

CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**ANÁLISIS DE LA DISTORSIÓN POR EFECTO TÉRMICO EN ACEROS
INOXIDABLES MARTENSÍTICOS 409 SOLDADOS MEDIANTE GTAW
MANUAL**

POR

ING. ALEJANDRO FRANCO LARA

MONOGRAFÍA

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

SALTILLO, COAHUILA

NOVIEMBRE DE 2020

CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**ANÁLISIS DE LA DISTORSIÓN POR EFECTO TÉRMICO EN ACEROS
INOXIDABLES MARTENSÍTICOS 409 SOLDADOS MEDIANTE GTAW
MANUAL**

POR

ING. ALEJANDRO FRANCO LARA

MONOGRAFÍA

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

SALTILLO, COAHUILA

DICIEMBRE DE 2020

Corporación Mexicana de Investigación en Materiales
Gerencia de Desarrollo Humano
División de Estudios de Posgrado

Los miembros del Comité Tutorial recomendamos que la Monografía **ANÁLISIS DE LA DISTORSIÓN POR EFECTO TÉRMICO EN ACEROS INOXIDABLES MARTENSÍTICOS 409 SOLDADOS MEDIANTE GTAW MANUAL**, realizada por el alumno **ALEJANDRO FRANCO LARA** con número de matrícula **20ES-267** sea aceptada para su defensa como Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial.

El Comité Tutorial

Dra. Argelia Fabiola Miranda Pérez
Tutor Académico

Dr. Humberto Hernández Belmontes
Asesor

M.T.S.I. Miguel Ángel Carrizalez Vázquez
Asesor

Vo.Bo.
Dr. Pedro Pérez Villanueva
Coordinador de Posgrado

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

Los abajo firmantes, miembros del Jurado del Examen de especialización del alumno **ALEJANDRO FRANCO LARA**, una vez leída y revisada la Monografía titulada **ANÁLISIS DE LA DISTORSIÓN POR EFECTO TÉRMICO EN ACEROS INOXIDABLES MARTENSÍTICOS 409 SOLDADOS MEDIANTE GTAW MANUAL**, aceptamos que la referida monografía revisada y corregida, sea presentada por el alumno para aspirar al grado de Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial durante la defensa de la monografía correspondiente.

Y para que así conste firmamos la presente a los [días] del [mes] del [año].

[Nombre del Presidente]
Presidente

[Nombre del Secretario]
Secretario

[Nombre del Vocal]
Vocal

AGRADECIMIENTOS

A la Corporación Mexicana de Investigación en Materiales, S.A. de C.V. (COMIMSA) por abrirme sus puertas y brindarme la oportunidad de estudiar la especialidad la cual me brindo nuevos conocimientos que me permitirán ser un mejor profesionista.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico otorgado durante la especialidad.

A los catedráticos y al comité tutorial por todo el apoyo brindado durante las materias y en la realización de este trabajo.

A mis padres quienes siempre me han apoyado y me impulsan a crecer cada día como persona.

A mis amigos y compañeros de la especialidad que siempre nos apoyábamos en todo momento.

DEDICATORIA

A todas las personas que me apoyaron durante mi formación académica y por siempre brindarme su tiempo cuando lo necesitaba.

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	i
DEDICATORIA.....	ii
CONTENIDO.....	iii
SÍNTESIS.....	5
CAPÍTULO 1	6
INTRODUCCIÓN	6
1.1 Antecedentes	6
1.2 Objetivo general	7
1.2.1 Objetivos específicos	8
1.3 Justificación	8
1.4 Planteamiento del problema	9
1.5 Aportación científica y tecnológica	9
1.6 Alcance	9
CAPÍTULO 2	10
MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE	10
2.1 Esfuerzos Residuales	10
2.2 Distorsión	13
2.2.1 Tipos de distorsión en soldadura	15
2.2.2 Propiedades de los aceros que influyen en la deformación	18
2.2.3 Distorsión en la Microestructura de los materiales	19
2.3 Soldadura GTAW o TIG	21
2.3.1 Consideraciones de calidad para la soldadura GTAW	25
2.3.2 Defectos de soldadura en proceso GTAW	26
2.3.3 Entrada de Calor y Variables en el proceso de soldadura	26
2.4 Aceros Martensíticos	29
2.4.1 Aceros Inoxidables Martensíticos	32
CAPÍTULO 3	44
ÁNÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LA BIBLIOGRAFÍA.....	44
CONCLUSIONES	47
Tablas	49
Figuras	50

BIBLIOGRAFÍA 51

SÍNTESIS

En este trabajo monográfico, se realizó una búsqueda bibliográfica sobre la distorsión que se presenta con el proceso de soldadura por arco de tungsteno con gas (GTAW, por sus siglas en inglés) al unir aceros inoxidables martensíticos.

La distorsión cambia el tamaño original de la pieza, lo que puede propiciar que se tenga que realizar de nuevo el trabajo o desechar el componente. La distorsión se genera cuando al momento de soldar se presentan esfuerzos residuales por el calentamiento y enfriamiento no uniforme.

Las causas que producen la distorsión son la aplicación de la soldadura si es de manera manual o automática, el número de pasadas, cambio de fase y entrada de calor; esta última depende de los parámetros de soldadura que se seleccionan para llevarla a cabo.

La distorsión en aceros inoxidables martensíticos con el proceso GTAW se genera por la entrada de calor, a mayor entrada de calor mayor distorsión; así mismo el procedimiento para aplicar la soldadura si es en una sola pasada o en varias, la preparación de la junta y el espesor del componente influyen en la distorsión; así como utilizar disipadores de calor, fundentes, material de aporte o un tratamiento térmico previo y posterior de la soldadura ayudan a controlar la distorsión de las piezas.

Campo específico: Distorsión en aceros inoxidables martensíticos.

Palabras Clave: GTAW, distorsión, esfuerzos residuales, aceros inoxidables.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

La soldadura por arco es un proceso que fusiona dos componentes para obtener una pieza; para unir los metales, se aplica un calor concentrado en el área de unión, dicho calor debe llevar al metal base a la fase líquida para mezclarse y al momento de enfriarse solidifique se forme el cordón de soldadura. Actualmente la mayoría de las empresas tienen dentro de sus procesos productivos la unión de materiales, dichas uniones se generan por los diferentes procesos de soldadura que existen. Algunos ejemplos de industrias que utilizan la soldadura son la automotriz, aeroespacial, petrolera, ferroviaria, entre otras.

Un buen diseño y aplicación de la soldadura permite que las propiedades físicas y mecánicas de la unión sean similares a las del metal base, aunque los materiales a unir pueden ser desimiles y por lo tanto sus propiedades son distintas antes de unirlos. Además, se pueden presentar transformaciones de fases; las cuales le pueden dar distintas propiedades al cordón de soldadura al momento de solidificar. La velocidad de calentamiento y enfriamiento es determinada por las condiciones que controlan los ciclos de temperatura-tiempo en cada punto. Debido a esto, es importante el estudio de los efectos de las variables que se presentan al momento de soldar y la relación que se genera con las propiedades en la unión [1].

En la actualidad existen diferentes procesos de soldadura y su aplicación depende de los materiales a unir o de las características que se desean tener en el

cordón, pero la mayoría de ellos tienen en común los defectos o discontinuidades que se pueden presentar al momento de soldar, los cuales pueden ser la porosidad, grietas en la soldadura o en el metal base, inclusiones, cavidades, falta de fusión y de penetración, socavado y distorsiones.

En el proceso de soldadura la distorsión es un defecto común, ya que al momento de aplicarlo el metal se expande al entrar en contacto con la fuente de calor y se contrae al momento de enfriarse, estos cambios generan esfuerzos residuales que son los que dictan el diseño final de la pieza. En ocasiones la deformación que se genera en el componente es tan grande que se tiene que volver a realizar el trabajo o inclusive desechar la pieza. Estos defectos pueden afectar en la producción, generar pérdida de tiempo y costos extras a las empresas.

Actualmente los aceros inoxidable martensíticos son utilizados en la industria automotriz por la alta resistencia a la tracción que poseen y por ser más ligeros; la soldabilidad de estos aceros no es muy buena debido al contenido de carbono que tienen en su composición química, por lo que se requiere utilizar procesos de soldadura específicos para poderlos unir con los demás componentes del vehículo; el proceso GTAW es muy utilizado para soldar aceros inoxidable ya que produce soldaduras limpias, presenta menor generación de calor en comparación con otros procesos y bien aplicada deja un número reducido de imperfecciones; así como originar mínima distorsión.

1.2 Objetivo general

Analizar la distorsión por efecto térmico que se genera en aceros inoxidable martensíticos 409 mediante el proceso GTAW aplicado de manera manual.

1.2.1 Objetivos específicos

- a) Revisión del estado del arte sobre el acero inoxidable martensítico y sus aplicaciones.
- b) Estudio de la soldabilidad de los aceros inoxidables martensíticos.
- c) Análisis de la influencia de los parámetros de soldadura del proceso GTAW, sobre la distorsión por efecto térmico.
- d) Identificar en el estado del arte como se genera la distorsión durante el proceso de soldadura GTAW aplicado en la unión de aceros inoxidables.

1.3 Justificación

La distorsión en la soldadura tiene efectos negativos sobre la precisión del ensamblaje y en la apariencia externa de las estructuras soldadas; en muchos casos se incurren a costos adicionales y retrasos en el trabajo por la corrección de la distorsión.

La realización de este trabajo monográfico permitirá concentrar información relacionada con la distorsión por efecto térmico que se genera en aceros inoxidables martensíticos al ser unidos por soldadura GTAW aplicado de manera manual, además, permitirá comprender cómo los parámetros de soldadura inciden en dichas distorsiones.

Los aceros inoxidables martensíticos son utilizados en la industria automotriz por su resistencia a la corrosión, dureza y porque representan una disminución de peso en sus componentes, por lo que la distorsión en alguna de las piezas que se utilizan puede ser perjudicial en la fabricación de vehículos; ya que al no cumplir con las dimensiones establecidas podría provocar un rechazo.

1.4 Planteamiento del problema

Durante el proceso de soldadura, el calor producido por el arco calienta los materiales lo que provoca su dilatación, posteriormente se enfrían; tendiendo a contraerse. Dichos fenómenos producen la deformación de los materiales y la formación de tensiones internas, lo que genera un cambio en el tamaño original de la pieza y está ya no cumple con las dimensiones deseadas y se tenga que realizar nuevamente el trabajo o desechar el componente.

1.5 Aportación tecnológica

Integrar un documento que muestre como el aporte térmico del proceso GTAW afecta la distorsión que se presenta en uniones de aceros inoxidables martensíticos.

1.6 Alcance

El presente trabajo de investigación monográfica comprende el estudio de la distorsión por efecto térmico que se presenta en aceros inoxidables martensíticos soldados mediante el proceso de soldadura GTAW y la relación entre los parámetros de soldadura y las distorsiones que se pueden llegar a originar.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

2.1 Esfuerzos Residuales

La distorsión en una pieza sometida a un proceso de soldadura es originada por los esfuerzos internos que sufre el material durante el calentamiento y enfriamiento no uniforme; algunos componentes al terminar de ser fabricados pueden contener esfuerzos residuales, los cuales propician la formación de grietas. Los esfuerzos residuales dependen de las propiedades de los materiales y los procesos que pasaron antes de la soldadura y se clasifican en [2]:

- *Esfuerzo macroresidual.* – Actúa sobre grandes regiones comparadas con el tamaño de grano del material. Son altamente localizados la superficie.
- *Esfuerzo microresidual.* - Se asocia con los defectos en redes atómicas; en los aceros se producen esfuerzos residuales durante las transformaciones de fase. Estos esfuerzos existen en las áreas cercanas a las dislocaciones.

Los esfuerzos residuales tienen esfuerzos de tensión y esfuerzos de compresión que se localizan en la superficie o en el interior del material [3].

- *Esfuerzo de tensión.* - Es la fuerza de tensión por unidad de área; se generan porque los átomos están distanciados ya que se ubican en un

espacio de la red cristalina que es mayor comparado con su tamaño y no hay átomos a su alrededor que reduzcan la distancia entre ellos.

- *Esfuerzo de compresión.* - Se genera cuando los átomos se encuentran más juntos de lo que deberían de estar, también se pueden ocasionar por la presencia de átomos intersticiales o sustitucionales que hacen que la red se encuentre más compacta.

En este sentido, los esfuerzos de compresión son más beneficiosos que los esfuerzos de tensión; ya que estos últimos conducen a fallas por fatiga y agrietamiento por corrosión [4]. Los esfuerzos de compresión disminuyen cuando la temperatura aumenta.

Hashemzadeh (2018), en su investigación, utilizó placas de acero A36 de 6 mm de espesor, con el proceso de soldadura GMAW aplicado de manera automática, los valores de los parámetros de soldadura para una pasada y múltiples pasadas (3 pasadas) son iguales, se utilizó una corriente de 190 A, un voltaje de 22 V y una velocidad de desplazamiento de 0.22 m/min; concluyendo que la soldadura de múltiples pasadas induce esfuerzos de compresión inferiores a comparación con soldaduras de una sola pasada; de igual manera menciona que es el espesor de la placa tiene una influencia mínima en la distribución de los esfuerzos residuales en la sección media de la misma [5].

Durante el calentamiento en el proceso de soldadura se producen deformaciones plásticas no uniformes, las cuales se presentan en el metal base; la deformación plástica no uniforme conduce a esfuerzos residuales y a la distorsión de la pieza [6].

Existen algunos métodos para el alivio de los esfuerzos residuales, pueden ser por vía térmica o mecánica.

Por vía térmica es a través del tratamiento térmico de relevado de esfuerzos el cual consiste en calentar uniformemente la unión hecha por soldadura hasta una

temperatura inferior a la de transformación de fase y mantenerla por un tiempo, seguido de un enfriamiento uniforme. Si el enfriamiento no es uniforme; se pueden llegar a producir nuevos esfuerzos residuales que pueden ser iguales o mayores que los que se pretendía prevenir. Por vía mecánica es a través de golpes lentos en el cordón de soldadura con un objeto pesado, lo que producirá un alivio de esfuerzos.

Otro método mencionado en la literatura es el tratamiento con explosivos, el cual en pruebas de laboratorio demostró que las probetas presentaron una disminución entre un 50 - 60% de esfuerzos residuales, cabe mencionar que este método no es utilizado en la industria debido a los procesos de seguridad que se tienen que seguir al momento de trabajar con explosivos [7].

La sujeción de los componentes es otra forma de reducir la distorsión ya que se impide la libre dilatación y contracción durante la aplicación del calor al momento de soldar [7].

Raju (2013), menciona que una manera de reducir la distorsión en tuberías de acero inoxidable martensítico es emplear a dos soldadores simultáneamente, el soldador uno comienza del punto 1 hasta el punto 2, mientras el segundo soldador inicia la soldadura de manera contraria, para completar una pasada de soldadura; en una tubería de 56 mm de espesor utilizando dos soldadores se logró una mejora en el control de la distorsión de un 62%, así como evitar retrabajos [8].

Los esfuerzos residuales pueden ser medidos por varios métodos, los cuales pueden ser destructivos o no destructivos; agrupados en:

- Difracción de rayos X.
- Método del barreno ciego.
- Técnica de ultrasonido.

La difracción de rayos X consiste en colocar la pieza en el difractómetro y dejándola expuesta a los rayos X; midiendo la variación de la distancia interplanar entre los planos cristalinos [9].

El método del barrenado ciego consiste en colocar una galga en la superficie del material, luego se taladra un agujero en el centro de la galga y posteriormente el sensor registrará la deformación que se creó por la relajación de esfuerzos [9].

La técnica de ultrasonido se utiliza para evaluar los esfuerzos residuales de cualquier material, se basa en la medición de los cambios en la velocidad de las ondas ultrasónicas debido a los esfuerzos después de establecer la constante elástica [10].

Existen métodos para predecir los esfuerzos residuales inducidos por soldadura, los cuales son: mediciones experimentales, modelos analíticos y predicciones numéricas; sin embargo, hay limitaciones en cada método. La selección del método depende de la información requerida y de la naturaleza de la muestra [11].

Los esfuerzos residuales inducidos por soldadura pueden llegar a reducir la resistencia final de una placa rígida en un 11% [12].

2.2 Distorsión

En la unión por soldadura, regularmente se encuentran discrepancias dimensionales al finalizar de soldar, para lograr una soldadura adecuada es necesario mantener las dimensiones específicas [13].

La distorsión se puede definir como la expansión y contracción no uniforme del metal base, a medida que el metal se calienta se expande en todas las direcciones y a medida que se enfría se contrae a sus dimensiones originales, es imposible

predecir con precisión la cantidad de contracción que se genera al momento de soldar, ya que la contracción del material depende de la cantidad de calor que es suministrado y este a la vez depende de los parámetros que se establecieron al inicio de la soldadura [14].

La dilatación y contracción de los metales trae como consecuencia la formación de esfuerzos internos; la soldadura se deforma elásticamente en respuesta a dichos esfuerzos lo que genera que se debilite la junta soldada y se tenga un cambio significativo en las dimensiones finales de la pieza.

El tipo y extensión de la distorsión y los esfuerzos residuales son influenciados por una serie de factores como lo son las propiedades mecánicas y térmicas del metal a soldar, condición de sujeción, tipo y tamaño de la fuente de calor, parámetros de la soldadura, diseño de la junta y condiciones ambientales [15].

Después de la aplicación de la soldadura, la zona afectada por el calor se contrae a medida que la temperatura desciende, dicha contracción se ve restringida por las secciones frías del material base; lo que genera tensión en la zona afectada por el calor y el cordón de soldadura [16].

La soldadura en aceros inoxidable causa aproximadamente tres veces la distorsión que se experimenta en aceros de bajo carbono utilizando la misma corriente de arco, voltaje y velocidad de desplazamiento; debido a sus diferencias en propiedades térmicas tales como conductividad y expansión térmica [17].

La expansión de los metales debido a la entrada de calor depende de sus propiedades físicas, por ejemplo, una pieza de acero inoxidable AISI 310 de 121.92 cm de largo se expandirá alrededor de 67/100 cm, al pasar de la temperatura ambiente a los 983 °C [18].

Ganesh (2014), soldó dos placas de acero inoxidable 316NL. La soldadura la realizó a tope con el proceso GTAW aplicado de manera automática; utilizando los parámetros de 100 mm/min de velocidad de desplazamiento, una corriente de 100 A y un flujo de gas de protección de argón de 10 L/h; la distorsión fue determinada con un medidor de altura digital ubicado en diferentes partes de las placas, los esfuerzos residuales fueron medidos por pruebas de ultrasonido; el análisis de los elementos finitos de la simulación de soldadura se realizó mediante una formulación acoplada, utilizó el software SYSWELD para predecir esfuerzos residuales y distorsión. Dentro de los resultados tanto a nivel laboratorio y en la simulación el máximo de esfuerzos residuales medidos a 15 mm del cordón de soldadura alcanza hasta 230 MPa. Además de mencionar que el proceso de soldadura induce deformación por pandeo; esta distorsión se debe a la liberación de esfuerzos residuales en la soldadura ya que las placas estaban sujetas durante el proceso de soldadura [19].

2.2.1 Tipos de distorsión en soldadura

Existen diferentes tipos de distorsión en las uniones soldadas. A continuación, se menciona cada una de ellas [20]. En la Figura 2.1 se ilustran los tipos de distorsiones.

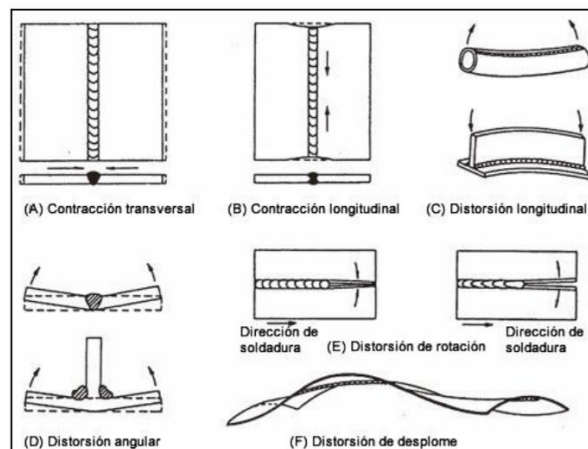


Figura 2.1. Tipos de distorsiones [20].

Contracción transversal. - La contracción se produce en la dirección perpendicular al cordón de soldadura. Esta distorsión provoca una reducción en el ancho del metal base.

Contracción longitudinal. – Es la contracción en la dirección del cordón de soldadura, lo que genera una disminución a lo largo de la soldadura.

Distorsión angular. – Es cuando una placa sufre un pequeño levantamiento en torno a la otra debido al cordón de soldadura. La soldadura tiende a ser más ancha en la parte superior que en la inferior; por lo que genera más contracción en la parte superior, por consiguiente, la distorsión angular es hacia arriba [21].

Distorsión rotacional. – Este tipo de distorsión se produce por el uso de un electrodo recubierto, una baja velocidad de desplazamiento y una entrada de calor mínima.

Doblado longitudinal. – Es una distorsión en el plano a través del cordón de soldadura y perpendicular a la placa soldada.

Pandeo. – Es una distorsión causada por una entrada de calor muy grande a materiales con espesores delgados, lo que hace que la pieza se curve. Al intentar enderezar dicha pieza se puede fracturar o quebrarse.

Vasantharaja (2012), menciona en su investigación que al soldar placas de acero inoxidable de 10 mm de espesor; preparadas en ranura en V, unidos por soldadura GTAW utilizando una corriente de 110 A, un voltaje de 12 V, una velocidad de pasada de 60 mm/min, un flujo del gas de protección de argón de 10 L/h, y aplicando la soldadura 16 veces además de adicionar material de aporte de manera manual en cada pasada; visualizó distorsión angular en la pieza de 3.0786° y valores de dureza ligeramente altos de 200 HV en el cordón de soldadura. Adicionalmente

menciona que la junta de soldadura al ser sometida a múltiples ciclos de calentamiento y enfriamiento y la adición de material de aporte exhibió mayores valores en la distorsión angular [22].

Fu (2015), midió los esfuerzos residuales en soldadura de múltiples pasadas en placas de un acero de alta resistencia DH36 de uso naval; utilizando el proceso de soldadura de arco metálico con protección de gas (GMAW, por sus siglas en inglés) en las primeras dos pasadas aplicadas de manera manual y la última pasada fue realizada por el proceso de soldadura de arco de electrodo sumergido (SAW, por sus siglas en inglés) aplicado de forma automática; comenta que en la primer pasada las regiones cercanas al charco de soldadura se expanden y en la superficie se comprime, dando como resultado esfuerzos de compresión y la magnitud de la distorsión longitudinal permanece constante. Durante la aplicación de la segunda pasada la región donde se aplica se recalienta y se somete nuevamente a un esfuerzo de compresión, cuando la temperatura disminuye el esfuerzo de compresión disminuye y se convierte en un esfuerzo de tensión y mantiene un valor constante. Además, observó un comportamiento similar en la última pasada. Obteniendo como resultados un esfuerzo residual en la superficie de 450 MPa de esfuerzo longitudinal y de 140 MPa de esfuerzo transversal [23].

Existen diferentes causas que generan las distorsiones en los materiales al momento de pasar por el proceso de soldadura, a continuación, se describen algunas de ellas [24]:

Esfuerzos Residuales. – Se originan debido al cambio en las dimensiones no uniforme en los materiales, si los esfuerzos que se presentan son más grandes que el límite elástico, se desarrolla una deformación plástica; provocando un cambio permanente en los materiales.

Entrada de Calor. – La entrada de calor se relaciona tanto con la distorsión como con el número de veces que se aplica la soldadura, ya que a mayor número de

aplicaciones de soldadura mayor va a ser la entrada de calor y por ende mayor será la distorsión que se presenta en el material. A menor entrada de calor menor distorsión.

Aplicación de la Soldadura. – La soldadura aplicada de manera semiautomática y automática producen menos distorsión, ya que los cordones de soldadura son más continuos lo que genera que la distribución del calor sea más uniforme. Cuando la soldadura es aplicada de manera manual la distorsión que se puede presentar en las piezas es debido a la distribución térmica no uniforme, por lo que depende de gran manera de la habilidad del soldador para tener las mínimas distorsiones.

Propiedades de los materiales. – El coeficiente de expansión térmica es la propiedad de los materiales que más influye en la distorsión, ya que en cuanto más crece un material mayor será la distorsión.

2.2.2 Propiedades de los aceros que influyen en la deformación

A medida que la temperatura en el área de soldadura aumenta el esfuerzo de fluencia, elasticidad y conductividad térmica de los aceros disminuye, mientras que la expansión térmica y el calor específico se incrementan. El conocimiento de los valores aproximados de estas propiedades ayuda para anticiparse a la deformación. Algunas propiedades se describen a continuación [25]:

Coeficiente de expansión térmica: Es el incremento en el volumen de un material a medida que aumenta su temperatura; los metales con alto coeficiente se expanden y contraen más que los metales con coeficientes más bajos; la incompatibilidad de los coeficientes entre los metales a soldar puede generar un esfuerzo residual en la unión, la cual, al combinarla con la tensión aplicada, las posibilidades de deformación aumentan.

Conductividad térmica: Es la capacidad de conducir el calor; la soldadura de metales de baja conductividad térmica (como aceros inoxidable y algunas aleaciones) resulta en un aumento en el gradiente de temperatura, lo que genera un aumento de la contracción en los metales.

Resistencia a la fluencia: Es la deformación irrecuperable de los materiales; a partir de la cual solo se recuperará la parte de su deformación correspondiente a la deformación elástica. Cuando ocurre el estiramiento y adelgazamiento, la soldadura y el metal base aparecen esfuerzos residuales que los llevan hasta su resistencia a la fluencia. En materiales con alta resistencia a la fluencia en el área soldada, los altos esfuerzos residuales pueden actuar para deformar el conjunto. Por el contrario, en metales de baja resistencia, las deformaciones son menos probables o de menor intensidad.

Módulo de elasticidad: Es la medida de la tenacidad y rigidez de un material; mientras mayor el módulo, más rígido el material, los materiales con valores bajos son más fáciles de doblar bajo carga. Con un módulo de elasticidad alto es más probable encontrar resistencia a la deformación.

2.2.3 Distorsión en la microestructura de los aceros

Como ya se mencionó con anterioridad, la distorsión de los materiales se produce por la expansión y contracción, ya que al calentarse y enfriarse se generan esfuerzos residuales, los cuales influyen en la formación de diferentes tipos de distorsiones ya mencionados; en este tema se examinará como los cambios de fase en la microestructura de los aceros también influyen en las distorsiones.

En piezas de acero a las que se les aplico soldadura, la transformación de austenita a martensita al momento de solidificar durante el enfriamiento tiene una influencia significativa en los esfuerzos residuales y en la distorsión que se llega a

presentar; cuando se forma la martensita el volumen del metal aumenta. Durante el proceso de soldadura, la magnitud de la expansión volumétrica en la ZAC y en la zona de fusión depende de la cantidad de martensita que se forma [26].

Un ejemplo de distorsiones en la microestructura es el siguiente: al momento de enfriar un acero que se encuentra en fase de austenita, si el enfriamiento es rápido la microestructura que se forma es la martensita cuya estructura cristalina es tetragonal centrada en el cuerpo (BCT, por sus siglas en inglés), y si el enfriamiento en el centro del acero es lento se presenta la ferrita cuya estructura cristalina es cubica centrada en el cuerpo (BCC, por sus siglas en inglés); como son fases cuyos volúmenes son diferentes en el acero se generó una distorsión por cambio de fase.

El calor de entrada en el proceso de soldadura afecta la velocidad de enfriamiento de los materiales a unir, al hacer más rápido o lento el proceso de enfriamiento tras soldar las piezas afecta en la microestructura final que se presenta en la soldadura y de la ZAC, estos cambios microestructurales hacen que se tengan propiedades mecánicas diferentes [27].

El calor de entrada está relacionado con las variables de intensidad de arco, voltaje, velocidad de desplazamiento y eficiencia de la máquina de soldar. Zappa (2011), en su estudio menciona que al aplicar soldadura FCAW a aceros inoxidable martensíticos la microestructura se constituyó por una matriz martensítica, colonias de ferrita delta y austenita retenida, además menciona que al emplear mayor cantidad de gas de protección (CO_2) aumentó la cantidad de salpicaduras, así como la geometría del cordón de soldadura aumentando la penetración y disminuyendo el ancho [28].

La reducción de los esfuerzos residuales y distorsión al momento de soldar es fundamental para mejorar la calidad de las uniones. En ciertos aceros, para evaluar el esfuerzo residual y la distorsión que se generan se debe considerar las transformaciones de fase metalúrgicas que se pueden llegar a presentar [29].

Deng (2009), en su estudio menciona que aceros de bajo carbono al ser soldados con GTAW, la transformación de fase tiene un efecto mínimo en la generación de esfuerzos residuales y distorsión debido a una pequeña dilatación y una alta temperatura de transformación al momento de presentarse la martensita; además menciona que para aceros de medio carbono la transformación de fase tiene un efecto significativo sobre los esfuerzos residuales y la distorsión debido a la presencia de una gran dilatación y una baja temperatura de transformación [30].

2.3 Soldadura GTAW o TIG

La soldadura TIG (Tungsten Inert Gas) también denominada GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) según ANSI/AWS A3.0, es un proceso en el cual se utiliza un electrodo de tungsteno no consumible (dada la elevada resistencia a la temperatura ya que funde a los 3410 °C), el cual genera calor al establecer un arco eléctrico entre el electrodo y la pieza a soldar, el material de aporte se adiciona de manera separada en forma de alambre y su utilización es opcional, ya que la fusión de los materiales a soldar se puede llevar a cabo solamente con el electrodo de tungsteno. Además, para proteger el charco de soldadura se utiliza un gas inerte (helio y argón) que impide el contacto con el oxígeno de la atmósfera. En la Figura 2.2 se ilustra el proceso de soldadura GTAW [31].

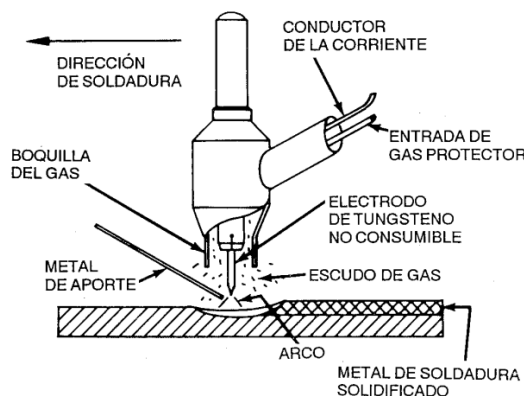


Figura 2.2 Proceso de soldadura GTAW [31]

El proceso GTAW se puede utilizar para soldar metales ferrosos y no ferrosos, tales como aceros martensíticos, aluminio, aceros inoxidable, magnesio y materiales sensibles a la corrosión como el titanio y circonio; proporciona una soldadura limpia de gran calidad, una elevada pureza metalúrgica libre de defectos y buen acabado superficial, ya que los cordones de soldadura que se generan son más resistentes, dúctiles y menos sensibles a la corrosión. Principalmente es utilizada en la unión de juntas de alta calidad en centrales nucleares, industria química, de la construcción, de alimentos, generación de energía y aeroespacial [32].

El equipo básico para la soldadura por GTAW está compuesto por una fuente de poder, pistola (refrigerada por aire o por agua), electrodo de tungsteno, proveedor de gas inerte y cilindro de gas protector. En la Figura 2.3 se ilustra el equipo de soldadura GTAW [31].

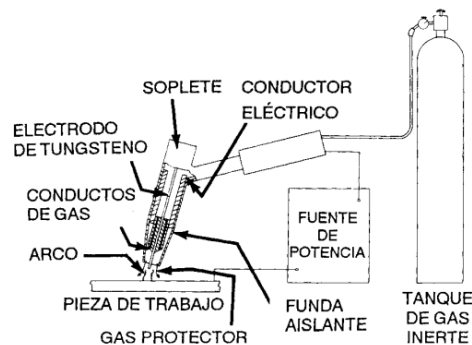


Figura 2.3 Equipo de soldadura GTAW [31]

Los sopletes de GTAW sostienen el electrodo de tungsteno que transporta la corriente de soldadura al arco y conduce el gas de protección a la zona del arco; dentro de sus especificaciones se encuentra la máxima corriente que puede transportar sin sobrecalentarse, el enfriamiento puede ser por gas o por agua, los sopletes de aplicación manual tienen un ángulo de cabeza (ángulo entre el electrodo

y el mango) de 120°. En la Figura 2.4 se muestra el soplete enfriado por agua para GTAW manual [31].

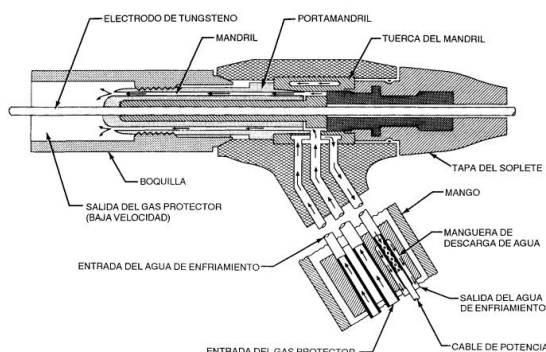


Figura 2.4 Soplete enfriado por agua para GTAW manual [31].

El tipo de corriente que se utiliza en el proceso GTAW depende del material a soldar, normalmente la CA (Corriente Alterna) se emplea para soldar aluminio o aceros inoxidable y la CC (Corriente Continua) se emplea en materiales ferrosos [33]. En la Tabla 2.1 se muestran algunos efectos cuando se utiliza CC y CA.

Tabla 2.1 Características de Soldadura de acuerdo con el tipo de corriente [33].

TIPO DE CORRIENTE	CORRIENTE CONTINUA		CORRIENTE ALTERNA
Polaridad	Directa	Inversa	
Flujo de electrones e iones			
Aspecto de la penetración			
Balance Calórico	70% en la pieza, 30% en el electrodo	30% en la pieza, 70% en el electrodo	50% en la pieza 50% en el electrodo
Penetración	Profunda y estrecha	Ancha y menos profunda	Media
Comportamiento del Electrodo	Excelente	Pobre	Buena

La función de los gases de protección en el proceso GTAW es evitar el contacto entre el aire, el electrodo y el material de aporte y con esto evitar que el material se

oxide durante el paso del tiempo. Los gases más empleados son el argón y el helio o una combinación de ellos, los cuales deben de tener una pureza del 99.99%. Normalmente se suele utilizar de 7 a 16 L/min para el argón y de 14 a 24 L/min para el helio, el empleo excesivo del gas produce turbulencias y favorece a la entrada de aire contaminando el charco de soldadura [33].

Existe diversos tipos de electrodos disponibles para soldadura por GTAW; entre los materiales disponibles se encuentra el tungsteno ya sea en estado puro o aleado con torio (Th) o circonio (Zr), estos elementos aleantes favorecen a ciertos aspectos como el encendido del arco y mejorar su estabilidad. Los electrodos se presentan en forma cilíndrica con una gama de diámetros de 1.6, 2.4 y 3.2 mm, además elafilado en el extremo del electrodo influye en la calidad de la soldadura.

El tamaño del diámetro del electrodo tiene una relación con el espesor del metal a soldar y la corriente; se suele utilizar de 30 a 40 amperes por milímetro de espesor del metal, los rangos de corriente que se utilizan dependiendo del diámetro del electrodo son los siguientes: para 1.6 mm es de 30 a 120 A, 2.4 mm es de 80 a 240 A y de 3.2 es de 200 a 380 A.

Dependiendo del metal base es el electrodo que se va a utilizar, debe ser uno que tenga la misma composición química y propiedades o ser similares, para que se mantengan dichas propiedades en la unión.

En aplicaciones donde no sea posible realizar un precalentamiento y un tratamiento post-soldadura para el alivio de tensiones al soldar aceros inoxidables martensíticos; se puede utilizar material de aporte de grado austenítico como el 309, 310, 312 o similares, esto con la intención de aportar más ductilidad al cordón y asimile las tensiones y deformaciones de las zonas cercanas al cordón además se evita la formación de grietas.

Al momento de soldar con corriente continua electrodo al negativo, las soldaduras se unen mediante los siguientes mecanismos [34]:

- Energía cinética de los electrones que constituyen la energía de arco.
- Calor de consideración de los electrones que penetran en la superficie de trabajo.
- Radiación del arco.
- Conducción térmica del plasma de arco a la pieza de trabajo.

2.3.1 Consideraciones de calidad para la soldadura GTAW

Al realizar uniones de soldadura a través del proceso GTAW se deben de tener algunas consideraciones que aseguren la buena calidad del trabajo; como se mencionan a continuación [32]:

- La limpieza, es necesario eliminar grasas, aceites, pinturas y principalmente eliminar la corrosión en el área de unión del metal base, así como del electrodo, ya que estos agentes actúan como impurezas al momento de soldar y generan defectos que dañan la soldadura e inclusive pueden generar cambios en sus propiedades.
- Control de la penetración de la pasada de raíz.
- Fijación, se requiere cuando las piezas no pueden sostenerse solas o si no puede tolerarse ninguna distorsión que genere un cambio en las dimensiones del metal después del proceso de soldadura.
- Habilidad del soldador, al no ser un proceso automatizado la aplicación de la soldadura no es uniforme lo que puede generar que en algunas zonas este más cargado el cordón con material de soldadura, por lo que la habilidad del soldador es de gran importancia para tener el menor número de imperfecciones.
- Libre de salpicaduras que ocurren en otros procesos de soldadura por arco.

2.3.2 Defectos de soldadura en proceso GTAW

La soldadura GTAW, proporciona uniones limpias y de gran calidad, ya que tiene un bajo riesgo de inclusiones de escoria y en ocasiones simplifica la limpieza final de las uniones, pero estas características no libran a esta soldadura de tener imperfecciones, algunos defectos son [33]:

- Penetración excesiva, se caracteriza por un excedente en material de soldadura respecto a la cantidad requerida para rellenar la junta. También puede generar que la zona afectada por el calor sea más grande en algunas regiones del cordón.
- El soldador requiere destreza y coordinación.
- Penetración insuficiente, el material no alcanza a cubrir la totalidad de la junta lo que provoca que el material sea débil y se fracture.
- Porosidad, son discontinuidades de tipo cavidad provocados por bolsas de gas que se quedan retenidas en la soldadura.
- Inclusiones de tungsteno, en ocasiones las partículas de tungsteno quedan retenidas en el depósito de soldadura, y se llega a generar cuando el electrodo toca al material de aporte.
- No tiene la capacidad de soldar materiales gruesos en una sola pasada; en preparaciones a tope para soldar aceros inoxidable está limitado a 3mm. [35].

2.3.3 Entrada de Calor y Variables en el proceso de soldadura

El calor que se introduce durante el proceso de soldadura y el enfriamiento posterior controlan la penetración, las propiedades mecánicas y la microestructura que se forma en el cordón de soldadura y en la ZAC. El calor requerido para realizar

la soldadura depende del grosor, conductividad térmica y punto de fusión del metal base [36].

La entrada de calor (Q su unidad de medida es J/mm) es la relación entre la potencia y la velocidad de soldadura [37], se expresa de la siguiente manera:

$$Q = \frac{\eta VI}{s}$$

- Intensidad de arco (I): una intensidad alta origina salpicaduras, cordones anchos e irregulares; mientras una intensidad baja también origina excesiva salpicadura, cordones angostos y convexos con poca penetración; su unidad de medida es el amperaje (A) [38].
- Voltaje (v): En proceso de soldadura semiautomático, el voltaje es proporcional a la velocidad de alimentación del electrodo; su unidad de medida es el voltaje (V) [39].
- Velocidad de desplazamiento (s): A mayor velocidad menor entrada de calor, a menor velocidad mayor entrada de calor; su unidad de medida es mm/s [40].
- Eficiencia de la máquina de soldadura (η): el rendimiento depende del proceso a utilizar, con soldadura SMAW su eficiencia es del 75%, la soldadura por GMAW y SAW tienen una eficiencia del 90% y para soldadura GTAW su eficiencia es del 80% [41].

Kermanpur (2008), estudio el efecto de la variación en la entrada de calor para la soldadura a tope en tuberías de 32 mm de diámetro de espesor, con GTAW utilizando los parámetros para el experimento aplicando una corriente de 100 A, un voltaje de 125 V y una polaridad de corriente directa electrodo al negativo (DCEN); mostró que el aumento de la entrada de calor resultó en un charco de soldadura más amplio junto con una temperatura más alta en la ZAC [42].

Tseng (2010), trabajó con placas de acero inoxidable austeníticos 304 y 310 de 6 mm de espesor, los cuales fueron unidos por soldadura GTAW aplicada de manera automática con arco pulsado, utilizando los mismos parámetros para ambas placas, corriente de 150 A, voltaje de 12 V, velocidad de desplazamiento de 15 cm/min y un pulso intermitente de 112 A y 105 A; observó que una frecuencia de pulso más alta o un espaciado en el pulso más pequeño mejoran la densidad de la energía de la entrada de calor de la soldadura, reduciendo así la distorsión angular. También menciona que el acero 310 obtuvo una mayor distorsión angular ya que tiene una conductividad térmica menor que el 304 [70].

Slovacek (2015), menciona que los parámetros de soldadura apropiados para tener la menor distorsión en soldadura con GTAW, al soldar aceros inoxidables austeníticos; son los siguientes: corriente de 105 A, voltaje de 30 V y una velocidad de desplazamiento de 14.8 cm/min; además de mencionar la relación que existe entre la distorsión con la entrada de calor, forma y tamaño del cordón de soldadura [4].

Ravisankar (2014), en su investigación aplica diferentes entradas de calor a láminas de aceros inoxidables. El rango va de los 200 hasta los 500 J/mm, con soldadura GTAW; comenta que con una entrada de calor de 200 J/mm tiene una penetración inadecuada ya que la temperatura máxima de 1407°C no fue suficiente para fundir el metal base; para las entradas de 400 y 500 J/mm la zona de fusión y la ZAC son amplias ya que las máximas temperaturas que alcanzaron fueron de 2521 °C y 3088 °C respectivamente que dan como resultado esfuerzos residuales y distorsión. Por último, mencionó que una entrada de calor de 300 J/mm proporciona una adecuada penetración de soldadura y ZAC ya que la distribución del calor es más uniforme y la máxima temperatura que alcanza es de 1960 °C [37].

Vemanaboina (2018), en su estudio menciona que los parámetros de soldadura adecuados para minimizar la distorsión al soldar con GTAW en aceros inoxidables disimiles, son los siguientes: corriente de 160 A, corriente de pulsado de 80 A,

voltaje de 15 V y una velocidad de desplazamiento 85.58 mm/s; además comenta que con el proceso de corriente pulsada y utilizando material de aporte se disminuyó la distorsión angular en 17% [43].

2.4 Aceros Martensíticos

Si se enfría rápidamente la austenita a una velocidad aproximadamente de 120 °C/hora sin dar oportunidad a que los átomos difundan; la estructura que se forma se denomina martensita (es la microestructura más dura y frágil de los aceros). La martensita es una solución sobresaturada de carbono que presenta una estructura tetragonal centrada en el cuerpo [44].

La martensita puede generar dos morfologías diferentes, dependiendo del contenido de carbono. Contenidos $\leq 0.6\%$ de C, se genera martensita de morfología de tipo listón; mientras que contenidos $\geq 1.0\%$ de C, genera la martensita de morfología de tipo placas. En el rango de 0.6% a 1.0% se forma una microestructura mixta (listón + placas) [45]. A continuación, se describe cada tipo de microestructura que presenta la martensita.

La martensita en listón Figura 2.5, tiene una apariencia tan fina que se hace difícil su observación, se forma de un lado y se alinean de forma paralela una de otra. Esta microestructura tiene la particularidad de que se agrupan en entidades grandes que se nombran bloques.

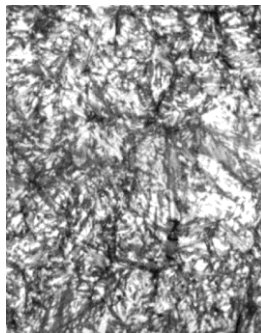


Figura 2.5 Estructura de martensita en listón [45].

La microestructura en placas Figura 2.6, tienen apariencia de una aguja, éstas son más largas y forman ángulos grandes entre ellas; y crecen cortando el grano austenítico.

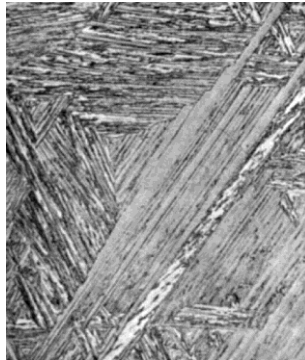


Figura 2.6 Estructura martensita en placas [45].

Los aceros con microestructura martensítica son los más duros y mecánicamente resistentes, pero también los más frágiles y menos dúctiles. La dureza de estos aceros depende del contenido en carbono; aun así, son más tenaces que los aceros perlíticos.

Para la formación de aceros con microestructura martensítica es necesario calentar el acero a la temperatura austenítica y posteriormente darle un enfriamiento rápido, a este tratamiento térmico se le conoce como templado, la mayoría de los aceros después de ser templados son revenidos.

El revenido es otro tratamiento térmico que consiste en calentar el acero templado por debajo de una temperatura aproximada de 723 °C seguido de un enfriamiento controlado en aceite o agua. El revenido le brinda al acero una buena tenacidad y vuelve su ductilidad. El acero templado al ser calentado e ir incrementando la temperatura va sufriendo transformaciones en su microestructura [46].

Liu (2003), menciona en su estudio que el revenido de un acero en agua o aire no disminuye los esfuerzos residuales; así mismo menciona que los esfuerzos que

se presentan en la superficie y en el centro del componente se reducen cuando se le mantiene a una temperatura de 600 °C [47].

Arivazhagan (2011), en su estudio menciona que al soldar con GTAW un acero martensítico ferrítico de activación reducida (RAFM por sus siglas en inglés); la microestructura que se forma al finalizar la soldadura depende de la entrada de calor; ya que una entrada de calor de 0.52 kJ/mm contiene un 6% de ferrita mientras que una entrada de calor de 0.81 kJ/mm contiene un 10% de ferrita; ya que un aumento en la entrada de calor y una disminución en la velocidad de enfriamiento durante la soldadura conduce un aumento en la formación de ferrita δ en el cordón de soldadura [48]. En la Figura 2.7 se muestra la microestructura que se forma con las distintas entradas de calor; calor de entrada de 0.81 kJ/mm (a) y calor de entrada de 0.052 kJ/mm (b).

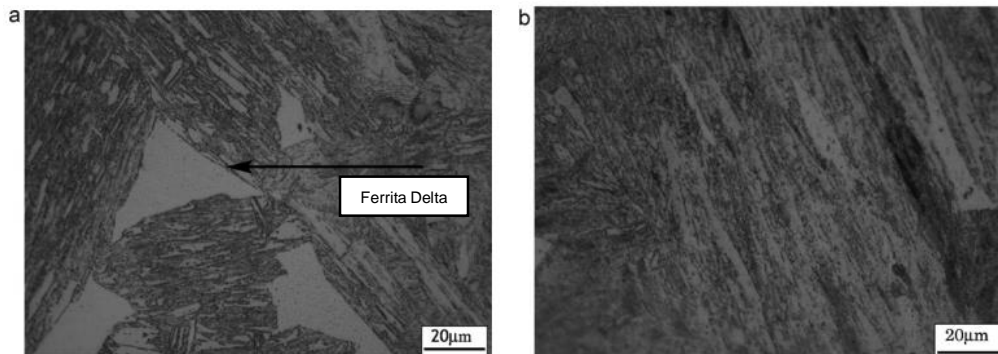


Figura 2.7 Efecto del calor de entrada en la microestructura. [48].

La martensita es una estructura metaestable, por lo que empieza a transformar cuando se le aplica calor al acero para que inicie con las transformaciones de fase; las transformaciones se generan en distintas etapas de acuerdo con la temperatura que se le vaya aplicando [46]. A continuación, se mencionan dichas etapas:

- La primera etapa se presenta al calentar el acero templado a una temperatura de entre los 100 °C a 200 °C, si el contenido de carbono es menor al 0.2% la primera etapa puede comenzar a partir de los 20 °C, se

presenta una redistribución del carbono, que es precipitado por un carburo llamado épsilon, de estructura hexagonal y con formula $Fe_{2,4}C$.

- La segunda etapa se presenta a los 200 °C hasta los 300 °C, en esta etapa la austenita retenida transforma a bainita inferior.
- La tercera etapa consta del rango de temperaturas entre los 300 a 400 °C, inicia la formación de cementita (Fe_3C) de forma esférica, también en esta etapa el carburo épsilon sufre una redisolución, en esta etapa se pierde tenacidad.
- La cuarta etapa inicia a partir de temperaturas mayores a los 400 °C, en esta etapa se aumenta la tenacidad debido a la estructura que se presenta que son esferas de cementita en una matriz de ferrita.

La soldadura de aceros microaleados de base martensita presenta una disminución de microdureza en la ZAC, esto debido a la microestructura que se forma durante el proceso de soldadura. La microestructura que se puede llegar a presentar depende de los parámetros que se toman en consideración al momento de realizar la soldadura [49].

2.4.1 Aceros Inoxidables Martensíticos

Los aceros inoxidables son una aleación de hierro, carbono, cromo y níquel; siendo una de sus principales características su alta resistencia a la corrosión, ya que el cromo funciona como una capa protectora en la superficie del acero protegiéndolo de la oxidación. Existen diferentes tipos de aceros inoxidables y cada uno contiene características distintas; los aceros inoxidables se dividen en: ferríticos, martensíticos, austeníticos, dúplex y endurecibles por precipitación.

Los aceros inoxidables martensíticos son ideales para bastidores automotrices, vigas de puerta, rieles de asiento y conjunto de rieles de combustible, ya que sus propiedades mecánicas logran una reducción de peso. Aunque el nivel de cromo va

de 10.5 a 18% en peso es el mismo que los aceros inoxidable ferríticos (por ejemplo, tipo 409) pero su contenido de carbono de 1.2% en peso da como resultado una transformación completa de ferrita a austenita a alta temperatura [50].

Los aceros inoxidable martensíticos son la primera familia de los inoxidable, el contenido de cromo en estos aceros varia del 10.5% al 18% y su contenido de carbono va del 0.1% al 1.2%, y algunos elementos añadidos como el molibdeno $\leq 1.8\%$, níquel $\leq 6\%$ y vanadio $\leq 0.20\%$; además representan una porción de la serie de los 400 AISI (American Iron & Steel Institute). Las características principales de estos aceros son:

- Tiene una menor resistencia a la corrosión en comparación con los aceros austeníticos y ferríticos.
- Son magnéticos con baja ductilidad.
- A mayor contenido de carbono, será más difícil de soldar.
- En temperaturas altas presentan una alta resistencia a la fluencia.
- Buenas propiedades mecánicas y son de bajo costo.
- Al darles un tratamiento térmico pueden desarrollar alta resistencia mecánica y dureza.
- Endurecen por tratamiento térmico.

Los grados comunes de esta familia son los siguientes:

- **AISI 403:** Se emplea en piezas que van a ser sometidas a grandes esfuerzos y altas temperaturas.
- **AISI 410:** Presenta buena ductilidad, es fácil de trabajar y de soldar. Son utilizados para ambientes corrosivos. Algunas piezas generadas de este material son flechas para bombas, partes de válvulas, pernos, bujes entre otros.
- **AISI 416:** Se adiciona con Selenio, que le da una buena maquinabilidad además presenta resistencia a la corrosión para temperaturas menores de

650°C. Algunas piezas que se producen a partir de este material son tornillos, conectores, tuercas, cerraduras entre otros.

- **AISI 420:** Contiene un alto contenido de carbono lo que le brinda una gran dureza, pero menos resistencia a la corrosión. Este material es utilizado en instrumentos dentales quirúrgicos.
- **AISI 422:** Soporta temperaturas de hasta 650 °C, además presenta mediana maquinabilidad.
- **AISI 431:** Puede ser endurecido por tratamiento térmico, además presenta una buena ductilidad y resistencia al impacto, las piezas generadas con este material son utilizadas en la industria aeroespacial.
- **AISI 440:** Presenta la más alta dureza y resistencia a la abrasión, además presenta baja maquinabilidad; las piezas producidas con este tipo de material son cuchillos, inyectores, equipo quirúrgico entre otros [51].

En la Tabla 2.3 se muestran la composición química de algunos aceros inoxidables martensíticos.

Tabla 2.3 Composición química aceros inoxidables [51].

Tipo de acero inoxidable	Elemento en porcentaje de peso					
	Carbono	Manganeso	Silicio	Cromo	Molibdeno	Níquel
410	0.15 máx.	1.00 máx.	1.00 máx.	11.5-13.5	----	0.50 máx.
420	0.15-0.40	1.00 máx.	1.00 máx.	12.0-14.0	----	0.50 máx.
440	0.60-0.75	1.00 máx.	1.00 máx.	16.0-18.0	0.75 máx.	0.50 máx.

La templabilidad de estas aleaciones hace que se produzca martensita en el cordón de soldadura, la martensita tiende a la fisuración, por lo que es recomendable antes de aplicar la soldadura realizar un precalentamiento entre 200-300 °C (la temperatura depende, del contenido de carbón del metal base y composición del metal de aporte) y antes de que el componente se enfríe; se recomienda que al terminar de soldar darle un tratamiento post-soldadura entre 600-700 °C de revenido seguido de un enfriamiento controlado [52].

Los aceros inoxidable martensíticos durante el proceso de soldadura la ZAC puede alcanzar la temperatura de austenización, por lo que si el enfriamiento del cordón se realiza a una velocidad considerable puede formarse martensita en dicha zona. La dureza de la ZAC depende del contenido de carbón del metal base, a mayor dureza disminuye la tenacidad y aumenta el riesgo de agrietamiento [53].

Ahmed (2016), en su estudio menciona que al soldar aceros inoxidable martensíticos con GMAW en el metal base se presentan esfuerzos de contracción. Una parte de la ZAC que se encuentra cerca del metal base presenta esfuerzos de contracción; mientras que la parte restante cerca del cordón de soldadura presenta esfuerzos de tensión, mientras que el cordón de soldadura presenta esfuerzos de tensión quienes pueden actuar como generadores de grietas [54].

Neubert (2017), en su investigación unió dos placas de aceros inoxidable martensíticos con soldadura GMAW aplicando una entrada de calor de 0.741 kJ/mm aplicando una simple pasada; comenta que una distribución no uniforme de cromo-níquel durante la transformación martensítica, genera una transformación martensítica no uniforme, lo que provoca una influencia significativa en la distorsión transversal, así como un aumento en los esfuerzos de tensión. Dicho aumento podría ser responsable de propagación de grietas dentro del cordón de soldadura [55].

El acero inoxidable martensítico 409 está configurado con al menos una capa superficial martensítica que se forma mediante un tratamiento térmico y posterior enfriamiento, está conformado por ferrita/martensita libre de níquel; además su contenido de cromo es bajo; por lo que tiene una baja resistencia a la corrosión además es utilizado en escapes de automóviles [56].

Así mismo los aceros inoxidable martensíticos también son utilizados en otras partes de los vehículos ya que poseen una resistencia alta a la tracción con valores

que oscilan entre los 900 a 1700 MPa, los componentes del vehículo que son hechos de acero son las vigas de las puertas y los rieles de los asientos; cuando estas piezas se dañan es generalmente difícil repararlas debido a su mayor límite elástico, lo que lleva a un alto número de reparaciones o a la sustitución del componente. En la Figura 2.8 se muestran los diferentes aceros que se encuentran en la carrocería de los automóviles [57].

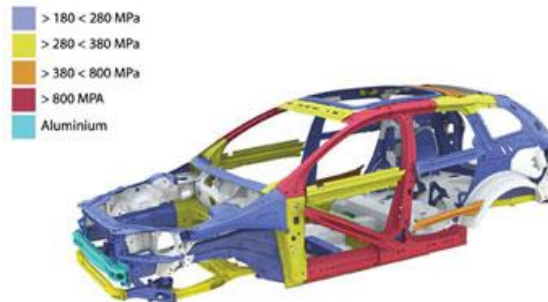


Figura 2.8 Resistencia a la tracción de los distintos aceros utilizados en la carrocería de un automóvil [57].

Simonetto (2015), en su investigación menciona que las piezas forjadas en caliente de acero inoxidable martensítico con secciones delgadas pueden sufrir distorsiones geométricas durante su fase de enfriamiento, lo que da como resultado un cambio en la dimensión final del componente; dicho cambio es influenciado por la transformación de fase que se presenta al momento de enfriarse ya que la microestructura cambia de austenita a martensita y cada fase tiene un volumen específico diferente, además si la pieza contiene esfuerzos residuales durante el cambio de la microestructura se presenta una deformación plástica en el material [58].

Ikushima (2014), en su trabajo utilizó un método de análisis que llamo FEM explícito idealizado (IEFEM, por sus siglas en inglés), donde mide los esfuerzos residuales que se generan al unir una placa de 45 mm de espesor de acero inoxidable martensítico utilizando múltiples pasadas, la unión se realizó a tope,

empleando los siguientes parámetros de soldadura; una intensidad de arco de 120 A, un voltaje de 17 V y una velocidad de desplazamiento de 6.66 mm/s, el número de pasadas fue de 33 veces; obteniendo como resultado que en la superficie de la placa se formaron esfuerzos de tensión mientras que en el cordón de soldadura se presentaron esfuerzos de compresión mínimos, esto debido a que la ranura es más ancha en la parte superior que la parte inferior, además los esfuerzos de tensión generaron en la placa una distorsión angular [59].

Li (2003), en su investigación soldó dos placas de 2.5 mm de espesor de aleación de titanio a tope, en una utilizando el proceso GTAW, en la segunda placa también utilizó el proceso GTAW agregando un disipador de calor esto como una fuente de enfriamiento; dicho disipador de calor se mueve después del arco de soldadura; la función del disipador es aventar gotas de agua al cordón de soldadura, así mismo utilizó el argón como gas de protección esto con la intención de evitar que el agua entrara en contacto con el charco de soldadura y se produjera una oxidación; los parámetros que utilizó para llevar a cabo ambas uniones fueron las mismas, intensidad de corriente de 200 A, voltaje de 11.9 V, velocidad de desplazamiento de 3.3 mm/s y un flujo del gas de protección de 4 L/min; obteniendo como resultado que la placa de titanio unida por GTAW con disipador de calor presentara menores esfuerzos residuales (200 MPa) en comparación con la otra placa (400 MPa), además de quedar libre de distorsión. Esto se debe a la contracción de la parte donde actúa el disipador de calor ya que genera esfuerzos de tensión en la zona entre el charco de soldadura y las gotas de agua; lo que forma esfuerzos de tensión que compensan los esfuerzos de compresión que se forman durante el proceso de calentamiento [60]. En la figura 3.1 se muestra las placas de aleación de titanio unidas por las distintas formas de aplicar la soldadura GTAW.



a) Sin disipador de calor



b) Con disipador de calor

Figura 3.1 Distorsión de las placas de titanio bajo dos condiciones de soldadura [60].

Giridharan (2008), en su investigación unió láminas de acero inoxidable austenítico 304L a tope, de 3 mm de espesor con GTAW pulsado (en este proceso se va variando la intensidad de la corriente entre un valor base y un valor pico), empleo el diseño de experimentos de Taguchi para encontrar los parámetros óptimos que le permitieran obtener una buena geometría, penetración y ancho en el cordón de soldadura, la relación entre la corriente de base y la corriente de pulso fue mantenida en 0.2 A durante el experimento. Realizó pruebas para tener los límites de cada parámetro del proceso y que le dieran como resultado una soldadura de penetración completa y libre de defectos visibles; dichos experimentos los realizó de forma aleatoria para evitar errores sistemáticos, dentro de los resultados menciona que al utilizar un voltaje de 14 V, una corriente pulsada de 211.4 A, una duración de la corriente de pulso de 537 ms y una velocidad de desplazamiento de 16 cm/min; se obtiene como resultado un cordón de soldadura con una penetración de 3.2 mm, un ancho de 9 mm y un área de 17.89 mm² [61].

Huang (2013), en su estudio soldó a tope una placa de 5 mm de espesor de acero inoxidable austenítico 304 con el proceso de soldadura GTAW con fundente, el autor hace mención que la soldadura GTAW con fundente se utiliza para soldar materiales con espesores de 8 – 10 mm de una sola pasada; los parámetros de soldadura que empleo fue una intensidad de corriente de 125 A, velocidad de desplazamiento de 75 mm/min y un flujo de gas de protección de argón de 10 L/min, el fundente que utilizó fue una mezcla de MnO₂ – ZnO en distintas proporciones; los resultados que obtuvo variaron de acuerdo a las cantidades de la mezcla que utilizó. Cabe mencionar que antes de realizar la soldadura aplico el fundente al material base; dentro de los resultados que obtuvo fue que con una mezcla de 40% MnO₂ – 60% ZnO se generaba un cordón de soldadura con defectos de socavado y con una mezcla de 80% MnO₂ – 20% ZnO obtuvo un cordón de soldadura libre de defectos y de buena penetración, también observo que la distorsión angular se redujo en

ambas placas ya que el fundente reduce el impacto de la entrada de calor tanto en el charco de soldadura como en la ZAC y en consecuencia se reduce el sobrecalentamiento del acero; lo que reduce la aparición de esfuerzos residuales debidos a la contracción [62].

Así mismo Tseng (2013), en su investigación menciona que utilizar fundentes tiene un efecto significativo en la penetración de aceros inoxidable utilizando el proceso de soldadura TIG, así como una disminución en la distorsión angular. Además, comenta que la distorsión angular al soldar aceros inoxidable aumenta con la corriente de soldadura al utilizar el proceso TIG sin fundente; ya que al aumentar la corriente para tener una mayor penetración provoca que la forma de la soldadura se vuelva excesivamente ancha con una menor profundidad, lo que da como resultado una mayor distorsión angular. En su estudio utilizó dos placas de 6 mm de espesor de acero inoxidable austenítico 316L, los parámetros de soldadura que empleo fue una velocidad de desplazamiento de 175 mm/min, flujo del gas de protección 12 L/min y una intensidad de arco de 200 A, el fundente que utilizó fue una mezcla de dióxido de silicio (SiO_2), dióxido de titanio (TiO_2) y trióxido de molibdeno (MoO_3); una placa fue soldada con fundente y la otra sin fundente; teniendo como resultado que la placa con fundente tiene mayor penetración y menor distorsión angular esto lo atribuye a que el arco de soldadura calentó el metal base de manera uniforme en todo su espesor [63]. En la figura 3.2 se puede observar la comparación de las placas.

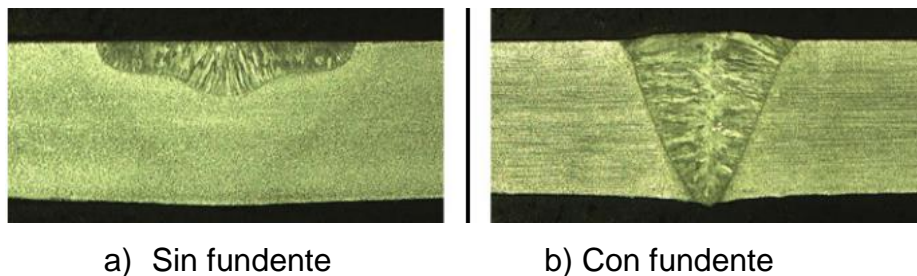
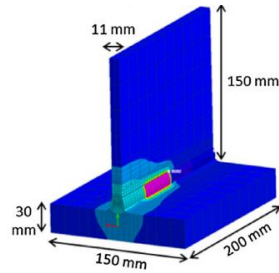


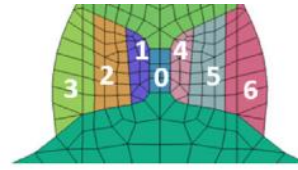
Figura 3.2 Comparación de placas de acero 316L bajo dos condiciones de soldadura [63].

Igualmente, Huang (2009), en su investigación soldó dos placas de acero inoxidable austenítico 304 de un espesor de 5 mm; con el proceso GTAW con los siguientes parámetros, velocidad de desplazamiento de 75 mm/min, una intensidad de corriente de 125 A y el flujo de gas de protección de 20 L/min, en su experimento el gas de protección que utilizó fue una mezcla de 90% argón y 10% nitrógeno; así mismo a una placa le agrego un fundente cuya mezcla fue 80% MnO_2 – 20% ZnO ; esto con la intención de comparar la distorsión que se generó en ambas placas. Dentro de los resultados menciona que la placa sin fundente presento 10% más distorsión angular que la placa con fundente ya que la adición de nitrógeno aumento la entrada de calor, lo que resulto en un aumento en la profundidad de la soldadura por lo que la distorsión angular aumento, además menciona que la placa con fundente obtuvo una penetración total que en consecuencia la distorsión angular fue casi nula [64].

Doyen (2017), en su investigación realizó dos uniones en T en la Figura 3.3 a), se pueden observar las dimensiones de las piezas, donde comparo las distorsiones creadas por dos secuencias de soldadura con diferentes orientaciones de pasadas, para ambas uniones utilizo el mismo proceso y parámetros; la soldadura la realizo con el proceso GTAW con los siguientes parámetros; una intensidad de corriente de 250 A, un voltaje de 11 V, una velocidad de desplazamiento de 1300 mm/min; así como realizar seis pases de soldadura a cada unión; en la primera secuencia en un lado del material base se le aplico 3 pases seguidos de soldadura posteriormente al otro lado se le aplico el mismo número de pases como se muestra en la Figura 3.3 b); para la segunda secuencia el orden de las pasadas se alternó de un lado a otro; en sus resultados menciona que la distorsión generada por la primer secuencia es más alta que en la segunda; ya que la placa de la primer secuencia tuvo una elevación de 8 mm mientras que la placa de la segunda secuencia solo tuvo una elevación de 2 mm [65].



a) Dimensiones de la pieza



b) Pases soldadura primer secuencia soldadura

Figura 3.3 Comparación de pases de soldadura [65].

Deng (2008), en su investigación unió tres placas de 1 mm de espesor de acero de bajo carbono a tope, con el proceso de soldadura GTAW con los siguientes parámetros; una intensidad de corriente de 65 A, un voltaje de 17 V, una velocidad de desplazamiento de 788 mm/min y un flujo de gas de protección de 15 L/min. Antes de realizar la soldadura dejó un espacio entre las placas de 0.4 mm y posteriormente aplicó una soldadura parcial como se muestra en la figura 3.4; dentro de los resultados que obtuvo menciona que las placas presentaron una distorsión angular, así como un levantamiento de 2.06 mm en promedio; además señala que la distorsión solo se presentó en donde se ubica el cordón de soldadura [66].



Figura 3.4 Soldadura parcial placa de acero dulce [66].

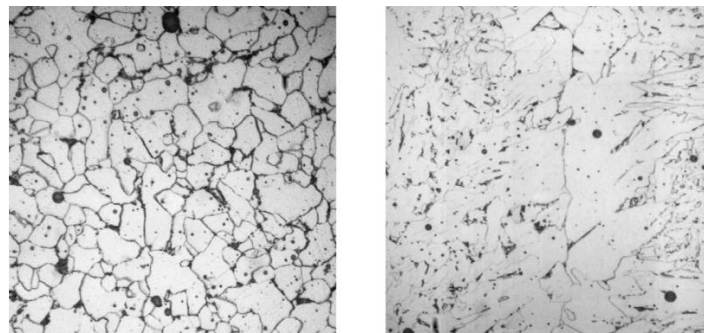
Bhatti (2015), en su estudio soldó en T, tres placas de 6 mm de espesor de diferentes aceros, con la intención de comparar la distorsión angular que se genera en cada unión; el proceso de soldadura que utilizó fue el GMAW con los siguientes parámetros, un voltaje de 30 V, una intensidad de corriente de 290 A y una velocidad de desplazamiento de 8.3 mm/s. Los diferentes grados de acero fueron el S355, S700 y el S960; la secuencia de soldadura que aplicó consistía en

soldar primero una parte de un lado de la pieza, una vez finalizada se deja que la pieza alcance la temperatura ambiente para llevar a cabo la soldadura en el otro lado. Dentro de los resultados que obtuvo fue que la distorsión angular en los grados de acero S355, S700 y S960 fueron 7 mm, 8.3 mm y 10.25 mm respectivamente; la diferencia entre los valores los relaciona con el límite elástico y el coeficiente de expansión térmica de los aceros [67].

Ferro (2017), desarrolló un modelo numérico de soldadura de multi pasadas; donde comparo la soldadura de una sola pasada y multi pasadas observando la distribución de los esfuerzos residuales, así como la microestructura que se formó. La simulación la inicio soldando a tope dos placas de acero de 6 mm de espesor; después realizó la soldadura de la primera pasada, posterior simuló la soldadura de dos pasadas y finalizó con la simulación de la soldadura de tres pasadas; la temperatura entre pasadas la mantuvo a 100 °C, la microestructura que comprende el acero es una mezcla de ferrita-perlita y bainita; obteniendo los siguientes resultados, la microestructura que prevalece en la ZAC es la bainita. Así mismo menciona que el ancho de la ZAC disminuye a medida que aumenta el número de pasadas de soldadura, ya que menciona que hubo una reducción de la entrada de calor que se produce a medida que el número de pasadas aumenta. De igual manera menciona que los esfuerzos residuales aumentan a medida que aumenta el número de pasadas; esto lo explica en términos del ancho de la zona de fusión al finalizar la soldadura, ya que, para un espesor de placa fijo, la disminución del tamaño de la zona de fusión aumenta el grado de restricción al que se somete la junta durante la solidificación del charco de soldadura y como consecuencia, aumenta la intensidad del campo de esfuerzos residuales [68].

Estefen (2012), soldó a tope dos placas de acero de 19 mm de espesor, la primera placa fue unida empleando un electrodo mientras que en la segunda utilizó doble electrodo, así mismo aplico sujeción a ambas placas durante dos semanas, al cumplirse las dos semanas de ver realizado la soldadura retiro la sujeción de las placas para observar la distribución de los esfuerzos residuales en cada unión. El

proceso de soldadura que utilizó fue GTAW con los siguientes parámetros; una intensidad de corriente de 211 A, un voltaje de 24.1 V y una velocidad de desplazamiento de 8 m/min; el primer par de placas se unió mediante soldadura de un solo electrodo en 11 pasadas, el segundo par de placas se soldó mediante doble electrodo en tres pasadas. Dentro de los resultados menciona que en la soldadura de doble electrodo los esfuerzos residuales se concentraron en la ZAC y en el metal base, mientras que para el caso de un electrodo los esfuerzos residuales se concentraron a lo largo del cordón de soldadura. La soldadura de un electrodo formó una microestructura refinada que contiene perlita y cementita dispersas en una matriz de ferrita; atribuyendo la microestructura a la recristalización del cordón de soldadura debido a las múltiples pasadas; además en la soldadura de doble electrodo se formó una microestructura de ferrita y cementita por causa del número de pasadas [69]. En la Figura 3.5, se puede observar la microestructura que se formó en los dos cordones de soldadura.



a) Soldadura de un electrodo b) Soldadura con doble electrodo

Figura 3.5 Microestructura cordón de soldadura [69].

CAPÍTULO 3

ÁNÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LA BIBLIOGRAFÍA

Al unir componentes de espesores grandes se requiere aplicar múltiples pasadas de soldadura para poder realizar la unión de las piezas; y al llevarlas a cabo, las piezas son sometidas a ciclos de calentamiento y enfriamiento que van generando esfuerzos, uno de los esfuerzos que más se ve afectado es el esfuerzo de compresión ya que va disminuyendo debido a la entrada de calor que se le está aplicando constantemente por las múltiples pasadas; así como la distorsión angular de la pieza va aumentando. Así mismo, a medida que aumenta el número de pasadas de soldadura aumentan los esfuerzos residuales que aparecen en la pieza.

La forma y secuencia de aplicación de la soldadura influyen en la distorsión que se puede llegar a presentar al finalizar el proceso de soldadura, así como la forma en que se van a distribuir los esfuerzos residuales. Una forma de minimizar la distorsión que se presenta en un componente es la de aplicar la soldadura del punto 1 hasta el punto 2, mientras la segunda pasada de soldadura sería de manera viceversa esto permite una mejor distribución de los esfuerzos residuales.

La distorsión en los componentes está relacionada con la entrada de calor que se llega a generar durante el proceso de soldadura, a su vez la entrada de calor está relacionada con los parámetros de soldadura como la intensidad de corriente, voltaje, velocidad de desplazamiento y la eficiencia de la máquina de soldar; algunos parámetros como una intensidad de corriente de 150 A, 12 V y una velocidad de

desplazamiento de 15 cm/min, reduce la distorsión angular en placas unidas a tope de aceros inoxidable; de igual manera con una corriente de 105 A, 30 V y una velocidad de desplazamiento de 14.8 cm/min la distorsión en aceros inoxidable austeníticos es mínima; por último una corriente de 160 A, corriente pulsada de 80 A, un voltaje de 15 V y una velocidad de desplazamiento de 85.58 cm/min la distorsión angular de aceros inoxidable se reduce en un 17%.

Al momento de soldar aceros inoxidable y aceros al carbono utilizando la misma intensidad de corriente, voltaje y velocidad de desplazamiento la distorsión que se presenta en los aceros inoxidable es mayor que en los aceros al carbono; debido a la diferencia de sus propiedades tales como conductividad y expansión térmica. Por lo que se puede mencionar que algunos materiales son más susceptibles a presentar distorsión que otros debido a sus propiedades.

En la literatura se menciona, que una forma de detener la distorsión de los componentes unidos por soldadura es tener las placas en sujeción al momento de soldar ya que se limita la expansión y contracción de la pieza, pero al retirar la sujeción del componente los esfuerzos residuales se liberan generando distorsión, así como distribuyéndose en el cordón de soldadura y en la superficie del metal.

Otra forma en que se puede llegar a presentar la distorsión es por el cambio de fase en el material durante el proceso de soldadura; ya que hay microestructuras que tienen diferentes volúmenes; el área que se encuentra alrededor del cordón de soldadura, conocida como ZAC, también sufre una distorsión en su microestructura. Si está fuera muy grande se reflejaría en cambios de fase, que en algunos casos el resultado final post soldadura sería tan diferente al estado original que ya no podría entrar en la misma clasificación del acero que se tenía antes de la soldadura.

Los investigadores comentan que utilizar material de aporte, fundentes, aplicación de la soldadura en una sola pasada, disipadores de calor, así como de

preferencia utilizar la aplicación automática de la soldadura o en caso de ser manual tener un soldador con amplia experiencia para que la realice; son las mejores prácticas para generar una distorsión mínima en los componentes unidos.

La distorsión y la distribución de los esfuerzos residuales se pueden simular y así predecir cómo se presentarán y afectarán en la pieza, utilizando métodos de elementos finitos además de softwares especializados como SYSWELD, ANSYS, entre otros que permiten realizar simulaciones de los resultados que se pueden presentar, modificando las variables de entrada y así tener los parámetros adecuados para realizar la soldadura a nivel experimental y corroborar que los resultados obtenidos durante la simulación tienen una gran aproximación a los obtenidos físicamente.

CONCLUSIONES

- La soldabilidad de los aceros inoxidable martensíticos es muy baja debido a su alto contenido de carbono; pero varios procesos de soldadura logran excelentes soldaduras con estos aceros como el GTAW que genera soldaduras de buena calidad y libre de defectos.
- Los parámetros de soldadura como la intensidad de corriente, voltaje, velocidad de desplazamiento, eficiencia de la máquina de soldar, el flujo del gas de protección son variables que influyen en la entrada de calor al momento de soldar; ya que entre más entrada de calor más será la distorsión que se presentará en el componente. En los aceros inoxidable martensíticos de un espesor ≤ 6 mm se utiliza un rango de una intensidad de corriente de 65 A hasta 120 A, 11 V hasta 17 V y una velocidad de desplazamiento de 3.3 mm/s hasta 6.66 mm/s son los valores que generan una mínima distorsión; mientras que en placas cuyo espesor es mayor a los 6 mm los rangos son de 211 A hasta 220 A, 24 V hasta 50 V y una velocidad de desplazamiento de 8 mm/s hasta 16 mm/s; así mismo en los aceros inoxidable austeníticos con un espesor de ≤ 6 mm utilizando un rango de intensidad de corriente de 125 A hasta 200 A, un voltaje de 12 V hasta 30 V y una velocidad de desplazamiento de 14.8 cm/s hasta 85.58 cm/s son los valores que dejan una mínima distorsión en la placa.
- La distorsión en aceros inoxidable martensíticos unidos con el proceso GTAW se genera por la entrada de calor que se utiliza para llevar a cabo la unión; a mayor número de pasadas mayor entrada de calor; al utilizar disipadores de calor, fundentes o un tratamiento térmico previo y después de la soldadura ayudan a controlar la distorsión de las piezas.
- Durante el proceso de soldadura con la expansión y contracción del componente se generan esfuerzos residuales los cuales se dividen en esfuerzos de tracción y compresión, estos últimos son los más benéficos

para la soldadura, pero a medida que aumenta la temperatura estos disminuyen.

- La distorsión por cambio de fase al momento de llevar a cabo la soldadura es mínima en comparación con la distorsión que se puede llegar a presentar con la aplicación de una entrada de calor demasiado grande.

Tablas

Tabla 2.1 Características de soldadura de acuerdo con el tipo de corriente .

25

Tabla 2.2 Composición química aceros inoxidable martensíticos

37

Figuras

Figura 2.1 Tipos de distorsiones.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 2.2 Proceso de soldadura GTAW	23
Figura 2.3 Equipo de soldadura GTAW	24
Figura 2.4 Soplete enfriado por agua para GTAW manual.....	25

No se encuentran elementos de tabla de ilustraciones.

BIBLIOGRAFÍA

1. Carolina. Payares-Asprino, Holman E. Galezo O, Carlos Graciano Carlos, Influencia de los parametros de soldadura en la predicción de la curva esfuerzo deformación de un acero duplex laminado. ICWJM II CONFERENCIA INTERNACIONAL DE SOLDADURA Y UNION DE MATERIALES Ciudad del Cusco, Perú del 16 al 19 de Abril 2007.
2. Hibbeler R.C.; Mecanica de Materiales, novena edición, Pearson, 2017.
3. Monsalve Monica, Esperanza López María, Vargas Galvis Fabio, Techniques for the measurement of residuals stresses in PVD thin films. Scientia et Technica Año XIII, No. 36, Septiembre 2007.
4. Dhas, J.E.R.; Kumanan; Modeling of residual stress in butt welding, Materials and Manufacturing Processes. 2011.
5. Hashemzadeh M., Chen B.Q.; Evaluation of multi-pass welding-induced residual stress using numerical and experimental approaches, Ships and Offshore Structures.2018.
6. Zhili F.; Processes and mechanisms of welding residual stresses and distortion, CRP Press.2005.
7. García Jacomino J.L., Burgos Sola J., Cruz Crespo A., Álvarez Luna M., García Arteaga J; Reducción de esfuerzos residuales en uniones soldadas usando tratamiento con explosivo. Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, 12-1, 2008.
8. Raju N., Ravichandran G., Sudharsanam V.; Distortion and its control in welding of stainless steel structures-case studies, Advanced Materials Research Vol.794.2013.
9. Monsalve, M.; Techniques for the measurement of residuals stresses in PVD thin films, Scientia et Technica, No. 36, 2007.
10. Bray, D.E.; Tang, W.; Subsurface stress evaluation in steel plates and bars using Lcr ultrasonic wave, Nuclear Engineering and Design. 2001.
11. Hashemzadeh M., Chen B.Q.; Evaluation of multi-pass welding-induced residual stress using numerical and experimental approaches, Ships and Offshore Structures.2018.
12. Gannon L., Liu Y., Pegg N., Smith MJ; Effect of welding-induced residual stress and distortion on ship hull girder ultimate strength, Mar Struct.2012.

13. Moreno Preto. Welding Defects; Arance, 2013.
14. Yuanbin Fang, Yong Wang, Can Wang, Guizhi Zhang, Estudio sobre la influencia de la temperatura ambiente en la deformación de la soldadura y el estres de la estructura de la caja. ACTAS DE LA SEPTIMA CONFERENCIA INTERNACIONAL 2017 SOBRE DISEÑO AVANZADO E INGENIERIA DE MANUFACTURA (ICADME 2017), julio 2017.
15. Slováček M., Davis V., Junek L; Numerical simulation of the welding process-distortion and residual stress prediction, heat source model determination, Welding in the world Vol.49.2015.
16. Balasingh C., Singh A.; Tensiones Residuales y sus Medidas por Métodos de Difracción de Rayos X, Reunio. Mater. Proceso 12. 2000.
17. Mcdill J.M.J; Finite element analysis of weld distortion in carbon and stainless steels, Journal of Strain Analysis Vol. 25.1990.
18. Park Jeong-ung, Gyubaek An.; Prediction of the welding distortion of large steel structure with mechanical restraint using equivalent load methods, International journal of naval architecture and ocean engineering Vol.9.2017.
19. Ganesh K.C., Vasudevand M., Balasubramaniana K.R., Chandrasekharb N., Mahadevand S., Vasantharajab P.; Modeling, prediction and validation of thermal cycles, residual stresses and distortion in type 316LN stainless steel weld joint made by TIG welding process, Procedia Engineering.2014.
20. Kalpakjian Serope, Schmid R. Steven; Manufacturing Engineering and Technology. seventh edition, Prentice Hall. 2014.
21. Kou Sindo; Welding Metallurgy, 2nd edition, Wiley-Interscience.2004.
22. P. Vasantharaja, V. Maduarimuthu, M. Vasudevan & P. Palanichamy; Assessment of Residual Stresses and Distortion in Stainless Steel Weld Joints, Materials and Manufacturing Processes.2012.
23. Fu G., Gurova T., Lourenco Ml.; Numerical and experimental studies of residual stresses in multipass welding of high strength shipbuilding steel, Ship Res.2015.
24. Masubichi Koichi, Analysis of Welded Structures: Residual Stresses, Distortion and their Consequences, Pergamon, 2013.
25. Bhadeshia Harry, Honeycombe Robert; Steels: Microstructure and Properties, 4th edition, Butterworth-Heinemann, 2017.

26. Krauss George; Deformation and fracture in martensitic carbon steels tempered at low, Metall mater trans B.2001.
27. López Martínez Edgar, Campillo Illanes Bernardo Fabian, García González Pedro, Efecto del Calor Aportado por Soldadura en un Acero Microaleado. MEMORIAS DEL XIX CONGRESO INTERNACIONAL ANUAL DE LA SOMIM, Pachuca, Hidalgo, México 25 al 27 de Septiembre 2013.
28. Zappa Sebastián; Efecto de las Variables del Procedimiento de Soldadura sobre las Propiedades Mecánicas y la Resistencia a la Corrosión en Depósitos de Soldadura de Aceros Inoxidables Supermartensíticos, Tesis Doctoral, Facultad de Ingeniería Universidad de Buenos Aires. 2011.
29. Cho SH, Kim JW; Analysis of residual stresses in carbon steel weldment incorporating phase transformations, Sci Technol Weld Join.2002.
30. Deng Dean; FEM prediction of welding residual stress and distortion in carbon steel considering phase transformation effects, Materials and Design. 2009.
31. Welding Process, Welding Handbook 8th Ed., Vol. 2, American Welding Society AWS, USA 1991.
32. Storer Jay. The Haynes Manual on Welding: Step-by-Step Illustrated Procedures and Practical Projects, Paperback, 2018.
33. Kutelu, Bolarinwa & Seidu, Saliu & Eghabor, Godwin & Ibitoye. Review of GTAW Welding Parameters. Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering, 06, 2018.
34. Glickstein SS, Friedman E.; Characterization and modeling of the heat source, ASM handbook Vol.6.1994.
35. Tseng, K.-H.; Hsu, C.Y.; Performance of activated TIG process in austenitic stainless steel welds, Journal of Materials Processing Technology. 2011.
36. Gery D., Long H., Maropoulos P.; Effects of Welding Speed, Energy Input and Heat Source Distribution on Temperature Variations in Butt Joint Welding, Mater Process Technol. 2005.
37. Ravisankar A., Satish Kumar Velaga, Gaurav rajput, Venugopal S.; Influence of Welding Speed and Power on Residual Stress During Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) of Thin Sections with Constant Heat Input: A Study Using Numerical Simulation and Experimental Validation, Journal of Manufacturing Processes. 2014.

38. Cho, J., Lee. J & Bae; Heat input analysis of variable polarity arc welding of aluminum, *Int Adv Manuf Technol* 81. 2015.
39. Beyounis K.Y., Olabi A.G.; Effect of laser welding parameters on the heat input and weld-bend profile, *Journal of Materials Processing Technology*.2005.
40. Hosseini S.A., Abdollah-Zadeh A., Mehri A.; Elimination of hot cracking in the electron beam welding of AA2024-T351 by controlling the welding speed and heat input, *Journal of Manufacturing Processes*.2019.
41. Weman, Klas; *Welding Processes handbook*, New York. 2003.
42. Kermanpur M., Shamanian V., Yeganeh E.; Three-dimensional Thermal Simulation and Experimental Investigation of GTAW Circumferentially Butt-Welded Incoloy 800 pipes, *J Mater Process Technol*. 2008.
43. Vemanaboina H., Edison G., Akella S.; Distortion control in multi pass dissimilar GTAW process using Taguchi ANOVA analysis, *International Journal of Engineering & Technology*.2018.
44. Askeland Donald, Wright Wendelin; *Ciencia e Ingenieria de los Materiales*. 7a edición, Cengage Learning. 2016.
45. Bhadeshia Harry, Honeycombe Robert; *Steels: Microstructure and Properties*. 4th edition, Butterworth-Heinemann. 2017.
46. Oberg Erik; *Heat-Treatment of Steel*. Owen Press. 2016.
47. Liu C., Xu X.; A FEM modeling of quenching and tempering and its application in industrial engineering, *Finite Elements in Analisis and Desing*, Vol. 39. 2003.
48. Arivazhagan B., Srinivasan G., Albert S.K.; A study on influence of heat input variation on microstructure of reduced activation ferritic martensitic steel weld metal produced by GTAW process, *Fusion Engineering and Desing*.2011.
49. López Martínez Eduardo, Serna Sergio, Flores Osvaldo & Campillo Bernardo; Microestructura y nanoindentación de la zona de la soldadura de un acero microaleado experimental, *I+D Tecnológico*, Vol. 12 Núm.1. 2016.
50. Codd S.; *Automotive mass reduction with martensitic stainless steel*, Technical Document SAE. 2011.
51. Casals Merino; *Aceros Inoxidables*. Dextra Editorial. 2017.
52. Bösing I., Marquardt G.; Effect of heat treatment of martensitic stainless steel on passive layer growth kinetics studied by electrochemical impedance

spectroscopy in conjunction with the point defect model, Corrosion and materials degradation.2020.

53. Ibarra Echeverría M.; Manual aceros inoxidable.2010.
54. Ahmed, Adebisi J.A., Abdulkareem S., Sherry A.H.; Investigation of Surface Residual Stress Profile on Martensitic Stainless Steel Weldment with X-Ray Diffraction, Journal of King Saud University Engineering Sciences, Volume 30.2018.
55. Neubert S., Pittner A., Rethmeier M.; Influence of non-uniform martensitic transformation on residual stresses and distortion of GMA-welding, Journal of Constructional Steel Research.2017.
56. Barth P.; Biocompatible material made of stainless steel having a martensitic surface layer.2013.
57. Barajas N., García A.; Tendencia de los aceros y su aplicación en la industria automotriz, CienciAbierta, Vol.48. 2016.
58. Simoneto E., Bruschi S.; Prediction of distortion in hot forged martensitic stainless steel turbine blade by numerical simulation, Procedia Manufacturing, Vol.1. 2015.
59. Ikushima K, Shibahara M.; Prediction of residual stresses in multi-pass welded joint using Idealized Explicit FEM accelerated by a GPU, Computational Materials Science, Vol. 93. 2014.
60. Li J., Guan Q.; Studies on characteristics of temperature field during GTAW with a trailing heat sink for titanium sheet, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 147. 2003.
61. Giridharan P., Murugan N.; Optimization of pulsed GTA welding process parameters for the welding of AISI 304L stainless steel sheets, Int J Adv Manuf Technol, Vol. 40. 2008.
62. Huang H., Shyu S.; Evaluation of TIG flux welding on the characteristics of stainless steel sheets, Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 10. 2013.
63. Tseng K.; Development and application of oxide-based flux powder for tungsten inert gas welding of austenitic stainless steel, Powder Technology, Vol. 223. 2013.
64. Huang H; Effects of shielding gas composition and activating flux on GTAW weldments, Materials and Desing, Vol. 30. 2009.

65. Doyen, O.; Assessment of HCLL-TBM optimum welding sequence scenario to minimize welding distortions, *Fusion Engineering and Desing*, Vol. 121. 2017.
66. Deng D.; Prediction of welding distortion and residual stress in a thin plate butt-welded joint, *Computational Materials Science*, Vol. 43. 2008.
67. Bhatti A., Zuheir B; Influence of thermo-machanical material properties of different steel grades on welding residual stresses and angular distortion, *Materials and Desing*, Vol. 65. 2015.
68. Ferro P., Berto F.; Asymptotic residual stress distribution induced by multipass welding processes, *International Journal of Fatigue*, Vol. 101. 2017.
69. Estefen S., Gurova T.; Welding stress relaxation effect in butt-jointed steel plates, *Marine Estructures*, Vol. 29. 2012.
70. Tseng K., Chou P.; Effect of pulsed gas tungsten arc welding on angular distortion in austenitic stainless steel weldments, *Science and Technology of Welding and Joining*.2010.