el amperaje empleado en el proceso de soldadura y los esfuerzos residuales provocados por el mismo.

Tomando en consideración los valores de esfuerzos residuales obtenidos, se tomará como punto de estudio el ubicado a 4 mm con respecto al centro del cordón de soldadura, se selecciona esta distancia porque este es el punto más cercano al cordón de soldadura fuera de la zona de fusión, asegurando que el punto se encuentra en la zona afectada por el calor.

Fase V: Comparación entre métodos utilizados para determinar los esfuerzos residuales

Se realizó una gráfica en la que se muestran los resultados obtenidos tanto por el método de microdureza como por el método del ensayo de tracción. También se presenta una tabla comparativa con estos valores y se calcula la diferencia porcentual que se presenta entre los métodos utilizados. A partir de los valores mostrados se realiza la gráfica en cuestión, la cual como se mostrará relacionan finalmente los amperajes utilizados en el proceso de soldadura con los esfuerzos residuales remanentes en la pieza.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

En este capítulo se analizaron los resultados obtenidos en los diversos ensayos tanto destructivos como no destructivos. Con el fin de comprobar si las uniones soldadas presentan algún tipo de defecto y de esta manera determinar cuál de las intensidades de corriente exponen el menor valor de esfuerzo residual respecto al acero AISI 1018.

4.1 Establecer los parámetros de trabajo para la ejecución de la soldadura del proceso SMAW

4.1.1 Caracterización del Material Base.

El procedimiento experimental se inició con la caracterización del material base a manipular en la investigación, el cual es una lámina de Acero AISI 1018 de 3,17 mm de espesor. La composición química de este acero se presenta en la figura 3 y se certificará experimentalmente con un análisis químico, los ensayos de tracción, microdureza y microscopía. (ver apéndice 1)

Se le realizó un análisis de la composición química al acero utilizado en los ensayos para así corroborar que se corresponde con un acero AISI 1018, el resultado general es el mostrado en la tabla 1

Tabla 1. Resultado del análisis por fluorescencia de Rayos X

Nombre	Clase	Fecha	Hora	Duración
Probeta M	<u>Alloy_L_E_FP</u>	14/03/2018	11:36:49	8,5s
Elemento	Si%	Mn%	Fe%	
	0,67	0,16	99,17	
±	0,139	0,034	0,357	
Grados: C-1018 (0,05), C-1020 (0,19), C-1026(0,60), TS L-2(0,76), TS O-6 (0,92)				

Nombre	Clase	Fecha	Hora	Duración		
Probeta M	<u>Alloy_L_E_FP</u>	14/03/2018	11:38:00	8,6s		
Elemento	Si%	Cr%	Mn%	Fe%	Co%	Sn%
	0,70	0,05	0,31	98,60	0,26	0,08
±	0,134	0,010	0,023	0,348	0,044	0,024

Fuente: Lamus-Turipe (2.018)

El equipo utilizado por la Universidad Simón Bolívar (Espectrómetro Marca OXFORD Instruments, Modelo X-Met 7500, Ver figura 20) que realizó el estudio del análisis químico para el material base arrojó los resultados mostrados en la tabla 1.



Figura 19: Espectrómetro Marca OXFORD Instruments, Modelo X-Met 7500
Fuente: Lamus - Turipe(2018)



Figura 20: Análisis Químico
Fuente: Lamus – Turipe (2018)

Microscopía para caracterizar el material base.

A continuación se presenta en las dos fotos de la Figura 21 la microestructura del material base.



Figura 21: Microestructura del material base a 100X y 200X de aumento.
Fuente: Lamus-Turipe (2018)

Observación: En las fotos de la figura 21 se puede observar una matriz ferrítica (parte clara) con pequeñas colonias de perlita (parte oscura). Esta distribución indica que se trata de un acero de bajo contenido de carbono.

Análisis de microdureza para caracterizar el material base.

Se procede a realizar un ensayo de microdureza Vickers al material base con el fin de determinar las propiedades mecánicas básicas del material y de esta forma asegurar que los valores se encuentran en los rangos mostrados en la Figura 3. En la sección 2.2.7.2 se explica la forma en que se obtienen valores de microdureza.

Se utilizan relaciones empíricas que relacionan la dureza de un material con el límite de fluencia del mismo, de forma de calcular éste valor y compararlo con los valores sugeridos para el acero AISI 1018. Es de suma importancia que los valores de dureza y esfuerzo de fluencia del material base se encuentren en un rango permisible con respecto a los valores

que indican la norma, ya que estos valores y la modificación que estos sufran, gracias al proceso de soldadura, serán los usados para calcular los esfuerzos residuales.

Las mediciones se realizan con el microdurómetro marca Buehler modelo Indentamet serie 1100 ubicado en el laboratorio de materiales y procesos de fabricación de la facultad de ingeniería de la Universidad de Carabobo. (Ver Figura 22).



Figura 22: Microdurómetro Buehler.
Fuente: Lamus-Turipe (2.008)

Los valores obtenidos por el ensayo de dureza Vickers en el material base, será utilizado para obtener el esfuerzo de fluencia. Este valor se utilizará en la Ec.1 para la obtención del esfuerzo residual en cada punto de estudio en la probeta.

Antes de realizar las mediciones se debe preparar la superficie de la probeta, esto se logra con un desbastado progresivo con lijas desde una lija de grano 240 pasando por una de grano 400 hasta una de grano 600. Esta preparación se hace con el fin de poder crear y posteriormente visualizar una buena huella con el indentador. Se realizan mediciones de dureza Vickers usando un indentador de forma piramidal de base cuadrada con una carga de 100 g y un tiempo de carga sostenida de 10 segundos, después de verificar que la huella tiene la apariencia correcta se prosigue a tomar las medidas en los puntos antes mencionados.

Para realizar el ensayo de microdureza Vickers se procedió a realizar la indentación al material base, y cuyo resultado se puede observar en la tabla 2.

Tabla 2: Valores de dureza Vickers (HV) para Material base (carga de ensayo 100 g).

1	145,51
2	137,32
3	142,72
4	139,58
5	137,11
Promedio Dureza	140,11

Fuente: Lamus-Turipe (2018).

Este valor de dureza se lleva a valores en MPa multiplicándolo por 9,807; luego usando la relación empírica que dice que la dureza HV de un material es aproximadamente tres veces el esfuerzo de fluencia del mismo, se obtendrá el esfuerzo del metal base a partir de su dureza HV. (Ver Tabla 3).

Tabla 3: Valores de dureza Vickers (HV), Dureza (MPa) y Esfuerzo de fluencia para material base.

Dureza HV promedio (HV)	140,11
Dureza HV promedio (MPa)	1.374
Esfuerzo de fluencia (MPa)	458

Fuente: Lamus-Turipe (2018).

Ensayo de Tracción para caracterizar el material base.

El ensayo fue realizado en la Empresa Trexa. En la Figura 22 se muestra la maquina empleada para la realización de dicho ensayo.

Se procedió a realizar el ensayo de tracción para conocer las propiedades mecánicas del material estudiado. Durante la realización del ensayo se miden repetidamente las cargas aplicadas y el alargamiento que presenta la probeta para luego generar la curva de Esfuerzos vs deformación unitaria (Ver Figura 24).

Los parámetros del ensayo se tabularon en la siguiente tabla:

Tabla 4: Parámetros del ensayo.

Sección nominal	18,91	mm ²
Longitud base	100	mm
Inicio de cálculo	30,0	%
Final de cálculo	60,0	%
Límite elástico	0,2	%

Fuente: Lamus-Turipe (2018)

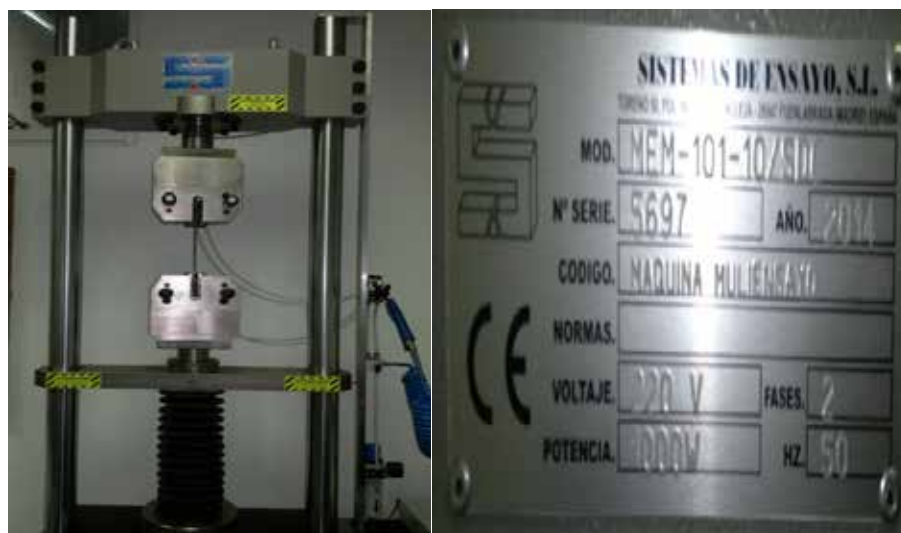


Figura 23: Máquina para ensayo de tracción Sistemas de Ensayo, S.I.

Fuente: Laboratorio de Materiales Empresa TREXA C.A (2.018)

Cálculos tipo:

Esfuerzo de fluencia: $S_y = \frac{P}{A_0}$

$$S_y = \frac{7828}{18,91 \text{ mm}^2} = 414 \text{ MPa}$$

Deformación Unitaria: $\delta = \frac{L_f - L_0}{L_0}$

$$\delta = \frac{62,3 \text{ mm} - 50 \text{ mm}}{50 \text{ mm}} 100 = 24,6$$

Esfuerzo Máximo: $\sigma = \frac{P_i}{A_i}$

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{P_{m\acute{a}x}}{A_i} = \frac{9930 \text{ N}}{18,91 \text{ mm}^2} = 525,12 \text{ MPa}$$

Esfuerzo de Ruptura $S_u = \frac{P_{rup}}{A_i} = \frac{8509 \text{ N}}{18,91 \text{ mm}^2} = 450 \text{ MPa}$

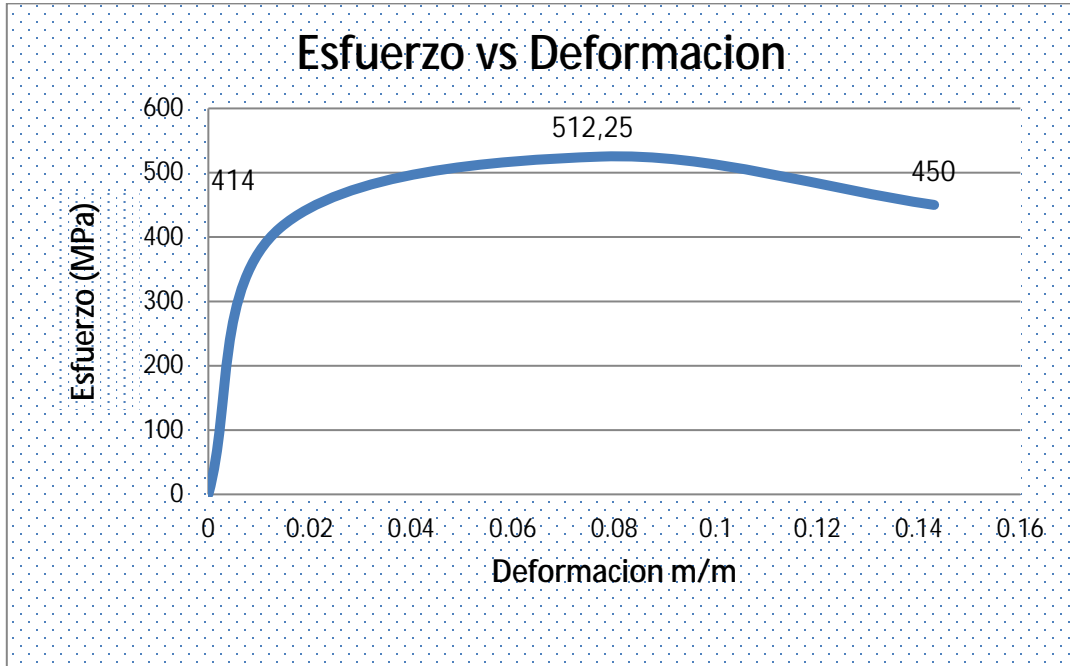


Figura 24: EsFuerzo vs Deformación material base
Fuente: Lamus-Turipe (2018)

Tabla 5: Propiedades Mecánicas del material sin soldar

Fuerza máxima ($F_{m\acute{a}x}$)	N	9930
Resistencia tracción	MPa	525,12
Alargamiento carga máxima	% L_0	7,33
Fuerza de rotura (F_{rot})	N	8509
Resistencia de rotura	MPa	450
Alargamiento rotura	% L_0	10,66
Fuerza límite elástico	N	7828
Límite elástico	MPa	414

Deformación límite elástico	%L _o	1,41
Módulo elástico	GPa	208,29
Rel Fza máxima/Fza límite		1,46

Fuente: Lamus-Turipe (2018)

4.2 Obtener valores experimentales de los esfuerzos residuales globales por medio del método de microdureza.

El procedimiento experimental para medir los esfuerzos residuales comienza por la preparación de las probetas. En la figura 25 se puede observar las dimensiones de las probetas.

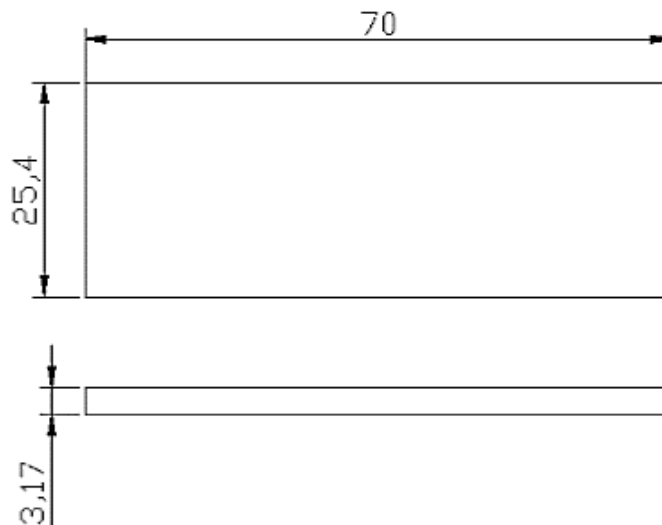


Figura 25: Dimensiones de la probeta a soldar. (Unidades en mm).
Fuente: Lamus-Turipe (2.018)

Construcción de la Soldadura

Las probetas fueron soldadas a tope, mediante el método de arco eléctrico con electrodo revestido (SMAW) E-6013. Se soldaron cinco grupos con diferentes intensidades de corriente, cada grupo está conformado por diez probetas. Los amperajes seleccionados corresponden al rango de amperajes recomendados por la AWS para el electrodo seleccionado E6013 con un diámetro de 1/8". Los amperajes a utilizar son: 80, 90, 100, 110 y 120 A. En la tabla 5 se observa el tiempo de soldado de cada probeta según su amperaje y al final de cada uno el tiempo promedio de soldado para cada amperaje en segundos.

Tabla6: Tiempo de la soldadura de cada pieza según el amperaje utilizado (en segundos)

	80 A	90 A	100 A	110 A	120 A
TIEMPO EN SEGUNDOS	8,7	7,95	6,81	5,02	4,09
	8,98	7,89	6,9	5,05	4,33
	8,63	8,3	6,68	5,32	4,69
	11,12	8,59	7,86	5,04	3,43
	8,38	8,45	6,71	5,33	3,82
	8,81	8,51	6,74	5,04	3,71
	9,01	8,53	6,71	5,07	3,52
	8,54	8,6	6,82	5,3	3,82
	8,9	7,81	6,94	5,1	3,7
	8,8	8,02	7,01	5,07	3,67
PROMEDIO	8,98	8,25	6,91	5,13	3,87

Fuente: Lamus-Turipe (2.018)

Tratamiento Térmico

Después de realizar la soldadura, se realizó un tratamiento térmico a las 20 probetas testigos con el fin de aliviar las tensiones residuales creadas por la soldadura. Se sometieron las probetas a un tratamiento térmico de recocido completo a 850 °C con enfriamiento dentro del horno. Este proceso se realizó en el Laboratorio de Materiales de la Universidad José Antonio Páez.



Figura 26: Tratamiento térmico a las probetas testigos. (850 °C).
Fuente: Universidad José Antonio Páez Lamus-Turipe (2.018)

Identificación de los Puntos de Medición de Microdureza

Las mediciones de microdureza se realizaron en los puntos identificados en la figura 27. Estos puntos se seleccionan tomando en cuenta la norma E18-03 de la ASTM en la que especifica que la distancia mínima entre indentaciones tiene que ser de por lo menos el doble del valor de la diagonal de la indentación anterior. Para lograr mediciones sistemáticas se realizan mediciones a una distancia de 6 mm del borde de la probeta y de forma paralela a 8 y a 10 mm del borde de la probeta, esto con la finalidad de asegurar que las mediciones se realizarán en la zona donde el gradiente térmico se considera constante. Luego se toman mediciones a cada 2 mm a partir del cordón de soldadura en ambas direcciones del mismo hasta llegar a una distancia de 30 mm de separación del cordón.

Ensayo de Microdureza

Se realizaron mediciones a tres probetas de cada grupo, dando como resultado un total de 261 (doscientos sesenta y uno) mediciones por cada grupo. De estas mediciones se sacan los promedios equivalentes a cada punto de medición. Las mediciones se realizan con el microdurómetro marca Buehler modelo indentamet serie 1100 ubicado en el laboratorio de materiales de la facultad de ingeniería de la Universidad de Carabobo.

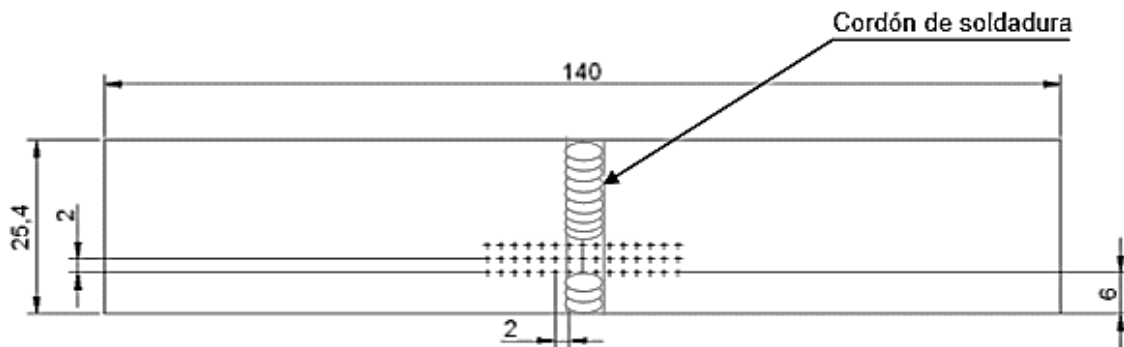


Figura 27: Distribución de los puntos de medición. (Unidades en mm).

Fuente: Lamus-Turipe (2.018)

Antes de realizar las mediciones se debe preparar la superficie de la probeta, esto se logra con un desbastado progresivo con lijas desde una lija de grano 240 pasando por una de grano 400 hasta una de grano 600. Esta preparación se hace con el fin de poder crear y posteriormente visualizar una buena huella con el indentador. Se realizan mediciones de dureza Vickers usando un indentador de forma piramidal de base cuadrada con una carga de 100 g y un tiempo de carga sostenida de 10 segundos, después de verificar que la huella tiene la apariencia correcta se prosigue a tomar las medidas en los puntos antes mencionados.

Obtención de los Esfuerzos Residuales

Tomando en cuenta lo planteado por Masubuchi K. (1.980) en su trabajo titulado “Analysis of welded structures: Residual stresses, distortion and their consequences”, se pueden obtener los esfuerzos residuales como la diferencia de los esfuerzos de fluencia entre los puntos no afectados térmicamente y los puntos afectados térmicamente por la soldadura. Los esfuerzos de fluencia se determinaron realizando ensayos de dureza y usando la relación empírica que existe entre la dureza y el esfuerzo de fluencia. Por lo antes expuesto se pudieron obtener las siguientes ecuaciones:

$$\sigma_{res} = S_{y0} - S_{ysold} \quad \text{Ec.1}$$

Dónde:

σ_{res} : Es el esfuerzo residual en el punto de medición [MPa]

S_{y0} : Es el límite de fluencia del material base [MPa]

S_{ysold} : Es el límite de fluencia en el punto afectado térmicamente por la soldadura [MPa].

El valor de S_{y0} se toma de la Tabla 3, ensayo de microdureza Vickers en el material base, que resultó igual a 458 MPa.

A continuación se presentan los resultados obtenidos relacionados con la dureza. Se conoce que se realizaron por cada juego de probetas (cada juego equivale a tres probetas a 5 amperajes de soldado diferente) la cantidad de 93 (noventa y tres) puntos de dureza.

Estos puntos se dividen en 3 líneas de 22 puntos cada una por probeta, dando un total de 9 líneas donde fue medida la dureza.

Tabla 7: Valores de dureza Vickers (HV) promedios para las probetas soldadas con 80 A (carga de ensayo 100 g)

Distancia al cordón (mm)	Distancia al borde de la probeta (mm)		
	6	8	10
-30	142,4	140,6	138,8
-28	135,3	137,6	139,9
-26	138,5	135,45	141,4
-24	130,8	133,2	135,6
-22	129	132,1	135,2
-20	134,6	131,5	128,5
-18	145,2	149,3	153,4
-16	154,1	151,8	149,5
-14	131,99	135,29	138,59
-12	132,40	118,77	143,47
-10	114,47	130,63	136,63
-8	122,43	107,97	122,97
-6	94,80	113,97	108,33
-4	102,27	115,80	104,37
-2	134,77	138,30	107,60
0	119,63	118,37	98,00
2	107,13	104,53	113,57
4	116,07	110,43	127,47
6	111,87	110,67	105,50

8	99,67	128,10	96,47
10	134,93	113,07	119,30
12	113,87	88,17	129,57
14	126,17	112,70	129,15
16	160,8	158,70	156,6
18	164,3	167,5	170,7
20	174,05	177,15	180,25
22	171,32	174,27	177,22
24	168,58	171,38	174,18
26	147,8	150,60	153,4
28	166,75	169,45	172,15
30	185,7	188,3	185,7

Fuente: Lamus-Turipe (2.018)

Tabla 8: Valores de dureza Vickers (HV) promedios para las probetas soldadas con 90 A (carga de ensayo 100 g)

Distancia al cordón (mm)	Distancia al borde de la probeta (mm)		
	6	8	10
-30	148,2	150,5	152,8
-28	161,48	163,68	165,88
-26	174,66	176,86	179,06
-24	159,8	163	166,2
-22	145,94	149,14	152,34
-20	144,8	148,2	151,6
-18	136,8	139,9	143
-16	127,2	130,6	134
-14	134,8	138,2	141,6
-12	133,57	145,80	135,45

-10	139,73	139,07	146,80
-8	110,80	147,27	112,47
-6	113,83	103,43	127,63
-4	109,63	105,77	111,80
-2	117,77	121,70	91,80
0	136,67	122,67	116,43
2	120,90	99,77	121,57
4	101,40	99,77	114,17
6	108,87	124,90	125,10
8	114,37	145,77	144,57
10	140,20	133,57	140,47
12	144,27	129,43	140,70
14	134,27	121,00	141,57
16	128,1	131,50	134,9
18	132,15	135,35	138,55
20	136	139,2	142,4
22	139,15	142,55	145,95
24	141,13	144,23	147,33
26	132,8	145,90	159
28	134,55	147,7	160,85
30	136,35	149,50	162,65

Fuente: Lamus-Turipe (2.018)

Tabla 9: Valores de dureza Vickers (HV) promedios para las probetas soldadas con 100 A (carga de ensayo 100 g)

Distancia al cordón (mm)	Distancia al borde de la probeta (mm)		
	6	8	10
-30	115,82	128,97	142,12
-28	127,39	140,54	153,69
-26	138,95	152,1	165,25
-24	137,31	150,46	163,61
-22	139,28	152,43	165,58
-20	146,65	153,4	160,15
-18	148,05	154,8	161,55
-16	150,45	155,2	159,95
-14	144,25	148,9	153,55
-12	137,95	142,60	146,75
-10	127,35	107,93	145,80
-8	146,87	105,53	139,07
-6	133,80	118,63	135,67
-4	73,97	89,80	88,70
-2	99,77	99,33	107,73
0	122,10	77,93	114,93
2	99,47	65,10	112,33
4	106,03	103,73	103,80
6	129,33	128,17	100,17
8	109,03	123,67	135,80
10	126,13	130,93	120,40
12	107,30	125,57	126,10
14	119,63	136,87	121,83
16	145,8	152,30	158,8

18	151,33	157,83	164,33
20	156,85	163,35	169,85
22	159,54	166,24	172,94
24	161,64	168,34	175,04
26	171,12	177,85	184,58
28	159,2	165,93	172,66
30	147,25	154,00	160,75

Fuente: Lamus-Turipe (2.018)

Tabla 10: Valores de dureza Vickers (HV) promedios para las probetas soldadas con 110 A (carga de ensayo 100 g)

Distancia al cordón (mm)	Distancia al borde de la probeta (mm)		
	6	8	10
-30	152,29	154,45	156,61
-28	153,06	155,23	157,4
-26	153,84	156	158,17
-24	150,2	152,38	154,56
-22	146,56	148,75	150,94
-20	139,34	141,5	143,66
-18	134,82	137,00	139,18
-16	130,31	132,5	134,69
-14	122,21	124,37	126,53
-12	139,00	116,23	137,17
-10	138,10	140,43	138,53
-8	137,90	135,30	139,20
-6	116,17	120,60	116,00
-4	110,67	104,57	101,80

-2	130,63	100,30	125,87
0	117,30	129,37	115,03
2	127,90	129,77	133,33
4	117,50	115,63	116,97
6	107,03	114,10	122,90
8	120,90	145,60	133,90
10	139,77	154,53	130,83
12	137,67	145,23	132,83
14	139,00	135,65	146,17
16	137,84	140,00	142,17
18	137,42	139,60	141,78
20	137,01	139,20	141,39
22	139,89	142,05	144,21
24	142,72	144,90	147,08
26	148,41	150,60	152,79
28	158,29	160,45	162,61
30	168,13	170,3	172,47

Fuente: Lamus-Turipe (2.018)

Tabla 11: Valores de dureza Vickers (HV) promedios para las probetas soldadas con 120 A (carga de ensayo 100 g)

Distancia al cordón (mm)	Distancia al borde de la probeta (mm)		
	6	8	10
-30	171,04	173,2	175,37
-28	165,57	167,75	169,93
-26	160,11	162,3	164,49
-24	159,86	162,02	164,18

-22	159,55	161,73	163,91
-20	158,96	161,15	163,34
-18	151,74	153,90	156,06
-16	144,48	146,65	148,82
-14	123,7	125,90	128,07
-12	130,50	105,15	110,60
-10	130,90	129,03	129,87
-8	103,00	88,70	107,33
-6	111,17	99,87	120,47
-4	128,13	84,20	110,33
-2	120,83	106,23	110,60
0	122,37	109,73	97,60
2	117,23	128,60	111,80
4	127,80	113,50	130,03
6	117,20	106,53	113,23
8	128,70	122,43	111,07
10	121,17	135,87	121,13
12	126,07	147,03	133,83
14	131,73	148,60	152,70
16	124,44	126,60	128,77
18	125,77	127,95	130,13
20	127,11	129,30	131,49
22	131,92	134,08	136,24
24	136,67	138,85	141,03
26	146,21	148,40	150,59
28	142,84	145,00	147,16
30	139,43	141,60	143,77

Fuente: Lamus-Turipe (2.018)

Con los valores de las tablas anteriores se realiza una tabla final donde se encuentra el resultado de promediar los valores obtenidos de la siguiente manera: cada punto de estudio tiene relacionado una distancia al centro del cordón de soldadura y una distancia al borde de la probeta, para cada distancia – cordón fueron tomados tres valores distancia – borde. Se tomó el promedio de los tres valores distancia – borde y cada valor promedio fue usado en la creación de la tabla 11.

Por ejemplo, para la distancia – cordón de 6 mm en la tabla 11 se le adjudican los tres valores siguientes: 107,03, 114,10 y 122,90. A estos valores se les sacó un promedio dando como resultado 114,68 HV el cual está reflejado en la tabla 11. Representando el valor final de dureza para 6 mm de distancia con respecto al cordón de soldadura para la probeta soldada con 110 A.

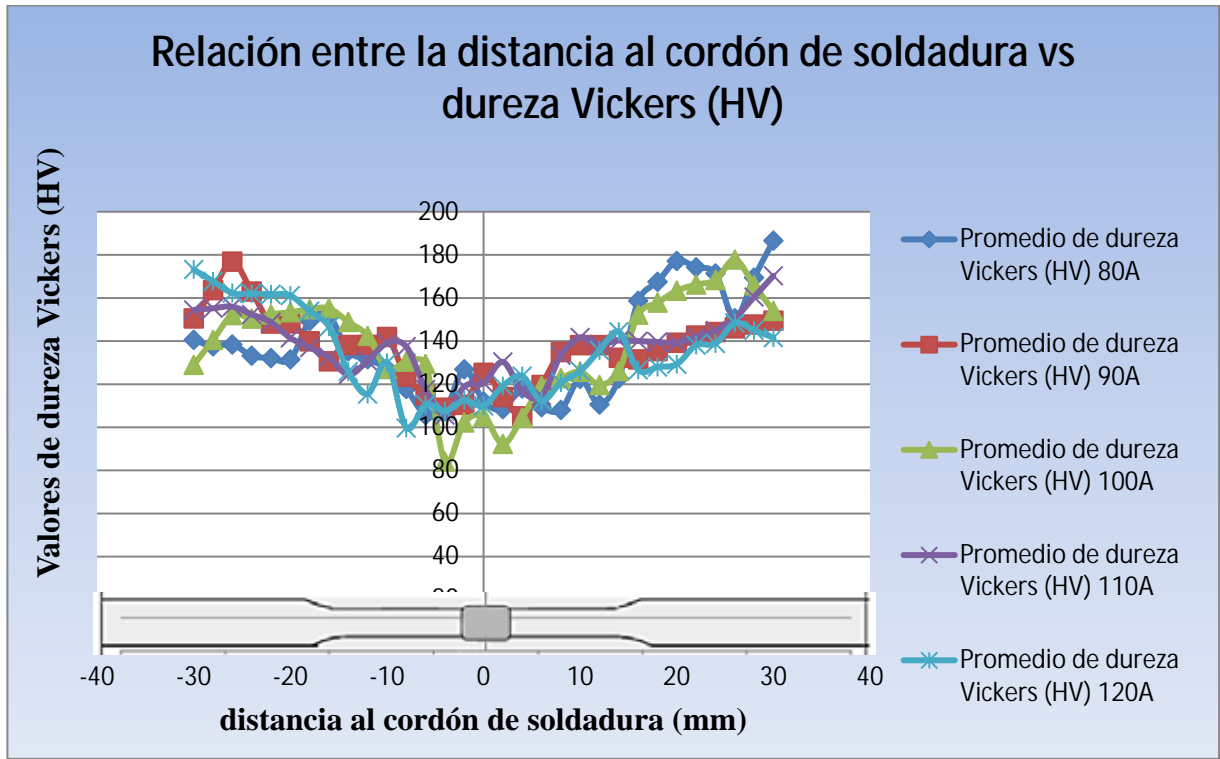
Tabla 12: Valores de dureza Vickers (HV) promedios a lo largo de la pieza para cada amperaje de estudio (carga de ensayo 100 g)

Distancia al cordón (mm)	Promedio de dureza Vickers (HV)				
	80A	90A	100A	110A	120A
-30	140,6	150,5	128,97	154,45	173,2
-28	137,6	163,68	140,54	155,23	167,75
-26	138,45	176,86	152,1	156	162,3
-24	133,2	163	150,46	152,38	162,02
-22	132,1	148,14	152,43	148,75	161,73
-20	131,53	148,2	153,4	141,5	161,15
-18	149,3	139,9	154,8	137	153,9
-16	151,8	130,6	155,2	132,5	146,65
-14	135,29	138,2	148,9	124,37	125,89

-12	131,55	138,27	142,43	130,8	115,42
-10	127,24	141,87	127,03	139,02	129,93
-8	117,79	123,51	130,49	137,47	99,68
-6	105,7	114,96	129,37	117,59	110,5
-4	107,48	109,07	84,16	105,68	107,55
-2	126,89	110,42	102,28	118,93	112,55
0	112	125,26	104,99	120,57	109,9
2	108,41	114,08	92,3	130,33	119,21
4	117,99	105,11	104,52	116,7	123,78
6	109,35	119,62	119,22	114,68	112,32
8	108,08	134,9	122,83	133,47	120,73
10	122,43	138,08	125,82	141,71	126,06
12	110,54	138,13	119,66	138,58	135,64
14	122,67	132,28	126,11	140,27	144,34
16	158,7	131,5	152,3	140	126,6
18	167,5	135,35	157,83	139,6	127,95
20	177,15	139,2	163,35	139,2	129,3
22	174,27	142,55	166,24	142,05	138,08
24	171,38	144,23	168,34	144,9	138,85
26	150,6	145,9	177,85	150,6	148,4
28	169,45	147,7	165,93	160,45	145
30	186,57	149,5	154	170,3	141,6

Fuente: Lamus-Turipe (2.018)

A partir de estos valores se realiza la Gráfica la cual relaciona la distancia a partir del cordón de soldadura en milímetros con respecto a la dureza obtenida en cada punto en número de Vickers (HV).(ver grafica 1)



Grafica 1 Relación entre la distancia del cordón de soldadura (mm) y la dureza Vickers (HV)

Fuente: Lamus-Turipe (2.018)

Tabla 13: Valores de dureza HV promedios (MPa) a lo largo de la pieza para cada amperaje de estudio

Distancia al cordón (mm)	Dureza Vickers (MPa)				
	80A	90A	100A	110A	120A
-30	1378,86	1475,95	1264,81	1514,69	1698,57
-28	1353,66	1605,21	1378,28	1522,34	1645,12
-26	1328,36	1734,47	1491,64	1529,89	1591,68
-24	1309,04	1598,84	1502,92	1458,79	1586,09
-22	1299,33	1531,07	1508,61	1423,29	1583,24
-20	1289,62	1463,20	1514,20	1387,69	1580,40

-18	1389,16	1372,00	1518,12	1343,56	1509,30
-16	1488,70	1280,79	1522,05	1299,43	1438,20
-14	1389,36	1318,45	1459,48	1291,09	1285,11
-12	1290,01	1356,01	1396,81	1282,76	1131,92
-10	1247,84	1391,32	1245,78	1363,37	1274,22
-8	1155,17	1211,26	1279,72	1348,17	977,56
-6	1036,60	1127,51	1268,73	1153,21	1083,67
-4	1054,06	1069,65	825,36	1036,40	1054,84
-2	2323,18	2161,66	2081,83	2245,12	2182,65
0	2177,15	2307,19	2108,41	2261,20	2156,56
2	2141,95	2197,55	1983,96	2356,92	2247,86
4	1157,13	1030,81	1025,03	1144,48	1213,91
6	1072,30	1173,11	1169,19	1124,67	1101,52
8	1059,94	1322,96	1204,59	1308,94	1184,00
10	1200,67	1354,15	1233,92	1389,75	1236,27
12	1083,97	1354,64	1173,51	1359,05	1330,22
14	1320,22	1322,18	1333,56	1366,02	1285,89
16	1556,37	1289,62	1493,61	1372,98	1241,57
18	1646,89	1327,38	1547,84	1369,06	1254,81
20	1737,31	1365,13	1601,97	1365,13	1268,05
22	1607,17	1397,99	1673,07	1421,03	1361,70
24	1542,05	1414,46	1708,67	1448,98	1408,58
26	1476,93	1430,84	1744,17	1476,93	1455,36
28	1661,80	1448,49	1627,28	1573,53	1422,02
30	1846,66	1466,15	1510,28	1670,13	1388,67

Fuente: Lamus-Turipe (2.018)

Tabla 14: Valores de esfuerzos de fluencia (MPa) a lo largo de la pieza para cada amperaje de estudio, obtenidos de valores de dureza HV

Distancia al cordón (mm)	Esfuerzo de Fluencia(MPa)				
	80A	90A	100A	110A	120A
-30	459,62	491,98	421,60	504,90	566,19
-28	451,22	535,07	459,43	507,45	548,37
-26	442,79	578,16	497,21	509,96	530,56
-24	436,35	532,95	500,97	486,26	528,70
-22	433,11	510,36	502,87	474,43	527,75
-20	429,87	487,73	504,73	462,56	526,80
-18	463,05	457,33	506,04	447,85	503,10
-16	496,23	426,93	507,35	433,14	479,40
-14	463,12	439,48	486,49	430,36	428,37
-12	430,00	452,00	465,60	427,59	377,31
-10	415,95	463,77	415,26	454,46	424,74
-8	385,06	403,75	426,57	449,39	325,85
-6	345,53	375,84	422,91	384,40	361,22
-4	351,35	356,55	275,12	345,47	351,61
-2	774,39	720,55	693,94	748,37	727,55
0	725,72	769,06	702,80	753,73	718,85
2	713,98	732,52	661,32	785,64	749,29
4	385,71	343,60	341,68	381,49	404,64
6	357,43	391,04	389,73	374,89	367,17
8	353,31	440,99	401,53	436,31	394,67
10	400,22	451,38	411,31	463,25	412,09
12	361,32	451,55	391,17	453,02	443,41
14	440,07	440,73	444,52	455,34	428,63

16	518,79	429,87	497,87	457,66	413,86
18	548,96	442,46	515,95	456,35	418,27
20	579,10	455,04	533,99	455,04	422,68
22	535,72	466,00	557,69	473,68	453,90
24	514,02	471,49	569,56	482,99	469,53
26	492,31	476,95	581,39	492,31	485,12
28	553,93	482,83	542,43	524,51	474,01
30	615,55	488,72	503,43	556,71	462,89

Fuente: Lamus-Turipe (2.018)

Esfuerzos Residuales por Ensayo de Dureza

A partir de los valores obtenidos en la tabla 9, se transformaron los valores de dureza HV a valores en MPa, luego tomando en cuenta la relación empírica existente entre la dureza y el esfuerzo de fluencia de los aceros, se llevó a cabo la teoría de Masubuchi, con esto se obtienen los valores de esfuerzo residual. Las siguientes tablas muestran los valores obtenidos siguiendo los pasos anteriores.

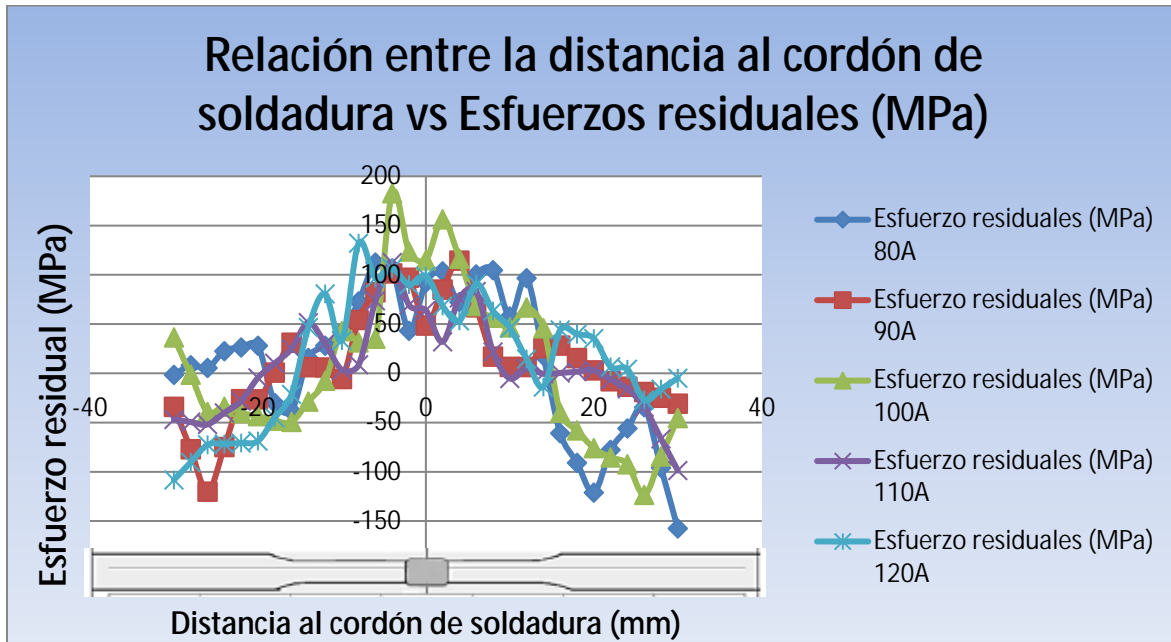
Tabla 15: Valores de esfuerzos residuales (MPa) a lo largo de la pieza para cada amperaje de estudio, obtenidos de valores de dureza HV

Distancia al cordón (mm)	Esfuerzo Residuales (MPa)				
	80A	90A	100A	110A	120A
-30	-1,62	-33,98	36,4	-46,9	-108,19
-28	8,19	-77,07	-1,43	-49,45	-90,37
-26	5,41	-120,16	-39,21	-51,96	-72,56
-24	22,57	-74,85	-33,85	-40,13	-71,64
-22	26,17	-26,27	-40,29	-28,26	-70,7

-20	28,03	-26,47	-43,46	-4,56	-68,8
-18	-30,06	0,67	-48,04	10,15	-45,1
-16	-38,23	31,07	-49,35	24,86	-21,4
-14	15,74	6,22	-28,75	51,43	46,47
-12	27,96	6	-7,6	30,41	80,69
-10	42,05	-5,77	42,74	3,54	33,26
-8	72,94	54,25	31,43	8,61	132,15
-6	112,47	82,2	35,09	73,6	96,78
-4	106,65	101,45	182,88	112,53	106,42
-2	43,2	97,04	123,65	69,22	90,07
0	91,87	48,53	114,79	63,86	98,74
2	103,61	85,07	156,27	31,95	68,3
4	72,29	114,4	116,32	76,51	53,36
6	100,53	66,96	68,27	83,11	90,83
8	104,69	17,01	56,47	21,69	63,33
10	57,78	6,62	46,69	-5,25	45,91
12	96,64	6,45	66,83	4,98	14,59
14	17,93	25,58	45,75	-0,54	-13,85
16	-60,79	28,13	-39,87	0,34	44,14
18	-90,96	15,54	-57,95	1,65	39,73
20	-121,1	2,96	-75,99	2,96	35,32
22	-77,72	-8	-85,44	-6,36	6,62
24	-56,02	-13,49	-92,3	-15,68	4,1
26	-34,31	-18,95	-123,39	-34,31	-27,12
28	-95,93	-24,83	-84,43	-66,51	-16,01
30	-157,55	-30,72	-45,43	-98,71	-4,89

Fuente: Lamus-Turipe (2.018)

De igual manera como para la tabla de dureza HV, a partir de los valores mostrados en la tabla 14 se realizó la gráfica que relaciona la distancia desde el cordón de soldadura (en milímetros) con el esfuerzo residual (MPa) existente para tales puntos, como se muestra en la gráfica 2



Grafica 2 Relación entre la distancia al cordón de soldadura (mm) y el esfuerzo residual (MPa).

Fuente: Lamus-Turipe (2.018)

4.3. Obtener valores experimentales de los esfuerzos residuales utilizando el ensayo de tracción.

El ensayo de tracción se realizó con la Máquina para ensayo de tracción. (Máquina: SISTEMA DE ENSAYOS, Modelo: MEN – 101 / SDC. Fabricación: Española. Esfuerzo Máximo: 3000 KN) de la Empresa TREXA C.A. El ensayo se realiza siguiendo la norma E8 de la ASTM.

El ensayo de tracción arrojó valores de carga (N) y los valores del desplazamiento en (mm) correspondiente para cada carga. Se tomarán los valores de carga para un desplazamiento constante de 0,75 mm de las probetas que fueron sometidas al ensayo. Estos valores se muestran a continuación.

Tabla 16: Cargas para desplazamiento de 0,75mm en ensayo de tracción para todos los amperajes y probetas tratadas térmicamente

Carga (N) para Desplazamiento de 0,75 mm						
Probeta	80A	90A	100A	110A	120A	TT
1	2.990	3.350	2.213	2.540	3.100	5.400
2	2.980	3.400	2.320	3.265	3.300	5.250
3	2.926	3.200	1.900	3.262	3.250	4.900
4	2.960	3.300	2.230	2.438	3.350	5.350
5	2.990	3.250	2.110	2.850	3.250	5.100
Promedio	2.969,20	3.300	2154,60	2.871	3.250	5.200

Fuente: Lamus-Turipe (2.018)

Usando los valores promedios de la tabla anterior, y sustituyéndolos en la Ec.8 se obtienen los siguientes valores de cargas residuales.

Tabla 17: Cargas residuales para los diferentes amperajes

AMPERAJES (A)					
	80	90	100	110	120
Cargas Residuales (N)	2.230,8	1.900	3.045,4	2.329	1.950

Fuente: Lamus-Turipe (2.018)

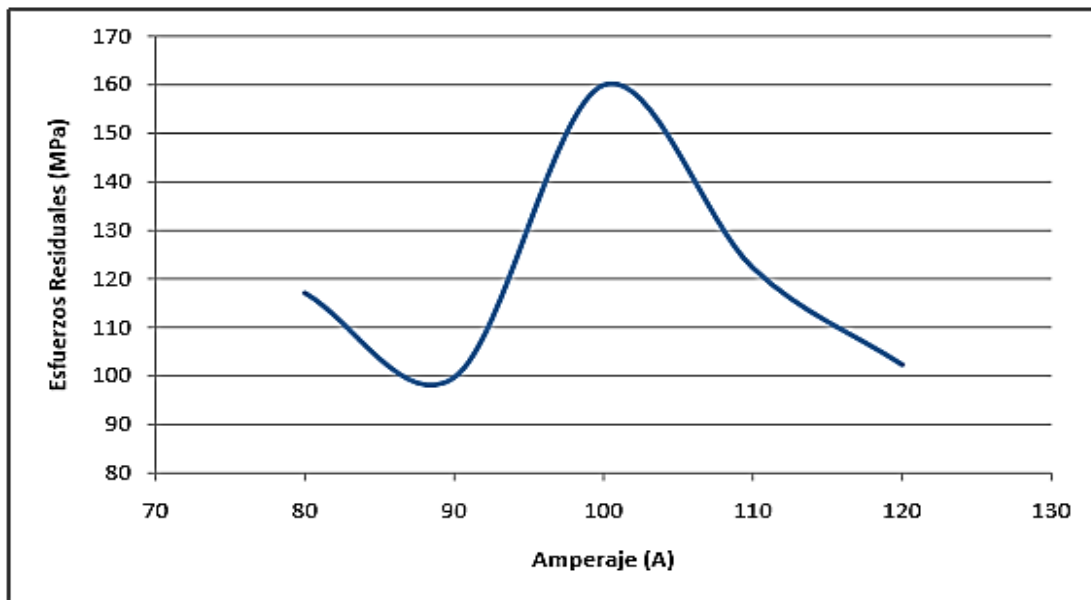
Con los valores de cargas residuales y con la Ec.9 se obtienen los valores de esfuerzos residuales para los diferentes amperajes, y se muestran en la tabla 18.

Tabla 18: Esfuerzos residuales para los diferentes amperajes.

AMPERAJES (A)					
	80	90	100	110	120
Esfuerzos Residuales (MPa)	117,10	99,74	159,86	122,26	102,36

Fuente: Lamus-Turipe (2.018)

En la tabla 16 se observan las cargas “residuales” que no son más que la resta de la carga necesaria en las piezas tratadas térmicamente con las no tratadas. A partir de esos valores se obtiene la tabla 17 que indica los esfuerzos residuales obtenidos por medio del ensayo de tracción, con los valores de dicha tabla se construye la gráfica que representa los esfuerzos residuales vs el amperaje de soldadura, esto se puede apreciar en la gráfica 3.



Grafica 3 Relación entre amperaje y esfuerzo residual obtenidos por ensayo de tracción.

Fuente: Lamus-Turipe (2.018)

4.4 Hallar la relación entre el amperaje empleado en el proceso de soldadura y los esfuerzos residuales provocados por el mismo.

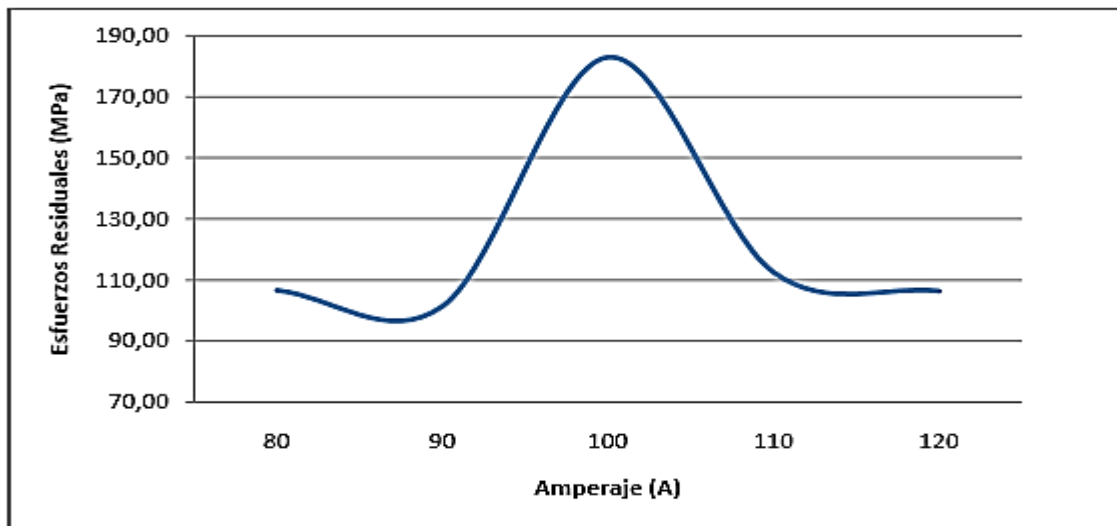
Tomando en consideración los valores de esfuerzos residuales obtenidos, se tomó como punto de estudio el ubicado a -4 mm con respecto al centro del cordón de soldadura, se selecciona esta distancia por varias razones, la primera es que como se puede observar en la Grafica 3 los valores obtenidos a -4 mm del centro del cordón de soldadura son los valores más parecidos a los obtenidos por el ensayo de tracción, es decir, arrojan los valores más parecidos a los esfuerzos residuales globales. Otra razón para escoger este punto es que es el punto más cercano al cordón de soldadura fuera de la zona de fusión, asegurando que el punto se encuentra en la zona afectada por el calor. Se tomaron los datos del mismo punto para todos los amperajes y con ello se obtuvo la siguiente tabla.

Tabla 19: Valores de esfuerzos residuales (MPa) para todos los amperajes a 4 mm del cordón de soldadura.

Distancia del centro del cordón 4 mm	Amperaje				
	80A	90A	100A	110A	120A
Esfuerzo Residual (MPa)	106,65	101,45	182,88	112,53	106,39

Fuente: Lamus-Turipe (2.018)

A partir de los valores mostrados se realiza la gráfica 4, la cual como muestra la tabla 18, relaciona finalmente los amperajes utilizados en el proceso de soldadura con los esfuerzos residuales remanentes en la pieza.



Gráfica 4 Relación entre amperaje y esfuerzo residual para el punto ubicado a 4mm del centro del cordón de soldadura.

Fuente: Lamus-Turipe (2.018)

4.5: Comparación entre métodos utilizados para determinar los esfuerzos residuales

Por otra parte, a partir de las tablas 17 y 18, se genera la tabla 19 con el propósito de comparar fácilmente los valores de esfuerzos residuales obtenidos a partir de los dos tipos de ensayos realizados. Se muestran los valores de esfuerzos residuales para los diferentes amperajes de soldadura y la diferencia porcentual entre los resultados obtenidos por ambos métodos.

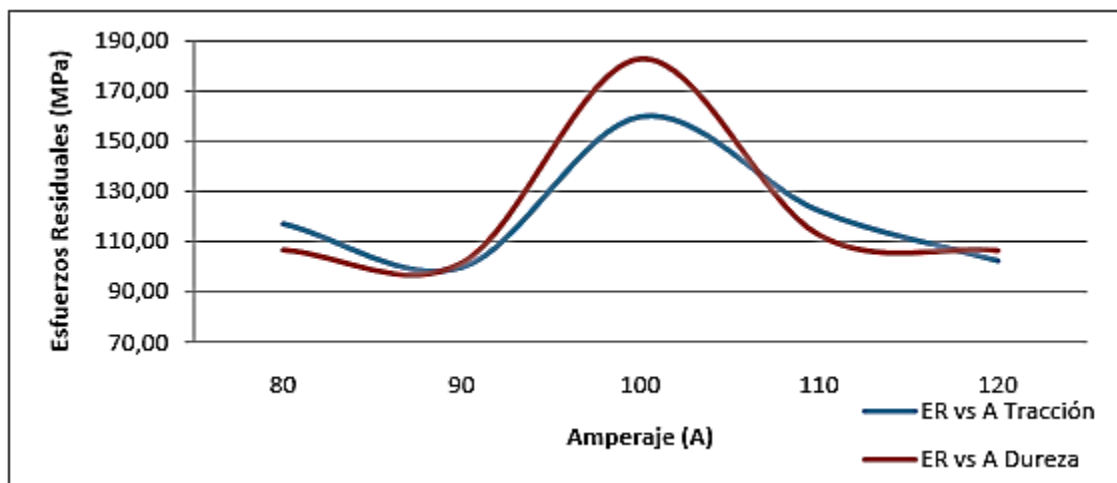
A su vez con los valores de la tabla 19 se realiza la Gráfica 5. En la gráfica se muestra en color rojo el comportamiento de los esfuerzos residuales obtenidos a través del ensayo de microdureza Vickers, en azul se representa el comportamiento de los mismos pero con el uso del ensayo a tracción.

Tabla 20: Comparación y diferencia porcentual entre esfuerzos residuales obtenidos por ensayo de microdureza y por ensayo de tracción

Amperaje (A)	Esfuerzos Residuales por ensayo de microdureza (MPa)	Esfuerzos Residuales por ensayo de tracción (MPa)	Diferencia porcentual %
80	106,65	117,10	8,92
90	101,45	99,74	1,71
100	182,88	159,86	14,4
110	112,53	122,26	8,65
120	106,39	102,36	3,94

Fuente: Lamus-Turipe (2.018)

Como puede observarse en la tabla 19 y en la gráfica 5, los esfuerzos residuales no tienen una tendencia fija a crecer o decrecer, Tal y como se indica el comportamiento es tal que los esfuerzos residuales disminuyen cuando se aumenta el amperaje usado de 80 a 90 A, luego de este punto los esfuerzos residuales aumentan y alcanzan su valor máximo para 100 A, por último vuelven a disminuir al seguir aumentando el amperaje.



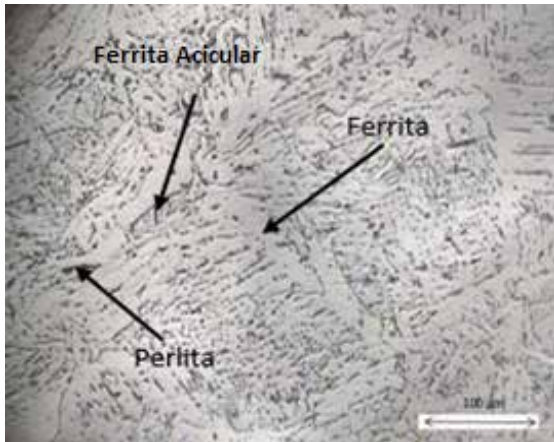
Grafica 5 Comparación de Esfuerzos Residuales Vs amperajes obtenidos por ensayo de microdureza y por ensayo de tracción.

Fuente: Lamus-Turipe (2.018)

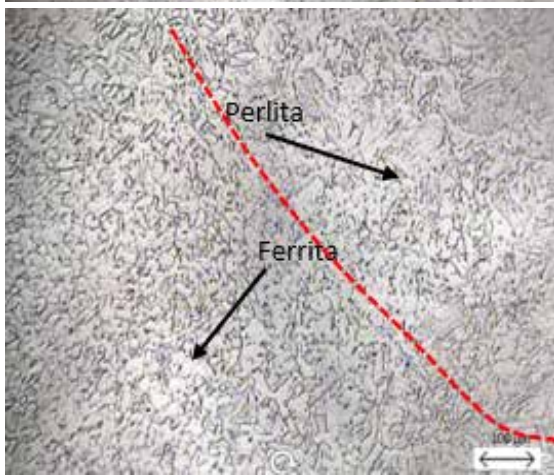
4.6 Ensayo de Microscopia.

A pesar de que entre los objetivos no se encuentra hacer un estudio microscópico de las uniones soldadas y solamente para el metal base, pareció interesante hacer la microscopia de las distintas probetas soldadas con y sin tratamiento térmico, para observar, entre otras cosas, si el recocido fue bien realizado, aun cuando la microdureza ya corrobora este hecho.

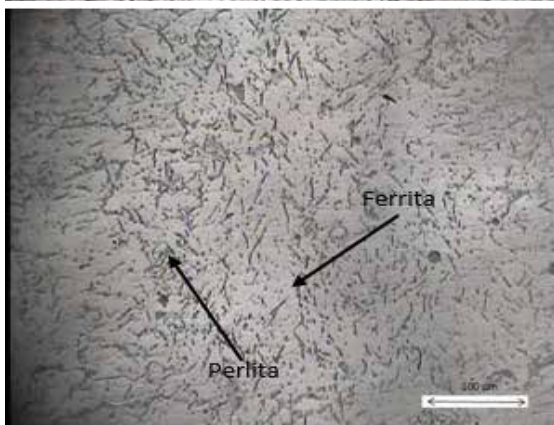
Este ensayo se llevó a cabo según la norma ASTM E-340 en donde las probetas fueran sometidas a un ataque químico con nital al 2% durante 8 segundos para revelar los granos y microestructuras presentes. A continuación, se presentan las diferentes micrografías obtenidas para las juntas soldadas.



Micrografía del cordón de soldadura a 200X. Se aprecia colonias de ferrita acicular aisladas, conjuntamente con una matriz ferritina rodeada de perlita.

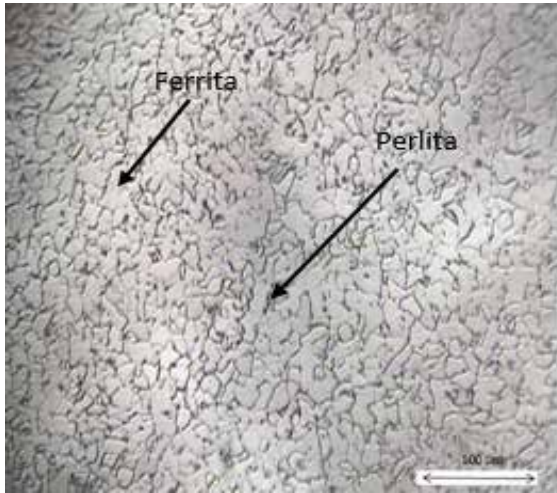


Interface de la ZAC _ metal base a 100X. Se aprecia la diferencia de tamaño de grano entre ambas zonas.

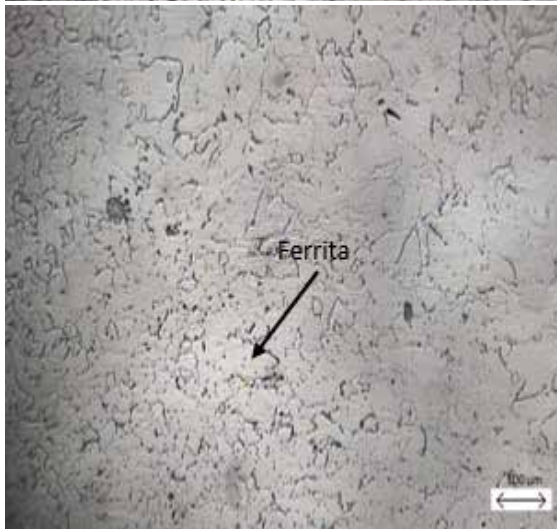


ZAC a 200 X, donde se aprecia unos granos de mayor tamaño en comparación con el cordón de soldadura.

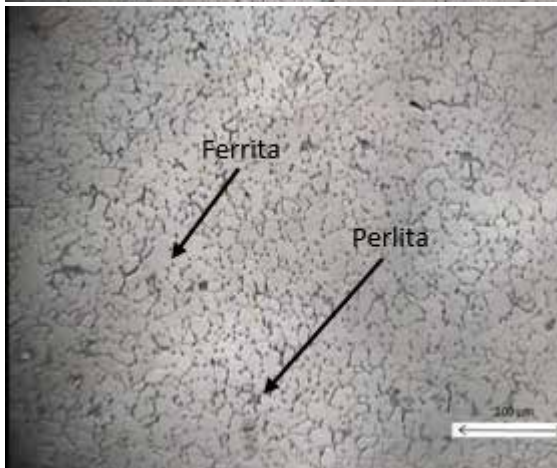
Figura 28: Microestructura a 80 Amperios sin tratamiento termico
Fuente: Lamus-Turipe (2018)



Micrografía del cordón de soldadura a 200X. se aprecia una matriz ferrítica rodeada de perlita, lo que sugiere que el recocido eliminó la Ferrita Acicular dejada por la soldadura.

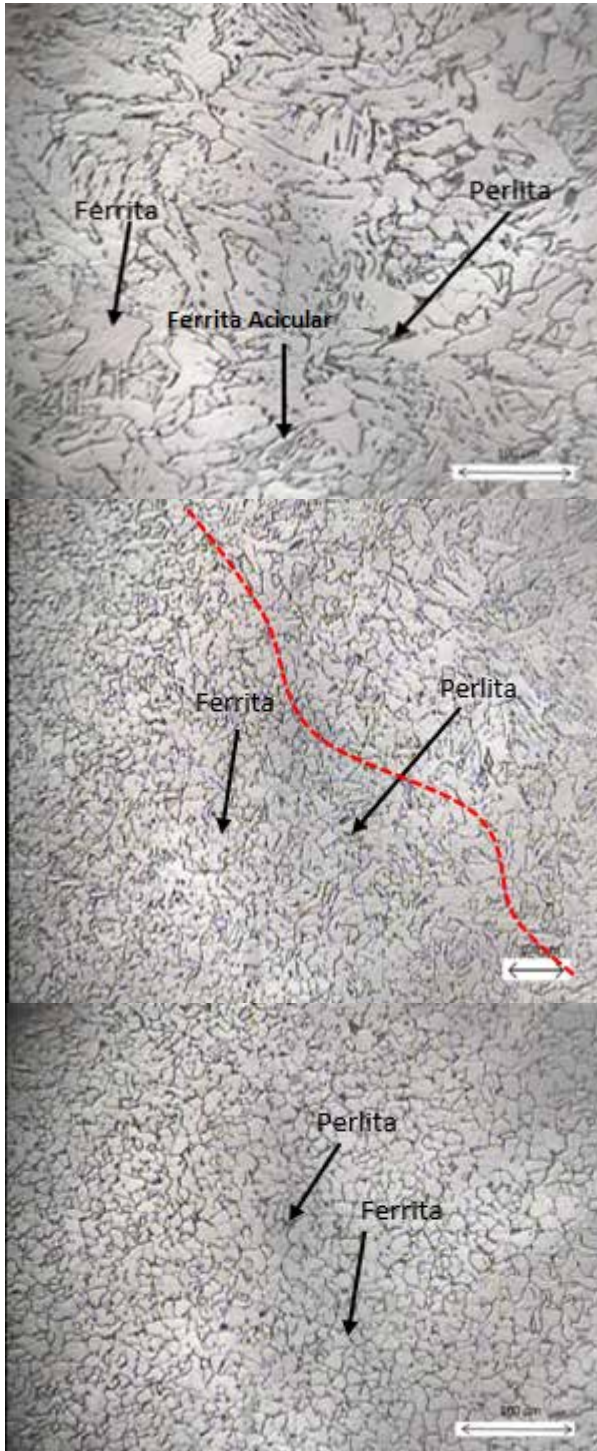


Interface ZAC _ metal base a 100X. Se aprecia la diferencia de tamaño de grano entre ambas zonas lo que sugiere que el recocido no fue total.



ZAC a 200 X, donde se aprecian unos granos uniformes lo que sugiere que en esa zona el recocido hizo efecto en la muestra.

Figura 29: Microestructura a 80 Amperios con tratamiento termico
Fuente: Lamus-Turipe (2018)

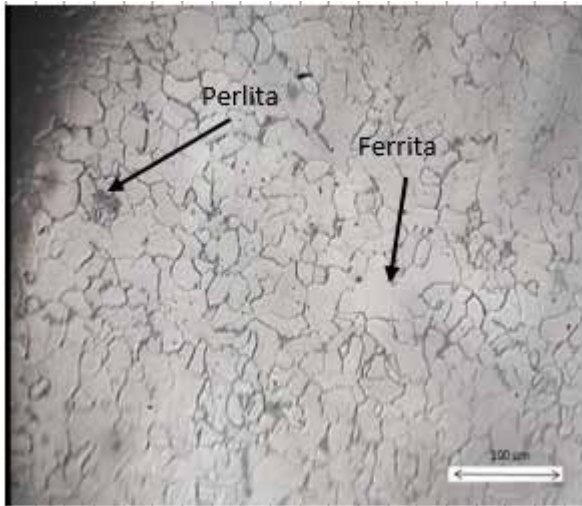


Micrografía del cordón de soldadura a 200X. se aprecia una matriz ferrítica rodeada de perlita, se evidencia Ferrita Acicular dejada por la soldadura.

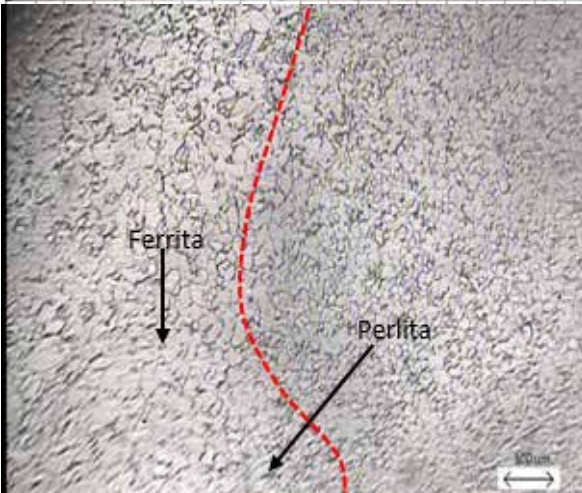
Interface ZAC _ metal base a 100X. Se aprecia la diferencia de tamaño de grano entre ambas zonas lo que sugiere que el recocido no fue total.

ZAC a 200 X, donde se aprecian unos granos uniformes lo que sugiere que en esa zona el recocido hizo efecto en la muestra.

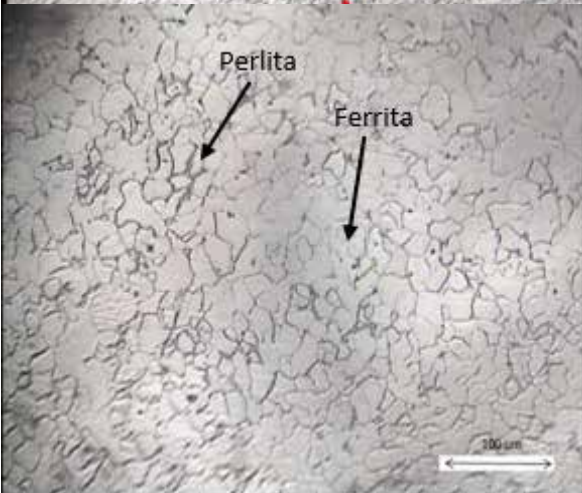
Figura 30: Microestructura a 90 Amperios sin tratamiento termico
Fuente: Lamus-Turipe (2018)



Micrografía del cordón de soldadura a 200X. Se aprecia una matriz Ferrítica rodeada de perlita, lo que sugiere que el recocido eliminó la Ferrita Acicular dejada por la soldadura.

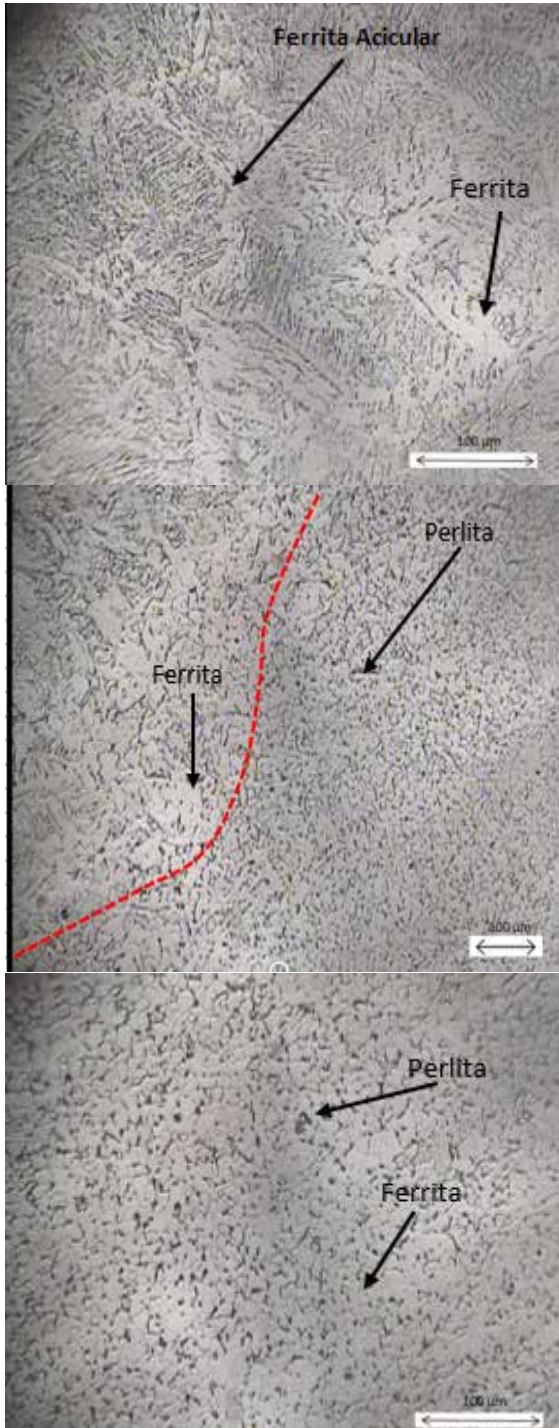


Interface ZAC _ metal base a 100X. Se aprecia un tamaño de grano casi uniforme aunque se aprecia una diferencia de tamaño de grano entre ambas zonas.



Se aprecia la ZAC a 200 X, donde se muestran unos granos uniformes lo que sugiere que en esa zona el recocido hizo efecto en la muestra.

Figura 31: Microestructura a 90 Amperios con tratamiento termico
Fuente: Lamus-Turipe (2018)

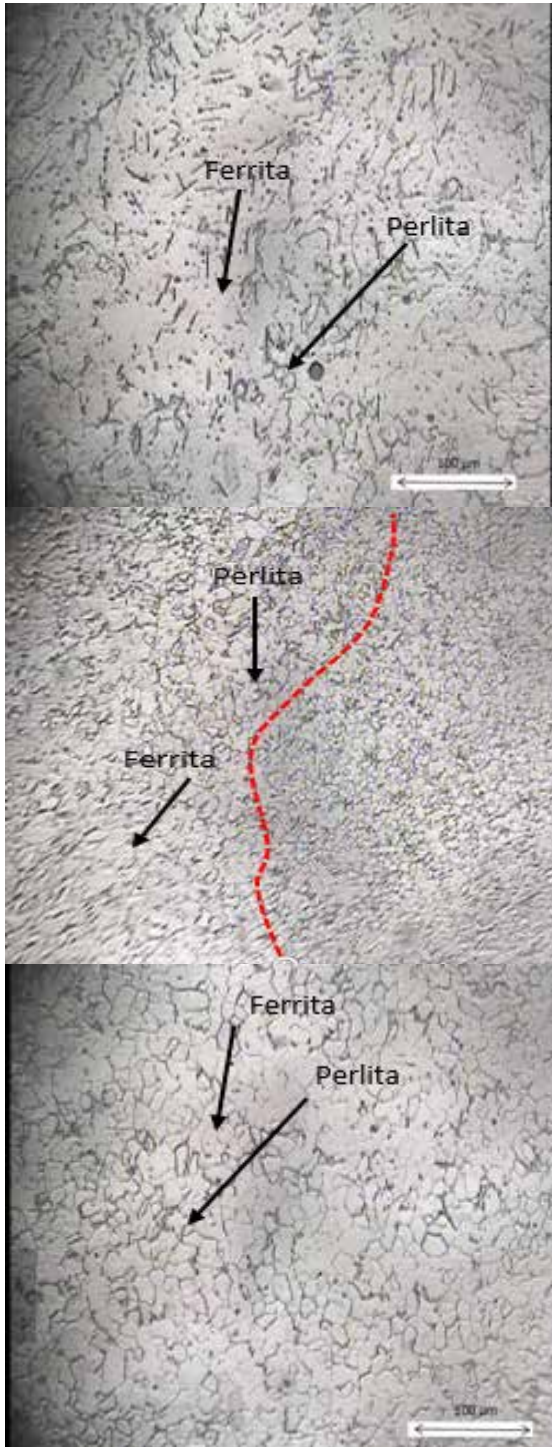


Micrografía del cordón de soldadura a 200X. se aprecia una matriz ferrita acicular, producto del calor generado en la junta soldada.

Interface ZAC _ metal base a 100X. Se aprecia la diferencia de tamaño de grano entre ambas zonas

Se tiene en la foto la ZAC a 200 X, donde se aprecian unos granos uniformes de ferrita y perlita.

Figura 32: Microestructura a 100Amperios sintratamiento termico
Fuente: Lamus-Turipe (2018)

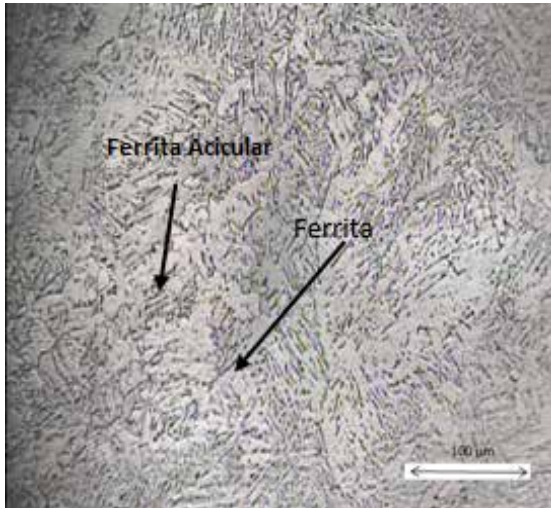


Micrografía del cordón de soldadura a 200X. Se aprecia una matriz ferrítica rodeada de perlita, lo que sugiere que el recocido eliminó la ferrita acicular dejada por la soldadura.

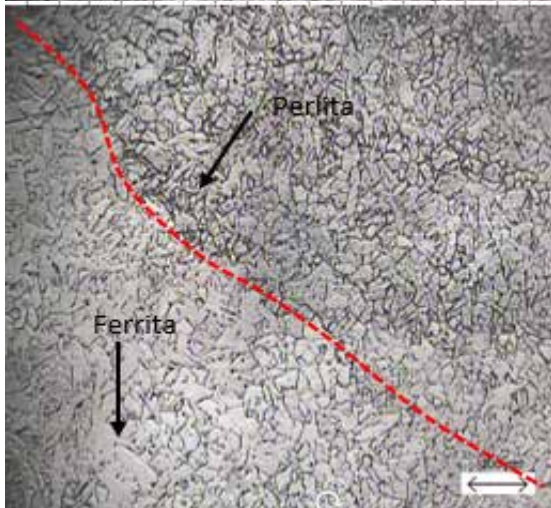
Muestra la interface ZAC _ metal base a 100X. Se aprecia aun la diferencia de tamaño de grano entre ambas zonas lo que sugiere que el recocido no fue total.

Se muestra la ZAC a 200 X, donde se aprecian unos granos uniformes lo que sugiere que en esa zona el recocido hizo efecto en la muestra.

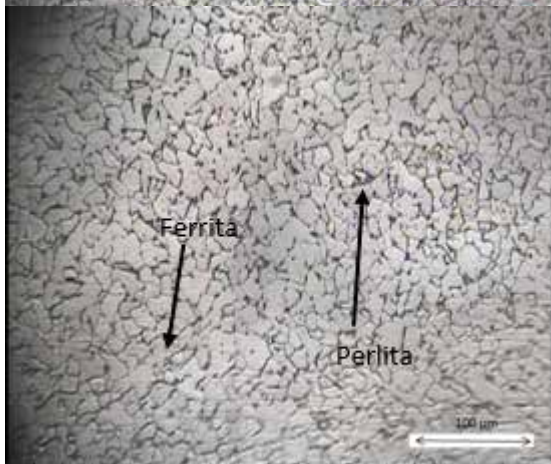
Figura 33: Microestructura a 100 Amperios con tratamiento termico
Fuente: Lamus-Turipe (2018)



Se muestra la micrografía del cordón de soldadura a 200X. Se aprecia una matriz ferrítica rodeada de ferrita acicular, producto del proceso de soldadura

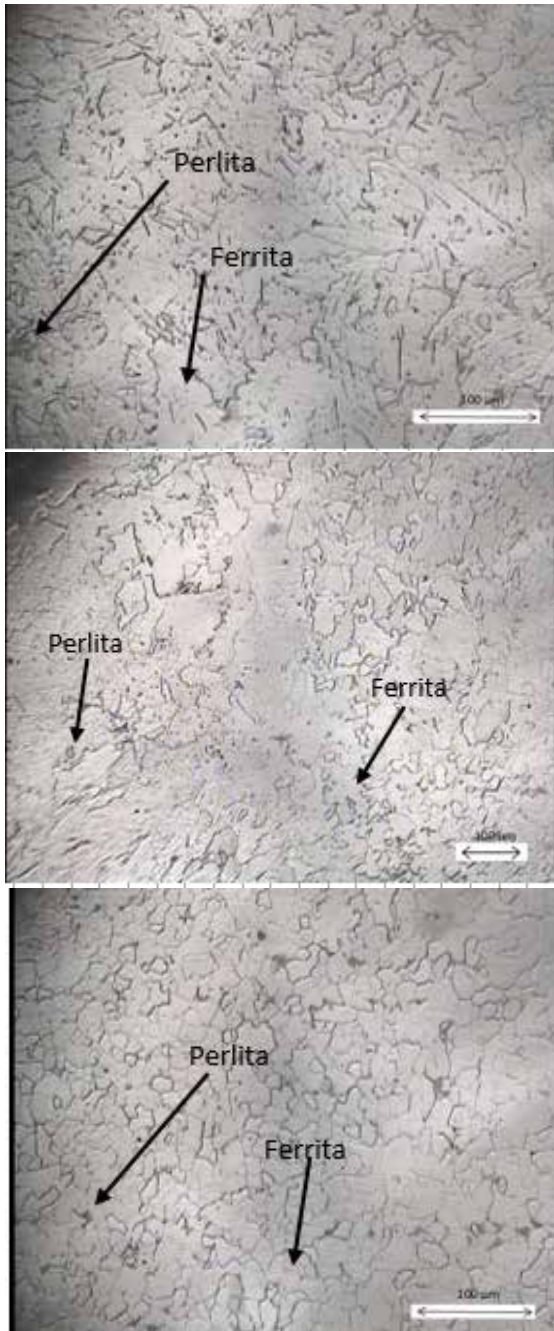


Se muestra la interface ZAC _ metal base a 100X. Se aprecia la diferencia de tamaño de grano entre ambas zonas.



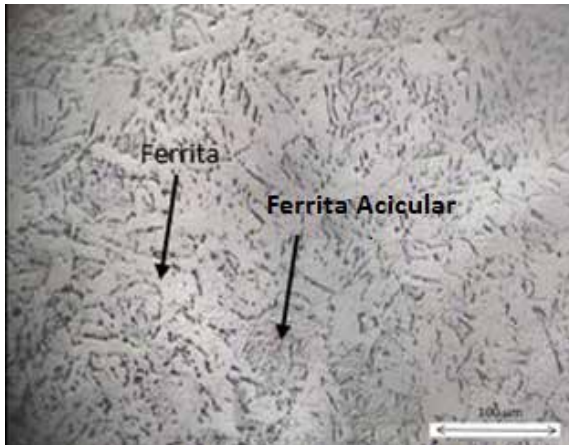
Se aprecia la ZAC a 200 X, donde se muestran unos granos uniformes de ferrita y perlita.

Figura 34: Microestructura a 110 Amperios sin tratamiento termico
Fuente: Lamus-Turipe (2018)

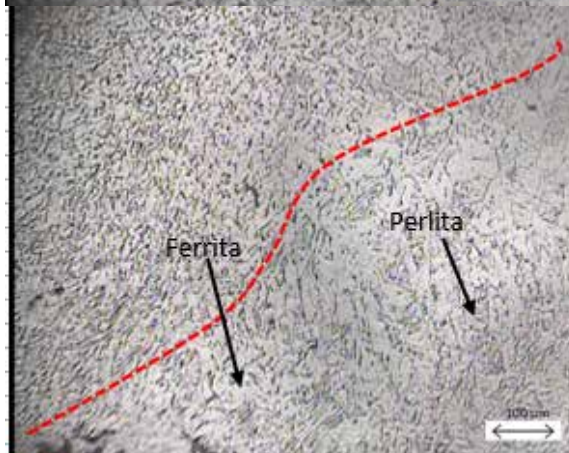


En las tres zonas mostradas de la muestra, se observa una distribución uniforme de los granos de ferrita y perlita, similares y de tamaño semejante, lo que indica que en esta muestra el recocido fue llevado a cabo de manera total y uniforme en la muestra ensayada. No se evidencia rastros de la junta soldada.

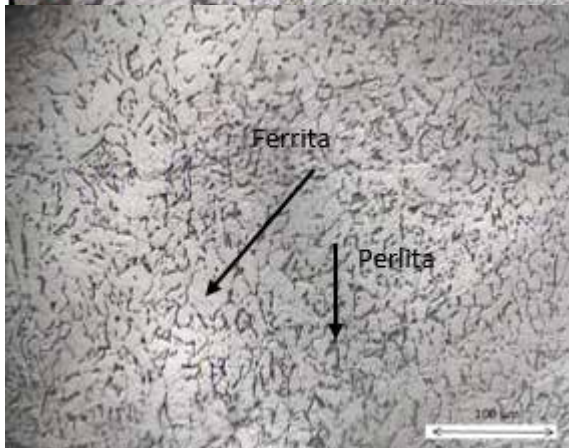
Figura 35: Microestructura a 110 Amperios con tratamiento termico
Fuente: Lamus-Turipe (2018)



Se muestra la micrografía del cordón de soldadura a 200X. Se aprecia una matriz ferrítica rodeada aunque ésta se presenta en menor proporción en comparación con las otras muestras soldadas y sin tratamiento de recocido.

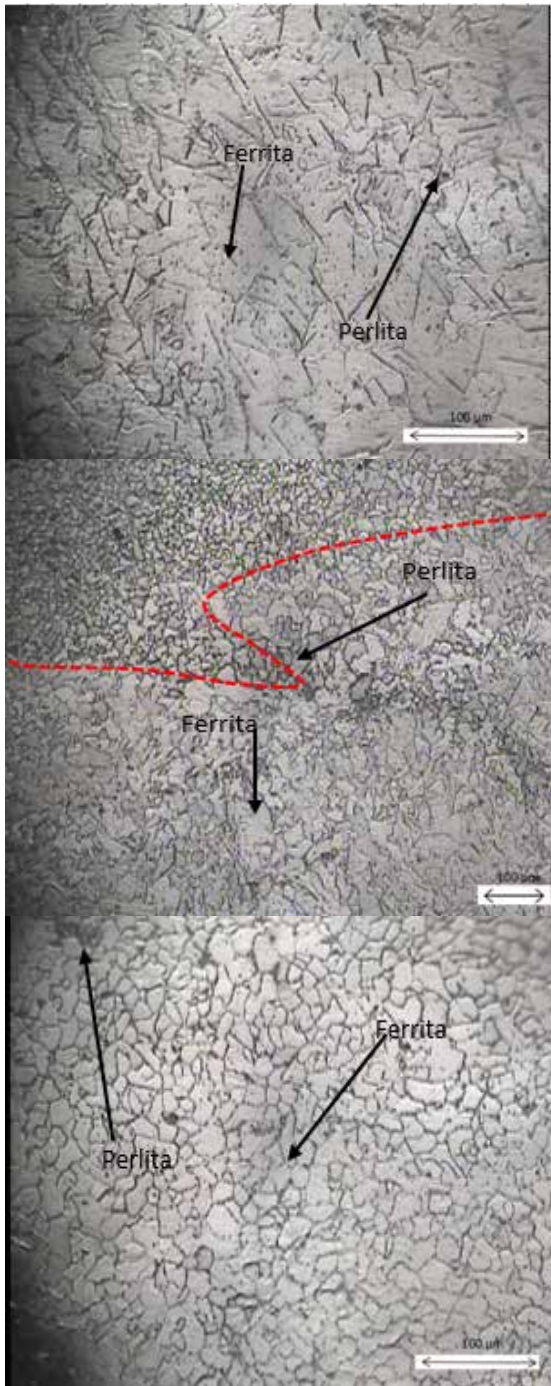


Se muestra la interface ZAC _ metal base a 100X. Se aprecia la diferencia de tamaño de grano entre ambas zonas



Se aprecia la ZAC a 200 X, donde se aprecia unos granos de ferrita y perlita.

Figura 36: Microestructura a 120 Amperios sin tratamiento termico
Fuente: Lamus-Turipe (2018)



Se muestra la micrografía del cordón de soldadura a 200X. Se aprecia una matriz ferrítica rodeada de perlita, lo que sugiere que el recocido eliminó la ferrita acicular dejada por la soldadura.

Se muestra la interface ZAC _ metal base a 100X. Se aprecia aun la diferencia de tamaño de grano entre ambas zonas lo que sugiere que el recocido no fue total.

Se aprecia la ZAC a 200 X, donde se muestran unos granos uniformes lo que sugiere que en esa zona.

Figura 37: Microestructura a 120 Amperios sin tratamiento termico
Fuente: Lamus-Turipe (2018)

4.7 Ensayo Macroscópico

Este ensayo se llevó a cabo utilizando como reactivo para revelar las zonas de la unión soldada Iodo en Ioduro de potasio al 20%. La apreciación visual refleja que el cordón de soldadura tuvo buena penetración y no se observan discontinuidades que sobrepasen a los valores permisibles como para rechazar dicho procedimiento de soldadura.

4.8 Análisis de resultados

Caracterización del Metal Base

Caracterización Química

Se observa que efectivamente el acero utilizado es un acero AISI 1018, el valor clave para esta conclusión es el porcentaje de carbono en el material el cual está entre los parámetros normales del acero 1018. Para la obtención del porcentaje de carbono, de azufre así como los restantes aleantes en el material fue utilizada la técnica de la fluorescencia de Rayos X.

Caracterización Mecánica

Se puede observar que el valor promedio de la dureza Vickers para el material base es de 140,11 HV, este valor se encuentra en el rango aceptable para acero AISI 1018 que es entre 130 y 150 HV. Ya que este valor se encuentra en el rango esperado se procedió a calcular el esfuerzo de fluencia del material, que arrojó un valor de 458 MPa, este valor es un poco elevado en comparación con el esperado que es de 360,13 MPa pero aun así es un valor aceptable por la relación que se está usando entre la dureza del material y el esfuerzo de fluencia del mismo.

Dureza Vickers

Se observa que a medida que se acerca al cordón de soldadura la dureza va disminuyendo (hasta aproximadamente 4mm al centro del cordón de soldadura), esto se debe al efecto del calor aportado por la soldadura al material, el cual afecta la microestructura del mismo logrando que su dureza disminuya considerablemente (al someter a altas temperaturas al material base el mismo llega a un punto de austenitización, y se enfría de forma lenta, lo que ocasiona una especie de revenido localizado, y es sabido

que el revenido es un tratamiento térmico usado para ablandar los metales). Aun cuando se noten algunos aumentos de la dureza en algunos puntos, la tendencia general es la disminución de la dureza a medida que se acerca al cordón de soldadura, estas variaciones atípicas se pueden dar al ser el equipo de microdureza extremadamente sensible, y tiene la capacidad de percibir cualquier defecto superficial en los granos del material.

La tendencia a la disminución progresiva de la dureza se debe al hecho de que a mayor cercanía del cordón, mayor fue la temperatura a la que estuvo expuesto el material base (calor generado por el proceso de soldadura) y por ende mayor la deformación térmica.

Al observar la figura 1, específicamente en la zona ubicada entre el centro del cordón de soldadura y 4 mm a ambos lados, se aprecia que la dureza aumenta hasta alrededor de los 220 HV a medida que se acerca el punto de estudio al centro del cordón, este aumento de dureza se debe a la dureza misma del material de aporte (electrodo E6013), o más específicamente a la dureza de la fundición del material de aporte con el material base.

A medida que se aleja del cordón de soldadura la dureza va aumentando hasta llegar a un punto donde se mantiene el valor de dureza (alrededor de 140 HV), lo cual indica el fin de la zona afectada por el calor (ZAC) por el proceso de soldadura. Este valor de dureza es acorde al valor de dureza del acero AISI 1018 normalizado, lo cual ratifica el hecho de que a una distancia de alrededor de los 14 mm, a partir del centro del cordón de soldadura, el material ya no se ve afectado por el calor aportado por el proceso de soldadura.

Esfuerzo Medido (Dureza Vickers)

A partir de los valores arrojados por el ensayo de microdureza (HV), fueron conseguidos los valores de esfuerzo de fluencia para cada punto. Estos valores de esfuerzo de fluencia son los que serán usados para el cálculo del esfuerzo residual usando la Ec. 1.

Observando la tabla 13 se notan los valores arrojados por el cálculo del esfuerzo de fluencia medido, donde se encuentra el valor del esfuerzo de fluencia del material base (458 MPa) así como los de cada una de las zonas del material para cada amperaje de trabajo. La tendencia del esfuerzo medido es la siguiente: a una distancia de 4 mm desde el centro del cordón de soldadura el esfuerzo medido tiene un valor aproximado de 350 MPa, a medida

que se aumenta la distancia entre el punto de estudio y el cordón, aumenta el valor del esfuerzo medido, hasta alrededor de 600 MPa a una distancia de 30 mm.

Esfuerzo Residual (Dureza Vickers)

Como se observa en la Grafica 2, a partir de los 4 mm de distancia del centro del cordón de soldadura, a medida que se va alejando del mismo se nota a grandes rasgos una disminución del esfuerzo residual presente en la pieza, esto se debe básicamente a la disminución del efecto de la deformación generada por la soldadura en el material base, esto ocurre hasta aproximadamente los 15 mm de distancia del cordón el cual es el momento donde el esfuerzo adquiere una tendencia a cero.

Se conoce como esfuerzo residual a tensión el esfuerzo generado entre estos puntos (4 y 15 mm), estos esfuerzos de tensión son generados durante el enfriamiento, se producen cuando el material trata de contraerse pero es impedido por el material adyacente. A partir de los 15 mm se observa un cambio del esfuerzo residual de positivo a negativo, el esfuerzo residual va aumentando negativamente hasta aproximadamente unos 20 mm de distancia del cordón, para luego empezar su disminución.

El esfuerzo encontrado en la zona negativa mencionada anteriormente es el llamado esfuerzo residual a compresión, este tipo de esfuerzo residual es indirecto al efecto de la soldadura. El esfuerzo a compresión se da gracias a la tendencia inherente que tienen los materiales a mantener un equilibrio en su estructura interna. Al haber un agente externo (soldadura) que ejerce un esfuerzo a tensión en la pieza, el material mismo debe mantener su equilibrio y lo logra con un esfuerzo de igual dimensión en sentido contrario, esto es, con el esfuerzo a compresión. De manera gráfica, el área existente entre el eje de las abscisas y la zona positiva de las curvas (zona resaltada en azul como se muestra en la figura 4.2), será igual al área existente entre el eje de las abscisas y la zona negativa de las curvas “distancia-esfuerzo residual” (encontrado como la zona resaltada en rojo en la Grafica 2, manteniendo así el equilibrio estructural del material.

Se puede notar que, a pesar de que ambos lados presentan una tendencia parecida, existen ciertos cambios. Asumiendo el “lado A” como la parte de la gráfica ubicada en la zona

negativa del eje X, y al “lado B” como la parte positiva del eje X. Se observa en el lado A que la variación de esfuerzos residuales existentes es mucho mayor que en el punto simétrico respecto al eje Y (lado B), esto es constante para todas las probetas estudiadas. De igual manera en el lado A se observa que los esfuerzos residuales son mayores para cada punto con respecto a su homólogo del lado B (ej., para el punto ubicado a 4 mm de distancia hacia el lado A a partir del cordón de soldadura el esfuerzo residual detectado supera al mismo punto del lado B por un promedio de 50 MPa). Se infiere que la causa directa para este comportamiento es el factor humano, en este caso concretamente se debe al ángulo existente entre el electrodo y la superficie de la probeta en dirección perpendicular al cordón de soldadura a la hora de realizar el proceso de soldado.

Ensayo de Tracción

Se observa en la tabla 13 la carga que fue necesaria para obtener un alargamiento de 0,75 mm en la probeta. Esto fue hecho para cada amperaje así como para las probetas tratadas térmicamente (libres de esfuerzos residuales). Como se observa, la carga necesaria para llegar a dicha deformación es mayor para las probetas que fueron sometidas a un tratamiento térmico, esto se debe al hecho de que su microestructura se encuentra ordenada y libre de tensiones lo cual le da una mayor resistencia a cargas externas como lo es la carga de tracción aplicada por el equipo. También se pueden notar variaciones en la carga necesaria para cada amperaje, con esto se puede realizar una predicción rápida de cuáles son los juegos de probetas con mayor o menor esfuerzo residual (al ser necesaria una menor carga para deformar la probeta se puede predecir que la misma será la que cuenta con un mayor esfuerzo residual, ya que quiere decir que está en un estado más débil que el resto; de igual manera en viceversa, para una mayor carga se predice un menor esfuerzo residual). Lo que parece indicar que el esfuerzo residual mínimo se obtiene al trabajar con un amperaje de 90 A mientras que el mayor esfuerzo residual se consigue en 100 A. Como se predijo anteriormente, y se observa en la Grafica 3, el esfuerzo residual mayor se obtuvo al soldar con una intensidad de corriente de 100 A, mientras que el menor esfuerzo residual se obtuvo al trabajar con 90 A. Los esfuerzos residuales obtenidos por medio del

ensayo de tracción mantienen una similitud tanto en tendencia como en valores con los esfuerzos residuales obtenidos por medio del ensayo principal, el ensayo de dureza, con una diferencia muy pequeña; con diferencia entre los valores obtenidos por ambos ensayos máxima de un 14,38% como se muestra en la tabla 17, lo cual indica y respalda que los resultados obtenidos en general de esfuerzos residuales de manera experimental son los realmente existentes en las piezas estudiadas.

El caso más crítico ocurrió para la pieza soldada con una corriente de 100 A, para este caso se presentó una diferencia del 58% en la carga necesaria para crear la misma deformación en esta y en la probeta tratada térmicamente, es decir que se necesitó un 58% menos de carga para deformar la probeta sometida a la soldadura, esto da una idea del gran efecto que pueden tener los esfuerzos residuales producidos por la soldadura en las propiedades mecánicas del acero AISI 1018. Para entender este fenómeno hay que tener presente la definición de esfuerzos residuales que dice que estos existen sin la presencia de cargas externas por lo que estas piezas ya poseen una fuerza interna de tracción que se sumará a la carga de la máquina del ensayo para deformar la pieza.

Con este método de ensayo se miden los esfuerzos residuales globales, es decir, se incluyen los esfuerzos residuales tanto de tracción como de compresión. Los esfuerzos residuales de compresión que existen en la pieza trataran de contrarrestar los esfuerzos de tracción buscando así el equilibrio estático, con los resultados obtenidos en este ensayo se puede afirmar que dicho equilibrio no es alcanzado y que los esfuerzos residuales de tracción son mayores que los esfuerzos de compresión, esto explica el hecho de que todas las cargas necesarias para la deformación fueron menores en las probetas soldadas que en las probetas tratadas térmicamente.

Efecto de la Intensidad de Corriente sobre los Esfuerzos Residuales.

En un proceso de soldadura la microestructura final se desarrolla por la acción combinada de la velocidad de enfriamiento, de la composición química, tamaño de grano y de las temperaturas de formación de las fases. Estos parámetros dependen del ciclo térmico al que es sometido el material base, de ahí que un cambio en las condiciones operativas

aplicadas puede alterar el calor de ingreso afectando de este modo la velocidad de enfriamiento en el intervalo asociado a la transformación austenita-ferrita, la distribución de tamaños de las inclusiones, la microestructura de la solidificación y el tamaño de grano austenítico primario.

Cuando se varia la intensidad de corriente y se mantienen constantes los demás factores implicados en la soldadura se puede observar que los esfuerzos residuales no tienen una tendencia fija a crecer o a decrecer. Como se puede observar en las Gráficas 3; 4 y 5 el comportamiento es tal que los esfuerzos residuales disminuyen cuando se aumenta el amperaje usado de 80 a 90 A, luego de este punto los esfuerzos residuales aumentan y alcanzan su valor máximo para 100 A, por último vuelven a disminuir al seguir aumentando el amperaje.

Se sabe que al aumentar la intensidad de corriente y mantener los demás parámetros constantes se está aumentando la entrada de calor (heat-input) es decir, que se aumenta la cantidad de calor aportado. Por otra parte se sabe que a mayor entrada de calor (heat-input) se logran mayores velocidades de enfriamiento.

Tomando en cuenta que las piezas son delgadas se puede tomar los fenómenos de transferencia de calor que ocurren en ellas como bidimensionales.

Como se puede ver en la figura 38 la conductividad térmica varía respecto a la temperatura, de forma no lineal, y como se sabe la conductividad térmica afecta la velocidad de enfriamiento que al final es uno de los factores más significativos en el resultado de la microestructura resultante. Este efecto se puede apuntar como una de las causas del comportamiento de la curva de esfuerzos residuales vs amperaje.

Muñoz A., (2009) muestra la relación que existe entre la temperatura pico que alcanza el material en el proceso de soldadura y los esfuerzos residuales, tal y como se observa en la figura 24, se puede apreciar que esta curva tampoco presenta un comportamiento lineal. Se sabe que al cambiar el amperaje de las soldaduras se modifica el calor de entrada (heat-input) y por lo tanto las temperaturas para un mismo punto también serán diferentes. El comportamiento de la curva en la gráfica de la Figura 38 también sustenta el comportamiento de las curvas 3; 4 y 5 obtenidas en los ensayos, ya que a medida que se

aumenta el amperaje se aumenta la temperatura pico y como se puede observar en la gráfica esto puede hacer crecer o decrecer los esfuerzos residuales.

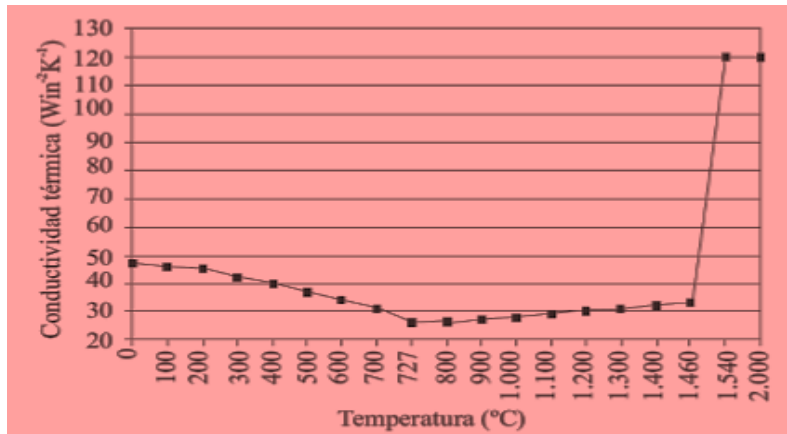


Figura 38: Relación entre la conductividad térmica y la temperatura.
Fuente: Muñoz A. (2009),

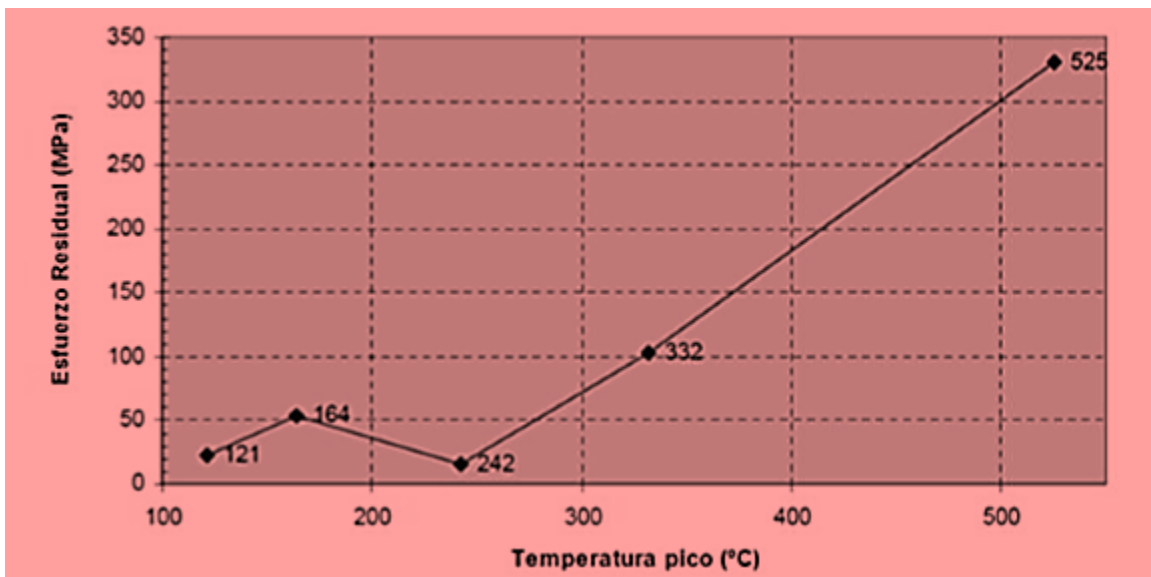


Figura 39: Relación entre los esfuerzos residuales y la temperatura pico.
Fuente: Muñoz A. (2009),

En definitiva, se puede observar que los diferentes amperajes implican diferentes entradas de calor (heat-inputs), estos a su vez producen diferentes temperaturas picos y diferentes velocidades de enfriamiento por el efecto que tiene la temperatura sobre la conductividad

térmica en los aceros. Todos estos factores dan como resultado que para el amperaje de 90 A se presenta una situación tal que la transferencia de calor para estas condiciones genera los menores esfuerzos residuales. En cambio para la soldadura realizada con un amperaje de 100 A las condiciones son tales que la disipación de calor no es la adecuada para permitir la disminución de los esfuerzos residuales y estos quedan en su valor máximo. Al seguir aumentando el amperaje se pasa esta zona de condiciones críticas y los esfuerzos residuales vuelven a disminuir.

Como fue descrito, en la Gráfica 3 se observa una disminución del esfuerzo residual remanente cuando se trabaja de 100 A a 110 A. Esto se puede decir que es resultado de la unión de varios fenómenos que se producen a partir del primer amperaje (100 A). Uno de los fenómenos sería la variación de la conductividad térmica respecto a la temperatura, pero el fenómeno al cual se le puede atribuir el mayor porcentaje de la disminución del esfuerzo es la velocidad de pasada en el proceso de soldadura; a partir de 100 A se tuvo que realizar un aumento significativo de la velocidad de pasada al realizar la soldadura, esto debido al hecho de que si se mantuviese la misma velocidad al trabajar con 100 A y 110 A, al trabajar con 110 A se pudiese crear un daño a la pieza (más específicamente se perforaría la pieza por su pequeño espesor). Por lo tanto el soldador se vio en la necesidad de aumentar la velocidad de pasada con el fin de mantener una soldadura de buena calidad sin dañar las piezas a soldar.

El cambio en la velocidad de pasada en un proceso de soldadura trae como consecuencia una relación inversamente proporcional al calor generado (mayor velocidad - menor calor y viceversa). Por lo tanto al haber un aumento de la velocidad de pasada para la soldadura hecha a 100 A, hubo una disminución del calor generado por el mismo proceso. Como es sabido, al haber un menor calor generado, el proceso de enfriamiento es más rápido, lo que origina una dureza mayor y a su vez un esfuerzo residual menor.

Comparación entre resultados obtenidos por ensayo de microdureza y por ensayo de tracción.

Observando las curvas en la gráfica 5 se puede ver que el comportamiento de las curvas obtenidas por ambos métodos es idéntico. Esto ratifica la decisión de escoger los puntos de estudio en el ensayo de dureza a 4 mm del cordón de soldadura ya que como se puede apreciar arrojan valores similares a los esfuerzos residuales globales.

También se puede observar que para la mayor parte de las curvas los valores de esfuerzos residuales obtenidos por el ensayo de tracción son menores que los obtenidos por el ensayo de dureza, esto se debe a que el ensayo de tracción toma en cuenta los esfuerzos residuales globales, es decir que toma en cuenta tanto los esfuerzos residuales de tracción como los de compresión. El efecto que tienen estos esfuerzos entre sí es de anularse, por lo que no extraña que los esfuerzos globales medidos por el ensayo de tracción sean menores que los esfuerzos residuales de tracción medidos con el ensayo de microdureza. Para los pocos puntos que no siguen esta premisa se puede observar que las diferencias son mínimas, alrededor de un 5%, estas diferencias pueden estar asociados a errores de medición.

La mayor diferencia entre los resultados obtenidos es de 14,38% que sigue siendo una diferencia pequeña tomando en cuenta los distintos factores que afectan el cálculo preciso del esfuerzo residual. Un factor que hay que tener en cuenta es que el método de soldadura SMAW es manual lo que implica una cantidad de errores humanos inevitables. También hay que recordar que es muy difícil mantener los valores de corriente, voltaje y velocidad constantes durante este proceso, por lo que esto también genera cierta incertidumbre.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Para soldaduras a tope por SMAW de acero AISI 1018 con un espesor de 1/8" (3,18 mm) usando un electrodo E-6013 de 1/8" (3,18 mm) de diámetro, se comprobó que el rango de amperajes de 80 a 120 A produce buenas soldaduras y que el amperaje más recomendable es de 90 A, ya que este genera los menores esfuerzos residuales con un valor de 99,74 MPa.

Para los valores estudiados, la relación existente entre el amperaje usado en la soldadura y los esfuerzos residuales tiene un comportamiento tipo campana en el que el valor mínimo de esfuerzo residual es de 99,74 MPa para un amperaje de 90 A y un valor máximo de 182,90 MPa para un amperaje de 100 A.

Desde la zona no afectada térmicamente la dureza disminuye a medida que se reduce la distancia al cordón de soldadura, al llegar a éste la dureza aumenta rápidamente.

Existen esfuerzos residuales de tracción desde el centro del cordón de soldadura hasta una distancia de 15 mm aproximadamente, luego de este punto los esfuerzos residuales pasan a ser de compresión a medida que se aumenta hasta una distancia de 30 mm aproximadamente que es donde los esfuerzos residuales se hacen cero. Cabe destacar que el comportamiento es simétrico respecto al cordón.

En el ensayo de tracción la probeta con mayor esfuerzo residual requirió 58% menos carga para lograr la misma deformación que la probeta libre de esfuerzos residuales.

La máxima diferencia entre los resultados obtenidos por el ensayo de microdureza y por el ensayo de tracción es de 14,38% por lo que se puede decir que los métodos se validan entre sí.

Con los resultados obtenidos se pudo observar que el método planteado por Masubushi es apropiado dando unos resultados acorde con lo planteado.

La caracterización del material base arrojó valores satisfactorios tanto en la composición química como en las propiedades mecánicas. Se demostró que el porcentaje de carbono con un valor de 0,185% se encuentra dentro del rango aceptado para el acero AISI 1018 y la dureza obtenida de 140 HV también se encuentra dentro del rango aceptable para dicho acero.

5.2 Recomendaciones

Para lograr una mejor predicción con respecto a la microestructura obtenida por los cambios de temperatura en soldadura, se recomienda que a la hora de realizar la soldadura se tomen mediciones de las temperaturas y el tiempo en que la pieza alcanza la temperatura ambiente. Con estos valores se podrán usar las curvas TTT y CCT con mayor precisión.

Se recomienda un análisis más extenso de la calidad de la soldadura para verificar la calidad de la misma, antes de realizar la medición de esfuerzos residuales, para la verificación se recomiendan métodos como el ultrasonido o el ensayo de tintas penetrantes.

Sería de gran interés realizar otros trabajos en los que se modifique otra variable del proceso de soldadura manteniendo los demás parámetros iguales a los de este trabajo para que de esta forma se pueda realizar una comparación directa entre el efecto que tiene los diferentes parámetros de la soldadura sobre los esfuerzos residuales. De igual manera esto se recomienda por el hecho de que los resultados obtenidos en este trabajo no son aplicables si se desea utilizar otro material, u otro método de soldadura.

BIBLIOGRAFÍA

Aguilera F. y Granado F. **Evaluación del comportamiento mecánico del acero X65 sometido a soldadura del tipo arco sumergido**. Universidad de Carabobo. Valencia, Venezuela, 2.003.

Arias, F (2012). “

Caracas, 6ta. Edición Editorial Episteme.

Askeland, Donald R. and Phule, Pradeep P. (2004). “

Editorial Thomson. 4ta Edición. D.F. México. Pág. 231-497.

ASTM (2004) “**Steel--Plate, Sheet, Strip, Wire_ Stainless Steel Bar**”. Volume 01.03

ASTM E-190. (2004).

ASTMStandards\ASTM 2004 PART IA\ASTM 2004 Volume 03.01 Metals -

- Mechanical Testing_ Elevated and Low-Temperature Tests_ Metallograph

ASTM E-8M. (2004) “

ASTM Standards\ASTM 2004 PART IA\ASTM 2004 Volume 03.01

Metals -- Mechanical Testing_ Elevated and Low-Temperature Tests_ Metallograph

ASTM E-384-99. (2004)

’. ASTM Standards\ASTM 2004 PART IA\ASTM 2004 Volume 03.01

Metals -- Mechanical Testing_ Elevated and Low-Temperature Tests_ Metallograph.

ASTM 407-7. (2004). “

ASTM

(2004) Standards\ASTMPART IA\ASTM 2004 Volume 03.01 Metals -- Mechanical

Testing_ Elevated and Low-Temperature Tests_ Metallograph,

Arrejín, D. Metalografía – Monografías. <http://www.monografias.com/trabajos67/metalografia/metalografia2.shtml>. Buenos Aires, Argentina. 2.005.

Bello E., Marchena M. (2.009) **Determinación de los esfuerzos residuales en uniones soldadas a tope a través de la teoría de Masubuchi**. Universidad de Carabobo. Valencia, Venezuela. Octubre.

- Callister W. (1995). Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales, Tercera edición, Barcelona, España, Editorial Reverté S.A.
- Choi M., Lee K., Kim J., Kim K., and Kwon D. (2.007). **Application of instrumented indentation technique to estimate strength and residual stress**. Recent Advancement of Theory and Practice in Hardness Measurement, 19-21 November,
- Correa J. (2.010). **Ensayo de Materiales**. <http://juliocorrea.files.wordpress.com/2010/05/ensayos-de-dureza-breve.pdf>. Buenos Aires, Argentina.
- Dai H., Francis J., Stone H., Bhadeshia H., Withers P. (2.008). Characterizing Phase Transformations and Their Effects on Ferritic Weld Residual Stresses with X-rays and Neutrons. Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 39A.
- Díaz P. (2.008). **Simulación de un proceso termodinámico para predecir esfuerzos residuales en uniones de placas soldadas a tope**. Universidad Metropolitana. Caracas, Venezuela.
- Fernández A. (2010). **La Importancia de la Inspección de Soldadura en la Fabricación y Montaje de Estructuras Metálicas**". Universidad Veracruzana. Coatzacoalcos, México.). Visto en <https://core.ac.uk/download/files/605/16296707.pdf> 11/10/2016
- Francis J., Stone H., Bhadeshia H., Withers P. (2.007). Welding residual stresses in ferritic power plant steels Institute of Materials, Minerals and Mining. May.
- Francis J, Stone H., Kundu S., Rogge R., Bhadeshia H., Withers P.(2.007). Transformation Temperatures and Welding Residual Stresses in Ferritic Steels. ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference. San Antonio, Texas. July.
- Funderburk R., (1.999). A look at heat input, Welding Innovation Vol. XVI, No. 1. Ohio, U.S.A.
- Grupo Palmexico (2017). <http://palmexico.com.mx/>

- Hicks, J. (1.999). Welded Joint Design. Industrial Press. New York, U.S.A.
- Jacobino J.; Luna M. (2.006)Tensiones Residuales en la Soldadura. Métodos para su Atenuación. Universidad Central de Las Villas Santa Clara, Cuba. Junio.
- Kronfle M., Viteri A. (1.983). Efecto de los esfuerzos residuales sobre las propiedades de las uniones soldadas. Escuela Superior Politécnica del Litoral, Departamento de Ingeniería Mecánica. Guayaquil, Ecuador.
- Kudryavtsev Y., Kleiman J. y Gustcha O. (2.008). Ultrasonic Measurement of Residual Stresses in Welded Railway Bridge. Integrity Testing Laboratory Inc. Londres, Inglaterra.
- Masubuchi K. Analysis of welded structures: Residual stresses, distortion and their consequences. Massachusetts Institute of Technology. U.S.A, 1.980.
- Montaner S. (1987). Diccionario Enciclopédico Hispano-Americano, Tomo I. España - Barcelona.
- Muñoz A. (2.009). Tensiones residuales generadas en la ZAC y su influencia en la tenacidad a la fractura en los aceros HSLA, bajo un proceso de soldeo por arco sumergido. Universidad de Cádiz. Cádiz, España.
- Paradowska A., Price J., Ibrahim R., Finlayson T. The effect of heat input on residual stress distribution of steel welds measured by neutron diffraction. Journal of Achievements
- Potnoi Marcos. Definición y Tipos de galgas extensométricas. (2009). [on line]. Disponible en:<http://www.geocities.com/ResearchTriangle/4480/academic-files/extensometria.html>.
- Ramírez A., Cerpa S., Mejías G. (2.006)Soldadura de un Acero Inoxidable Duplex 2205 por el Proceso de Soldadura GTAW. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de

los Materiales, U.C.V. Publicación online: www.polimeros.labb.usb.ve/RLM/M/home.html. Diciembre.

Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad de Carabobo. (2.005). Vol. 8. UNMSM.

Romhanji E., Grabulov V. (2.007). Deformation behavior of welded stainless steel – carbon steel sandwich sheet material. Scientific Technical Review, Vol. LVII, No.2.

Torres J. Evolución Microestructura de la Aleación de Aluminio Durante el Proceso de Soldadura MIG. Ingeniería y desarrollo, Universidad del Norte. Barranquilla,

Totten G., Howes M. (2.002). Inoue T. Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel. ASM International, Materials Park, Ohio, USA. Marc.

Ueda Y., Nakacho K. (1.986). Distributions of welding residual stresses in various welded joints of thick plates. Transactions of JWRI, Welding Research Institute of Osaka University, Vol. 13, No. 1.

APENDICE

APENDICE A



PÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
MINISTERIO DEL PODER PÚBLICO PARA LA EDUCACIÓN
UNIVERSIDAD SIMÓN BOLÍVAR

Fecha: 14 de marzo del 2018 Caracas, Venezuela

ANÁLISIS QUÍMICO POR RX

Lugar: Instalaciones de la Universidad Simón Bolívar, Laboratorio de Dinámica de Maquinas.

Instrumento Utilizado: Espectrómetro portátil X-Met7500 Marca OXFORD Instruments.

Descripción general del instrumento: El X-Met 7500 es un espectrómetro XRF flexible y portátil para el análisis elemental en una amplia gama de mercados industriales. Está diseñado para un alto rendimiento y fiabilidad, ofrece un análisis garantizado de materiales rápido, y bajos límites de detección para todos los elementos de interés:

Identificación Positiva de Materiales (PMI) para los metales

Reciclaje y clasificación de chatarra

Identificación y análisis de aleaciones

Identificación de metales preciosos

Análisis de materiales peligrosos (RoHS) en los juguetes, productos de consumo, en el suelo y otras aplicaciones

Materiales a identificar: Probetas proporcionada por los estudiantes de la **Universidad José Antonio Páez**, identificadas como “Probeta H”, “Probeta M” y “Probeta C” de las cuales los estudiantes requieren saber si se trata primero de un Acero H-13 para la Probeta H, segundo de un Acero 1018 para la Probeta M y por ultimo de un Acero 1010 para la Probeta C.

Explicación breve del estudio: Una vez encendido el equipo se procede a calibrarlo para realizar el análisis, ya preparado se apunta la probeta a analizar de manera que quede la punta del instrumento haciendo contacto con la probeta, pasado unos segundos el instrumento arrojará los datos requeridos.

Resultados del análisis: El espectrómetro dará dos resultados ya que la probeta fue analizada por ambas caras.

Nombre	Clase		Fecha	Hora		Duración
Probeta H	Alloy_LE_FP		14/03/2018	11:33:03		8,5s
Elemento	Si%	V%	Cr%	Mn%	Fe%	Mo%
	1,76	0,77	5,54	0,33	90,39	1,20
±	0,166	0,041	0,084	0,084	0,371	0,0024
Grados: TS H-13 (0,13), TS H-11 (0,70), TS A-2 (1,10), TS A-8 (1,36), TS H-12 (1,63)						

Nombre	Clase		Fecha	Hora		Duración	
Probeta H	Alloy_LE_FP		14/03/2018	11:35:03		8,5s	
Elemento	Si%	V%	Cr%	Mn%	Fe%	Cu%	Mo%
	1,47	0,77	5,33	0,42	90,74	0,07	1,20
±	0,159	0,041	0,083	0,066	0,371	0,019	0,024
Grados: TS H-13 (0,00), TS H-11 (0,68), TS A-2 (1,09), TS A-8 (1,36), TS H-12 (1,63)							

Nombre	Clase		Fecha	Hora		Duración
Probeta M	Alloy_LE_FP		14/03/2018	11:36:49		8,5s
Elemento	Si%	Mn%	Fe%			
	0,67	0,16	99,17			
±	0,139	0,034	0,357			
Grados: C-1018 (0,05), C-1020 (0,19), C-1026(0,60), TS L-2(0,76), TS O-6 (0,92)						

Nombre	Clase		Fecha	Hora		Duración
Probeta M	Alloy_LE_FP		14/03/2018	11:38:00		8,6s
Elemento	Si%	Cr%	Mn%	Fe%	Co%	Sn%
	0,70	0,05	0,31	98,60	0,26	0,08
±	0,134	0,010	0,023	0,348	0,044	0,024
Grados: C-1018 (0,00), C-1026 (0,21), TS L-2(0,76), 12L14 (0,85)						

Nombre	Clase	Fecha	Hora	Duración
Probeta C	Alloy_LE_FP	14/03/2018	11:39:27	8,5s
Elemento	Si%	Mn%	Ni%	Fe%
	0,98	1,45	1,47	96,1
±	0,14	0,03	0,05	0,362
Grados: C-1010 (0,1), C-1020 (0,21), C-1026(0,26), TS L-2(0,76), TS O-6 (0,92)				

Nombre	Clase	Fecha	Hora	Duración	
Probeta C	Alloy_LE_FP	14/03/2018	11:40:04	8,6s	
Elemento	Si%	Cr%	Mn%	Ni%	Fe%
	0,99	10,4	1,43	1,48	85,6
±	0,112	0,015	0,026	0,122	0,421
Grados: C-1010 (0,00), C-1020 (0,21), C-1026(0,26), TS L-2(0,76), TS O-6 (0,92)					

Análisis de los resultados: De acuerdo con los resultados obtenidos se puede corroborar que el material que fue analizado si cumple con lo requerido por los estudiantes, que es un Acero H-13 para la Probeta H, un Acero 1018 para la Probeta M y un Acero 1010 para la Probeta C

ANEXO

ANEXO A



Designation: E 407 – 07

Standard Practice for Microetching Metals and Alloys¹

This standard is issued under the fixed designation E 407; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last approval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or approval.

This standard has been approved for use in conjunction with the Department of Defense.

1. Scope

1.1 This practice covers chemical solutions and procedures to be used in etching metals and alloys for microscopic examination. Safety precautions and miscellaneous information are also included.

1.2 This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use. For specific cautionary statements, see 6.1 and Table 2.

2. Referenced Documents

- 2.1 ASTM Standards:²
- D 1193 Specification for Reagent Water
- E 7 Terminology Relating to Metallography
- E 2014 Guide on Metallographic Laboratory Safety

3. Terminology

3.1 Definitions:

3.1.1 For definition of terms used in this standard, see Terminology E 7.

3.2 Definitions of Terms Specific to This Standard:

3.2.1 *stain etch*—an immersion etchant that produces color contrast, often selective to a particular constituent in the microstructure, due to a thin oxide, sulfide, molybdate, chromate or elemental selenium film on the polished surface that reveals the structure due to variations in light interference effects as a function of the film thickness (also called a “stain etch”).

3.2.2 *vacuum-deposition interference layer method*—a technique for producing enhanced contrast between microstructural constituents, usually in color, by thin films formed by vacuum

deposition of a dielectric compound (such as ZnTe, ZnSe, TiO₂, ZnS or ZnO) with a known index of refraction, generally due to light interference effects (also known as the “Veggenhoff method”).

4. Summary of Practice

4.1 Table 1 is an alphabetical listing of the metals (including rare earths) and their alloys for which etching information is available. For each metal and alloy, one or more etchant numbers and their corresponding use is indicated. Alloys are listed as a group or series when one or more etchants are common to the group or series. Specific alloys are listed only when necessary. When more than one etchant number is given for a particular use, they are usually given in order of preference. The numbers of electrolytic etchants are *italicized* to differentiate them from non-electrolytic etchants.

4.2 Table 2 is a numerical listing of all the etchants referenced in Table 1 and includes the composition and general procedure to be followed for each etchant.

4.3 To use the tables, look up the metal or alloy of interest in Table 1 and note the etchant numbers corresponding to the results desired. The etchant composition and procedure is then located in Table 2 corresponding to the etchant number.

4.4 If the common name of an etchant is known (Marble's, Vilella's, etc.), and it is desired to know the composition, Table 3 contains an alphabetical listing of etchant names, each coded with a number corresponding to the etchant composition given in Table 2.

5. Significance and Use

5.1 This practice lists recommended methods and solutions for the etching of specimens for metallographic examination. Solutions are listed to highlight phases present in most major alloy systems.

6. Safety Precautions

6.1 Before using or mixing any chemicals, all product labels and pertinent Material Safety Data Sheets (MSDS) should be read and understood concerning all of the hazards and safety precautions to be observed. Users should be aware of the type of hazards involved in the use of all chemicals used, including those hazards that are immediate, long-term, visible, invisible,

¹The practice is under the jurisdiction of ASTM Committee D14 on Metallography and is the direct responsibility of Subcommittee D14.01 on Specimen Preparation.

Current edition approved May 1, 2007; published May 2007. Originally approved in 1999. Last previous edition approved in 1999 as E 407-99.

²For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For Annual Book of ASTM Standards volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

and with or without odors. See Guide E 2014 on Metallographic Laboratory Safety for additional information on: Chemical Safety, Electrolytic Polishing/Etching and Laboratory Ventilation/Fume Hoods.

6.1.1 Consult the product labels and MSDSs for recommendations concerning proper protective clothing.

6.1.2 All chemicals are potentially dangerous. All persons using any etchants should be thoroughly familiar with all of the chemicals involved and the proper procedure for handling, mixing, and disposing of each chemical, as well as any combinations of those chemicals. This includes being familiar with the federal, state, and local regulations governing the handling, storage, and disposal of these chemical etchants.

6.2 Some basic suggestions for the handling and disposing of etchants and their ingredients are as follows:

6.2.1 When pouring, mixing, or etching, always use the proper protective equipment, (glasses, gloves, apron, etc.) and it is strongly recommended to always work under a certified and tested fume hood. This is imperative with etchants that give off noxious odors or toxic vapors that may accumulate or become explosive. In particular, note that solutions containing perchloric acid must be used in an exclusive hood equipped with a wash down feature to avoid accumulation of explosive perchlorates. See Guide E 2014 on Metallographic Laboratory Safety for additional information on safety precautions for electrolytes containing perchloric acid.

6.2.2 No single type of glove will protect against all possible hazards. Therefore, a glove must be carefully selected and used to ensure that it will provide the needed protection for the specific etchant being used. In some instances it may be necessary to wear more than one pair of gloves to provide proper protection. Information describing the appropriate glove may be obtained by consulting the MSDS for the chemical being used. If that does not provide enough detailed information, contact the chemical manufacturer directly. Additionally, one can contact the glove manufacturer or, if available, consult the manufacturers glove chart. If the chemical is not listed or if chemical mixtures are being used, contact the glove manufacturer for a recommendation.

6.2.3 Use proper devices (glass or plastic) for weighing, mixing, containing, and storage of solutions. A number of etchants generate fumes or vapors and should only be stored in properly vented containers. Storage of fuming etchants in sealed or non-vented containers may create an explosion hazard.

6.2.4 When mixing etchants, always add reagents to the solvent unless specific instructions indicate otherwise.

6.2.5 When etching, always avoid direct physical contact with the etchant and specimen; use devices such as tongs to hold the specimen (and tufts of cotton, if used).

6.2.6 Methanol is a cumulative poison hazard. Where ethanol or methanol, or both are listed as alternates, ethanol is the preferred solvent. Methanol should be used in a properly designed chemical fume hood.

6.2.7 When working with HF always be sure to wear the appropriate gloves, eye protection and apron. Buying HF at the lowest useable concentration will significantly reduce risk. Additionally, it is recommended that a calcium gluconate

cream or other appropriate HF neutralizing agent be available for use if direct skin contact of the etchant occurs.

6.2.8 The EPA states that human studies have clearly established that inhaled chromium (VI) is a human carcinogen, resulting in an increased risk of lung cancer. Animal studies have shown chromium (VI) to cause lung tumors via inhalation exposure. Therefore, when working with Cr(VI) compounds such as $K_2Cr_2O_7$ and CrO_3 , always use a certified and tested fume hood. Additional information can be obtained at the EPA website¹.

6.2.9 For safety in transportation, picric acid is distributed by the manufacturer wet with greater than 30% water. Care must be taken to keep it moist because dry picric acid is shock sensitive and highly explosive especially when it is combined with metals such as copper, lead, zinc, and iron. It will also react with alkaline materials including plaster and concrete to form explosive compounds. It should be purchased in small quantities suitable for use in six to twelve months and checked periodically for lack of hydration. Distilled water may be added to maintain hydration. It must only be stored in plastic or glass bottles with nonmetallic lids. If dried particles are noted on or near the lid, submerge the bottle in water to re-hydrate them before opening. It is recommended that any bottle of picric acid that appears dry or is of unknown vintage not be opened and that proper emergency personnel be notified.

6.2.10 Wipe up or flush any and all spills, no matter how minute in nature.

6.2.11 Properly dispose of all solutions that are not identified by composition and concentration.

6.2.12 Store, handle and dispose of chemicals according to the manufacturer's recommendations. Observe printed cautions on reagent bottles.

6.2.13 Information pertaining to the toxicity, hazards, and working precautions of the chemicals, solvents, acids, bases, etc. being used (such as material safety data sheets, MSDS) should be available for rapid consultation. A selection of useful books on this subject is given in Refs. (1-11)².

6.2.14 Facilities which routinely use chemical etchants should have an employee safety training program to insure the employees have the knowledge to properly handle chemical etchants.

6.2.15 When working with etchants always know where the nearest safety shower, eye-wash station, and emergency telephone are located.

7. Miscellaneous Information

7.1 If you know the trade name of an alloy and need to know the composition to facilitate the use of Table 1, refer to a compilation such as Ref (12).

7.2 Reagent grade chemicals shall be used for all etchants. Unless otherwise indicated, it is intended that all reagents conform to specifications of the Committee on Analytical Reagents of the American Chemical Society where such specifications are available. Other grades, such as United States

¹ <http://www.epa.gov/osm/whh/half/chromium.html>

² The boldface numbers in parentheses refer to the list of references at the end of this standard.

ANEXO B



Designation: E 8M – 00a
METRIC

Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials [Metric]¹

This standard is issued under the fixed designation E 8M; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

1. Scope *

1.1 These test methods cover the tension testing of metallic materials in any form at room temperature, specifically, the methods of determination of yield strength, yield point elongation, tensile strength, elongation, and reduction of area.

NOTE 1—These test methods are the metric companion of Test Methods E 8. Committee E-28 was granted an exception in 1997 by the Committee on Standards to maintain E8 and E8M as separate companion standards rather than combining standards as recommended by the Form and Style manual.

NOTE 2—These metric test methods are essentially the same as those in Test Methods E 8, and are compatible in technical content except that gage lengths are required to be 5D for most round specimens rather than 4D as specified in Test Methods E 8. Test specimens made from powder metallurgy (P/M) materials are exempt from this requirement by industry-wide agreement to keep the pressing of the material to a specific projected area and density.

NOTE 3—Exceptions to the provisions of these test methods may need to be made in individual specifications or test methods for a particular material. For examples, see Test Methods and Definitions A 370 and Test Methods B 557M.

NOTE 4—Room temperature shall be considered to be 10 to 38°C unless otherwise specified.

1.2 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

A 356/A356M Specification for Steel Castings, Carbon, Low Alloy, and Stainless Steel, Heavy-Walled for Steam Turbines²

A 370 Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products³

B 557M Test Methods of Tension Testing Wrought and Cast

Aluminum- and Magnesium-Alloy Products [Metric]⁴

E 4 Practices for Force Verification of Testing Machines⁵

E 6 Terminology Relating to Methods of Mechanical Testing⁵

E 8 Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials⁵

E 29 Practice for Using Significant Digits in Test Data to

Determine Conformance with Specifications⁶

E 83 Practice for Verification and Classification of Extensometers⁵

E 345 Test Methods of Tension Testing of Metallic Foil⁵

E 691 Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method⁶

E 1012 Practice for Verification of Specimen Alignment Under Tensile Loading⁵

3. Terminology

3.1 *Definitions*—The definitions of terms relating to tension testing appearing in Terminology E 6 shall be considered as applying to the terms used in these test methods of tension testing. Additional terms being defined are as follows:

3.1.1 *discontinuous yielding*—a hesitation or fluctuation of force observed at the onset of plastic deformation, due to localized yielding. (The stress-strain curve need not appear to be discontinuous.)

3.1.2 *lower yield strength, LYS* [FL^{-2}]⁷—the minimum stress recorded during discontinuous yielding, ignoring transient effects.

3.1.3 *upper yield strength, UYS* [FL^{-2}]⁷—the first stress maximum (stress at first zero slope) associated with discontinuous yielding.

3.1.4 *yield point elongation, YPE*—the strain (expressed in percent) separating the stress-strain curve's first point of zero slope from the point of transition from discontinuous yielding to uniform strain hardening. If the transition occurs over a range of strain, the YPE end point is the intersection between (a) a horizontal line drawn tangent to the curve at the last zero slope and (b) a line drawn tangent to the strain hardening portion of the stress-strain curve at the point of inflection. If there is no point at or near the onset of yielding at which the

¹ These test methods are under the jurisdiction of ASTM Committee E-28 on Mechanical Testing and are the direct responsibility of Subcommittee E28.04 on Uniaxial Testing.

Current edition approved May 10, 2000. Published August 2000. Originally published as E 8M – 84. Last previous edition E 8M – 99.

² Annual Book of ASTM Standards, Vol 01.02.

³ Annual Book of ASTM Standards, Vol 01.03.

⁴ Annual Book of ASTM Standards, Vol 02.02.

⁵ Annual Book of ASTM Standards, Vol 03.01.

⁶ Annual Book of ASTM Standards, Vol 14.02.

*A Summary of Changes section appears at the end of this standard.

slope reaches zero, the material has 0 % YPE.

4. Significance and Use

4.1 Tension tests provide information on the strength and ductility of materials under uniaxial tensile stresses. This information may be useful in comparisons of materials, alloy development, quality control, and design under certain circumstances.

4.2 The results of tension tests of specimens machined to standardized dimensions from selected portions of a part or material may not totally represent the strength and ductility properties of the entire end product or its in-service behavior in different environments.

4.3 These test methods are considered satisfactory for acceptance testing of commercial shipments. The test methods have been used extensively in the trade for this purpose.

5. Apparatus

5.1 *Testing Machines*—Machines used for tension testing shall conform to the requirements of Practices E 4. The forces used in determining tensile strength and yield strength shall be within the verified force application range of the testing machine as defined in Practices E 4.

5.2 Gripping Devices:

5.2.1 *General*—Various types of gripping devices may be used to transmit the measured force applied by the testing machine to the test specimens. To ensure axial tensile stress within the gage length, the axis of the test specimen should coincide with the center line of the heads of the testing machine. Any departure from this requirement may introduce bending stresses that are not included in the usual stress computation (force divided by cross-sectional area).

NOTE 5—The effect of this eccentric force application may be illustrated by calculating the bending moment and stress thus added. For a standard 12.5-mm diameter specimen, the stress increase is 1.5 % for each 0.025 mm of eccentricity. This error increases to about 2.5 %/0.025 mm for a 9-mm diameter specimen and to about 3.2 %/0.025 mm for a 6-mm diameter specimen.

NOTE 6—Alignment methods are given in Practice E 1012.

5.2.2 *Wedge Grips*—Testing machines usually are equipped with wedge grips. These wedge grips generally furnish a satisfactory means of gripping long specimens of ductile metal and flat plate test specimens such as those shown in Fig. 1. If, however, for any reason, one grip of a pair advances farther than the other as the grips tighten, an undesirable bending stress may be introduced. When liners are used behind the wedges, they must be of the same thickness and their faces must be flat and parallel. For best results, the wedges should be supported over their entire lengths by the heads of the testing machine. This requires that liners of several thicknesses be available to cover the range of specimen thickness. For proper gripping, it is desirable that the entire length of the serrated face of each wedge be in contact with the specimen. Proper alignment of wedge grips and liners is illustrated in Fig. 2. For short specimens and for specimens of many materials, it is generally necessary to use machined test specimens and to use a special means of gripping to ensure that the specimens, when under load, shall be as nearly as possible in uniformly distributed pure axial tension (see 5.2.3, 5.2.4, and 5.2.5).

5.2.3 *Grips for Threaded and Shouldered Specimens and Brittle Materials*—A schematic diagram of a gripping device for threaded-end specimens is shown in Fig. 3, while Fig. 4 shows a device for gripping specimens with shouldered ends. Both of these gripping devices should be attached to the heads of the testing machine through properly lubricated spherical-seated bearings. The distance between spherical bearings should be as great as feasible.

5.2.4 *Grips for Sheet Materials*—The self-adjusting grips shown in Fig. 5 have proved satisfactory for testing sheet materials that cannot be tested satisfactorily in the usual type of wedge grips.

5.2.5 *Grips for Wire*—Grips of either the wedge or snubbing types as shown in Fig. 5 and Fig. 6 or flat wedge grips may be used.

5.3 *Dimension-Measuring Devices*—Micrometers and other devices used for measuring linear dimensions shall be accurate and precise to at least one half the smallest unit to which the individual dimension is required to be measured.

5.4 *Extensometers*—Extensometers used in tension testing shall conform to the requirements of Practice E 83 for the classifications specified by the procedure section of this test method. Extensometers shall be used and verified to include strains corresponding to the yield strength and elongation at fracture (if determined).

5.4.1 Extensometers with gage lengths equal to or shorter than the nominal gage length of the specimen (dimensions shown as “G-Gage Length” in the accompanying figures) may be used to determine the yield behavior. For specimens without a reduced section (for example, full cross sectional area specimens of wire, rod, or bar), the extensometer gage length for the determination of yield behavior shall not exceed 80 % of the distance between grips. For measuring elongation at fracture with an appropriate extensometer the gage length of the extensometer shall be equal to the nominal gage length required for the specimen being tested.

6. Test Specimens

6.1 General:

6.1.1 *Specimen Size*—Test specimens shall be either substantially full size or machined, as prescribed in the product specifications for the material being tested.

6.1.2 *Location*—Unless otherwise specified, the axis of the test specimen shall be located within the parent material as follows:

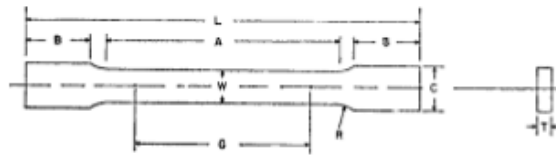
6.1.2.1 At the center for products 40 mm or less in thickness, diameter, or distance between flats.

6.1.2.2 Midway from the center to the surface for products over 40 mm in thickness, diameter, or distance between flats.

6.1.3 *Specimen Machining*—Improperly prepared test specimens often are the reason for unsatisfactory and incorrect test results. It is important, therefore, that care be exercised in the preparation of specimens, particularly in the machining, to maximize precision and minimize bias in test results.

6.1.3.1 The reduced sections of prepared specimens should be free of cold work, notches, chatter marks, grooves, gouges, burrs, rough surfaces or edges, overheating, or any other condition which may deleteriously affect the properties to be measured.

ASTM E 8M



Nominal Width	Dimensions, mm		
	Plate-Type 40 mm	Standard Specimens Sheet-Type 12.5 mm	Subsize Specimen 6 mm
G—Gage length (Note 1 and Note 2)	200.0 ± 0.2	50.0 ± 0.1	25.0 ± 0.1
W—Width (Note 3 and Note 4)	40.0 ± 2.0	12.5 ± 0.2	6.0 ± 0.1
T—Thickness (Note 5)		thickness of material	
R—Radius of fillet, min (Note 6)	25	12.5	6
L—Overall length, min (Note 2 and Note 7)	450	200	100
A—Length of reduced section, min	225	57	32
B—Length of grip section, min (Note 8)	75	50	30
C—Width of grip section, approximate (Note 4 and Note 9)	50	20	10

NOTE 1—For the 40-mm wide specimen, punch marks for measuring elongation after fracture shall be made on the flat or on the edge of the specimen and within the reduced section. Either a set of nine or more punch marks 25 mm apart, or one or more pairs of punch marks 200 mm apart, may be used.

NOTE 2—When elongation measurements of 40-mm wide specimens are not required, a minimum length of reduced section (A) of 75 mm may be used with all other dimensions similar to the plate-type specimen.

NOTE 3—For the three sizes of specimens, the ends of the reduced section shall not differ in width by more than 0.10, 0.05 or 0.02 mm, respectively. Also, there may be a gradual decrease in width from the ends to the center, but the width at each end shall not be more than 1 % larger than the width at the center.

NOTE 4—For each of the three sizes of specimens, narrower widths (W and C) may be used when necessary. In such cases the width of the reduced section should be as large as the width of the material being tested permits; however, unless stated specifically, the requirements for elongation in a product specification shall not apply when these narrower specimens are used.

NOTE 5—The dimension T is the thickness of the test specimen as provided for in the applicable material specifications. Minimum thickness of 40-mm wide specimens shall be 5 mm. Maximum thickness of 12.5-mm and 6-mm wide specimens shall be 19 mm and 6 mm, respectively.

NOTE 6—For the 40-mm wide specimen, a 13-mm minimum radius at the ends of the reduced section is permitted for steel specimens under 690 MPa in tensile strength when a profile cutter is used to machine the reduced section.

NOTE 7—To aid in obtaining axial force application during testing of 6-mm wide specimens, the overall length should be as large as the material will permit, up to 200 mm.

NOTE 8—It is desirable, if possible, to make the length of the grip section large enough to allow the specimen to extend into the grips a distance equal to two thirds or more of the length of the grips. If the thickness of 12.5-mm wide specimens is over 10 mm, longer grips and correspondingly longer grip sections of the specimen may be necessary to prevent failure in the grip section.

NOTE 9—For the three sizes of specimens, the ends of the specimen shall be symmetrical in width with the center line of the reduced section within 2.5, 0.25, and 0.13 mm, respectively. However, for referee testing and when required by product specifications, the ends of the 12.5-mm wide specimen shall be symmetrical within 0.2 mm.

NOTE 10—For each specimen type, the radii of all fillets shall be equal to each other within a tolerance of 1.25 mm, and the centers of curvature of the two fillets at a particular end shall be located across from each other (on a line perpendicular to the centerline) within a tolerance of 2.5 mm.

NOTE 11—Specimens with sides parallel throughout their length are permitted, except for referee testing, provided: (a) the above tolerances are used; (b) an adequate number of marks are provided for determination of elongation; and (c) when yield strength is determined, a suitable extensometer is used. If the fracture occurs at a distance of less than 2W from the edge of the gripping device, the tensile properties determined may not be representative of the material. In acceptance testing, if the properties meet the minimum requirements specified, no further testing is required, but if they are less than the minimum requirements, discard the test and retest.

FIG. 1 Rectangular Tension Test Specimens

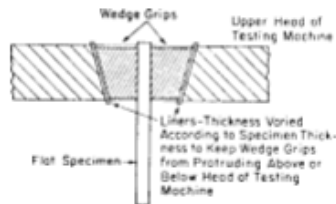


FIG. 2 Wedge Grips with Liners for Flat Specimens

NOTE 7—Punching or blanking of reduced section may produce significant cold work or shear burrs, or both, along the edges which should be removed by machining.

6.1.3.2 Within the reduced section of rectangular specimens, edges or corners should not be ground or abraded in a manner which could cause the actual cross-sectional area of the specimen to be significantly different from the calculated area.

6.1.3.3 For brittle materials, large radius fillets at the ends of the gage length should be used.

6.1.3.4 The cross-sectional area of the specimen should be smallest at the center of the reduced section to ensure fracture within the gage length. For this reason, a small taper is

ANEXO C



Designation: E 384 – 99

Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials¹

This standard is issued under the fixed designation E 384; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

1. Scope

1.1 This test method covers determination of the microindentation hardness of materials, the verification of microindentation hardness testing machines, and the calibration of standardized test blocks.

1.2 This test method covers microindentation tests made with Knoop and Vickers indenters under test forces in the range from 1 to 1000 gf (9.8×10^{-3} to 9.8 N).

1.3 This test method includes an analysis of the possible sources of errors that can occur during microindentation testing and how these factors affect the accuracy, repeatability, and reproducibility of test results.

NOTE 1—While Committee E-4 is primarily concerned with metals, the test procedures described are applicable to other materials.

1.4 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

C 1326 Test Method for Knoop Indentation Hardness of Advanced Ceramics²

C 1327 Test Method for Vickers Indentation Hardness of Advanced Ceramics²

E 3 Methods of Preparation of Metallographic Specimens³

E 7 Terminology Relating to Metallography³

E 122 Practice for Choice of Sample Size to Estimate the Average Quality for a Lot or Process⁴

E 140 Test Method for Hardness Conversion Tables for Metals³

E 175 Terminology of Microscopy⁵

E 691 Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method⁴

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee E-4 on Metallography and is the direct responsibility of Subcommittee E04.05 on Microhardness.

Current edition approved Nov. 10, 1999. Published March 2000. Originally published as E 384 – 69. Last previous edition E 384 – 89.

² Annual Book of ASTM Standards, Vol 15.01.

³ Annual Book of ASTM Standards, Vol 03.01.

⁴ Annual Book of ASTM Standards, Vol 14.02.

⁵ Annual Book of ASTM Standards, Vol 14.01.

E 766 Practice for Calibrating the Magnification of a Scanning Electron Microscope³

3. Terminology

3.1 *Definitions*—For definitions of terms used in this test method, see Terminology E 7.

3.2 *Definitions of Terms Specific to This Standard:*

3.2.1 *calibrating, v*—determining the values of the significant parameters by comparison with values indicated by a reference instrument or by a set of reference standards.

3.2.2 *Knoop hardness number, HK, n*—an expression of hardness obtained by dividing the force applied to the Knoop indenter by the projected area of the permanent impression made by the indenter.

3.2.3 *Knoop indenter, n*—a rhombic-based pyramidal-shaped diamond indenter with edge angles of $\angle A = 172^\circ 30'$ and $\angle B = 130^\circ 0'$ (see Fig. 1).

3.2.4 *microindentation hardness test, n*—a hardness test using a calibrated machine to force a diamond indenter of specific geometry into the surface of the material being evaluated, in which the test forces range from 1 to 1000 gf (9.8×10^{-3} to 9.8 N), and the indentation diagonal, or diagonals are measured with a light microscope after load removal; for any microindentation hardness test, it is assumed that the indentation does not undergo elastic recovery after force removal.

NOTE 2—Use of the term microhardness should be avoided because it implies that the hardness, rather than the force or the indentation size, is very low.

3.2.5 *verifying, v*—checking or testing the instrument to assure conformance with the specification.

3.2.6 *Vickers hardness number, HV, n*—an expression of hardness obtained by dividing the force applied to a Vickers indenter by the surface area of the permanent impression made by the indenter.

3.2.7 *Vickers indenter, n*—a square-based pyramidal-shaped diamond indenter with face angles of 136° (see Fig. 2).

3.3 *Formulae*—The formulae presented in 3.3.1-3.3.4 for calculating microindentation hardness are based upon an ideal tester. The measured value of the microindentation hardness of a material is subjected to several sources of errors. Based on Eq 1-9, variations in the applied force, geometrical variations between diamond indenters, and human errors in measuring indentation lengths can affect the calculated material hardness. The amount of error each of these parameters has on the

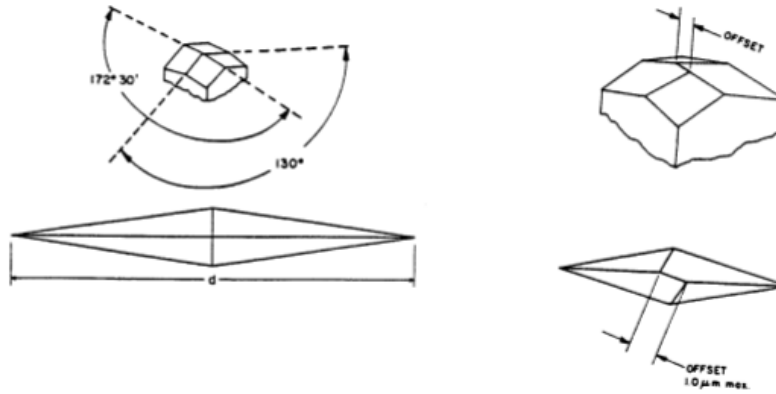


FIG. 1 Knoop Indenter

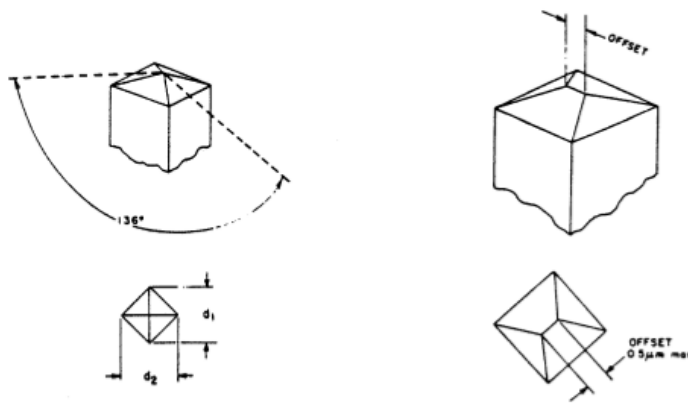


FIG. 2 Vickers Indenter

calculated value of a microindentation measurement is discussed in Section 10.

3.3.1 For Knoop hardness tests, in practice, test loads are in grams-force and indentation diagonals are in micrometres. The Knoop hardness number is calculated using the following:

$$HK = 1.000 \times 10^3 \times (P/A_p) = 1.000 \times 10^3 \times P/(c_p \times d^2) \quad (1)$$

or

$$HK = 14229 \times P/d^2 \quad (2)$$

$$c_p = \frac{\tan\left(\frac{\angle B}{2}\right)}{2 \tan\left(\frac{\angle A}{2}\right)} \quad (3)$$

where:

- P = force, gf,
- d = length of long diagonal, μm ,
- A_p = projected area of indentation, μm^2 ,
- $\angle A$ = included longitudinal edge angle, $172^\circ 30'$,
- $\angle B$ = included transverse edge angle, $130^\circ 0'$ (see Fig. 1), and
- c_p = indenter constant relating projected area of the indentation to the square of the length of the long diagonal, ideally 0.07028.

NOTE 3—HK values for a 1-gf (9.8×10^{-3} N) test are contained in Appendix X5. To obtain HK values when other test forces are employed, multiply the HK value from Table X5.1 for the d value by the actual test force, g.