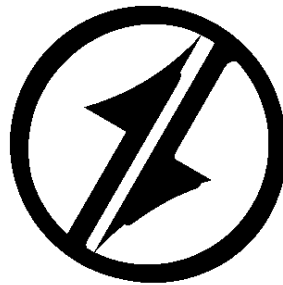


CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN DE MATERIALES

DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



**ESTUDIO DE LAS DISTORSIONES GENERADAS EN UNIONES SOLDADAS
PLACA-TUBO DE ACEROS AL CARBONO**

POR

ING. ANTONIO LOSOYA RODRIGUEZ

MONOGRAFÍA

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

CD ACUÑA, COAHUILA, MÉXICO A 19 DE OCTUBRE DEL 2009

CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



**ESTUDIO DE LAS DISTORSIONES GENERADAS EN UNIONES SOLDADAS
PLACA-TUBO DE ACEROS AL CARBONO**

POR

ING. ANTONIO LOSOYA RODRIGUEZ

MONOGRAFÍA

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

CD ACUÑA, COAHUILA, MÉXICO A 19 DE OCTUBRE DEL 2009

Corporación Mexicana de Investigación en Materiales, S.A. de C.V.
Gerencia de Desarrollo del Factor Humano
División de Estudios de Postgrado

Los miembros del Comité Tutorial recomendamos que la monografía **“ESTUDIO DE LAS DISTORSIONES GENERADAS EN UNIONES SOLDADAS PLACA-TUBO DE ACEROS AL CARBONO”**, realizada por el alumno **ANTONIO LOSOYA RODRIGUEZ** con número de matrícula **08ES073** sea aceptada para su defensa como Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial.

El Comité Tutorial

Dr. Mauricio Alberto Garza Castañón
Tutor Académico

Ing. Gustavo Ariel Guzmán
Ayala
Tutor en Planta

Dr. Alejandro Garza
Gómez
Asesor

Vo.Bo.
M.C. Claudia Aracely González Rodríguez
Coordinador de Posgrado

INDICE

Agradecimientos

Prologo

Índice

Síntesis	1
1. Introducción.	3
1.1. Planteamiento del problema	3
1.2. Objetivo general	6
1.3. Objetivos específicos y alcance	6
1.4. Justificación	7
2. La distorsión.	8
2.1. El fenómeno de la distorsión	8
2.2. La distorsión y las propiedades de los aceros	8
2.3. Tipos de distorsión	11
2.4. Distorsión por momento de soldadura	12
2.5. Análisis experimental de la distorsión	14
2.6. Control de la distorsión	17
2.7. Control de la distorsión por momento de calor inducido	23
2.8. Otros medios para reducir los efectos de la distorsión	25
2.9. La AWS y la distorsión	27
3. Esfuerzos Residuales.	30
3.1. El fenómeno de los esfuerzos residuales	30
3.2. Mecanismos para la medición de esfuerzos residuales	37
3.3. Medición de esfuerzos residuales en campo	47

4. Distorsión en láminas delgadas.	54
4.1. Soldando laminas de bajos espesores	54
4.2. Recomendaciones generales al soldar laminas delgadas	55
4.3. Modos de transferencia al soldar laminas	56
4.3.1. Nuevos modos de transferencia del metal de aporte	57
4.3.2. Transferencia por corto circuito controlado	57
4.3.3. Gases de protección	58
4.4. Incremento en la productividad durante la aplicación de soldadura	59
4.5. Balance entre calor y velocidad	59
4.6. Diseño de juntas	60
4.7. Distorsión por pandeo en laminas soldadas	61
4.8. Patrones típicos de distorsión por pandeo en elementos estructurales de pared delgada.	62
4.9. Métodos para remover, mitigar y prevenir la distorsión por pandeo	65
4.9.1. Clasificación de métodos y medidas tecnológicas	65
5. Simulación por computadora.	67
5.1. Simulación por computadora de la aplicación de soldadura	67
5.2. Simulación por computadora de soldadura de láminas delgadas	68
6. Conclusiones.	74
7. Bibliografía.	78
8. Lista de figuras.	80
9. Lista de imágenes.	82
10. Lista de tablas.	83
11. Lista de ecuaciones.	84

SINTESIS

La investigación surge de la necesidad de reducir los defectos de calidad y tiempos de re – proceso al prevenir, o en su defecto, disminuir la distorsión generada en ensambles tubulares donde se unen por soldadura placas de espesores disímiles.

La unión de metales por soldadura genera distorsión debido a las expansiones y contracciones no uniformes que ocurren en los metales durante los ciclos de calentamiento y enfriamiento que ocurren a altas velocidades durante los procesos de soldadura.

Los esfuerzos residuales que se generan en las piezas a raíz de estos ciclos de calentamiento y enfriamiento generan distorsiones en todas sus modalidades como lo son las distorsiones longitudinales, transversales, rotacionales, angular y por pandeo, por mencionar algunas. También existe la distorsión generada por el momento de soldadura. Haciendo uso de este mismo principio de distorsión por momento de soldadura se genera la contramedida utilizando un método de corrección conocido como momento por inducción de calor.

Los esfuerzos residuales que generan distorsiones pueden ser medidos utilizando una diversidad de métodos entre los cuales resalta el método del agujero ciego. [11] Existen en la actualidad métodos y procedimientos diseñados y probados para prevenir y disminuir la distorsión. Estos métodos son clasificables, las clasificaciones varían dependiendo si el método de control es por sujeción y/o calzas, barras de enfriamiento, des - alineamientos, entre otros.

Los problemas de distorsión se incrementan entre otras razones conforme se disminuye el espesor de los materiales, lo que vuelve importante seguir algunas recomendaciones especiales a la hora de unir por soldadura láminas de espesores delgados ya sea entre sí o entre estas y placas de mayor espesor.

En ocasiones resulta también conveniente explorar las ventajas que proveen el uso de paquetes computacionales de simulación. El análisis por elementos finitos además de sustituir a los métodos actuales de control de la distorsión provee información de suma importancia para lograr ensambles de alta calidad, con el menor tiempo de re – trabajo.

1.

INTRODUCCION

1.1 Planteamiento del problema

La necesidad de iniciar un proceso de investigación acerca de la distorsión que ocurre al momento de unir por soldadura placas de acero de espesores contrastantes, surge para respuesta a una problemática real que se presenta en la industria metalmecánica donde la actividad principal generadora de valor es la aplicación de soldadura.

El fenómeno de la distorsión se hace presente en casi cualquier proceso de soldadura de ensambles de acero. La problemática específica de que detonó esta recopilación de información referente a la distorsión es la siguiente:

Se tiene la necesidad de unir por el proceso de soldadura GMAW placas de 1.5" a 2" de espesor a otras placas de 1/4" a 5/16" de espesor. Los ensambles en cuestión son tubos que forman parte de un equipo utilizado para la extracción de carbón mineral en minas a cielo abierto.

La Figura 1 muestra una imagen del deber ser de estos ensambles que forman tubos.

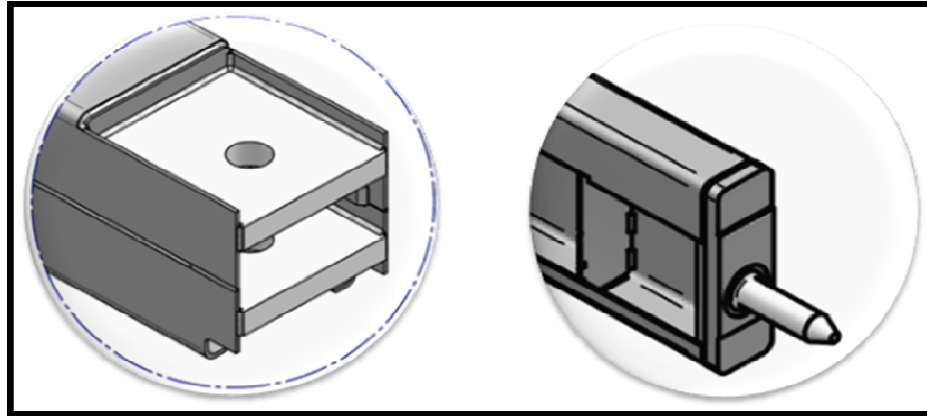


Figura 1. Ensamble formado de placas de espesores contrastantes.

Después de aplicar la soldadura en estos ensambles, los resultados no eran los esperados, ocurría que las placas de menor espesor se contraían o generaban un des – alineamiento entre las partes, tal como se muestra en las Figuras 2 y 3.

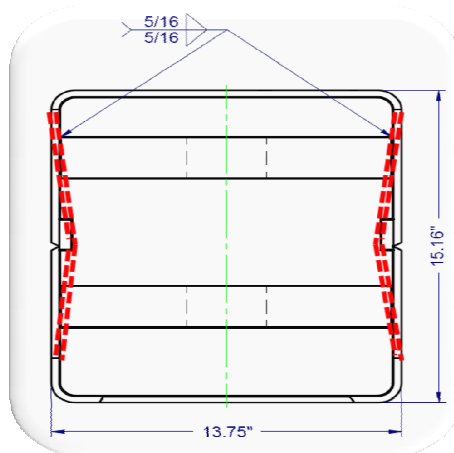


Figura 2. Las líneas rojas representan el efecto de la distorsión por soldadura en las placas de menor espesor.

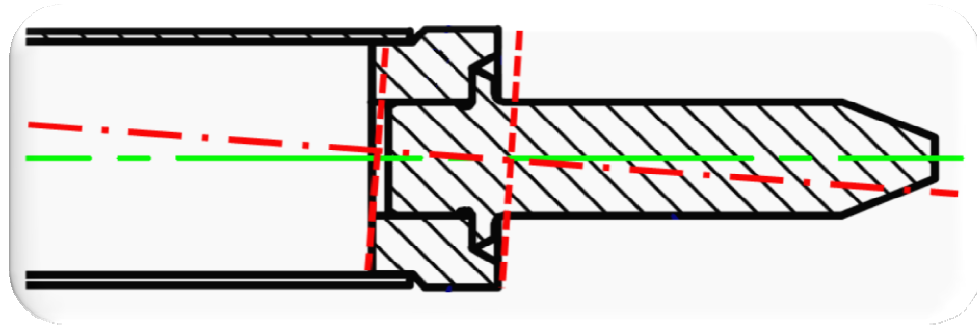


Figura 3. Las líneas rojas representan el efecto de desalineación producto de la distorsión generada por la soldadura.

El hecho de que se generaran estos defectos por distorsión representa un retraso en la salida del producto debido a la necesidad de re – trabajar las unidades no conformes con el fin de garantizar el correcto funcionamiento del producto y la satisfacción de los clientes.

1.2 Objetivo general

El objetivo de esta monografía es presentar un estudio referente a la distorsión que se genera en uniones soldadas entre placas de acero al carbono. Enfocando el análisis hacia uniones entre placas de espesores contrastantes. Esto con la finalidad de definir un método y un procedimiento que permita controlar los cambios dimensionales que sufrirá un ensamble al ser soldado.

1.3 Objetivos específicos y Alcance

Si bien el objetivo general que se busca es la definición de un método y un procedimiento para controlar los cambios dimensionales productos de la distorsión, el alcance real de esta revisión bibliográfica es analizar la información hasta ahora disponible acerca del tema de la distorsión, con la finalidad de sentar las bases, principios y fundamentos necesarios para que en trabajos posteriores sea posible dar una propuesta exitosa que contribuya a dar solución a la problemática mencionada anteriormente.

1.4 justificación

Al formar parte de una industria altamente competitiva donde la principal actividad generadora de valor es la aplicación de la soldadura surge la necesidad de diseñar procesos de manufactura que permitan cumplir con los requerimientos de seguridad y calidad especificados por los clientes a través del diseño.

En el caso de industrias que manufacturan equipos y maquinaria de grandes dimensiones como en el caso de fabricantes de maquinaria y equipo para la industria minera, es necesario mantener tolerancias muy estrechas durante la fabricación, tan estrechas que la distorsión de los metales generada por la aplicación de soldadura resulta en un problema relevante ya que se pierden las dimensiones requeridas por diseño. Como consecuencia de esto se vuelve necesario el uso de recursos económicos y tiempo para llevar acabo reparaciones y re – trabajos en las unidades no conformes.

En la industria actual, en la cual la reducción de costos es primordial, evitar la pérdida innecesaria de tiempo y recursos económicos debido a re trabajos es la razón principal para conocer a profundidad los factores que influyen y propician la distorsión por aplicación de soldadura. Al realizar una revisión exhaustiva del estado del arte de la distorsión puede llegar a ser posible la definición de un método y un procedimiento que logre eliminar o minimizar el fenómeno de la distorsión reduciendo así los altos costos producto de re trabajos. La realización de este estudio contribuiría también a mejorar nuestra habilidad para diseñar y construir dispositivos que nos permitan manufacturar productos con mejor calidad de una manera más segura, sencilla y eficiente.

2.

La distorsión

2.1 El fenómeno de la distorsión.

En los procesos de soldadura, es necesario considerar la existencia de diversas variables y problemas, uno de los más importantes y comunes es la distorsión.

La distorsión es el resultado de expansiones y contracciones no uniformes del metal soldado y el metal base adyacente durante los ciclos de calentamiento y enfriamiento que ocurren en los procesos de soldadura. Durante la aplicación de soldadura, la temperatura de los metales fluctúa conforme se va depositando el material de aporte y se va realizando la unión, estas variaciones en la temperatura generan cambios en las propiedades físicas y mecánicas de los metales. [1]

2.2 La distorsión y las propiedades de los aceros

La Figura 4 muestra cómo se comportan algunas de las propiedades mecánicas de los aceros conforme aumenta la temperatura durante la aplicación de soldadura.

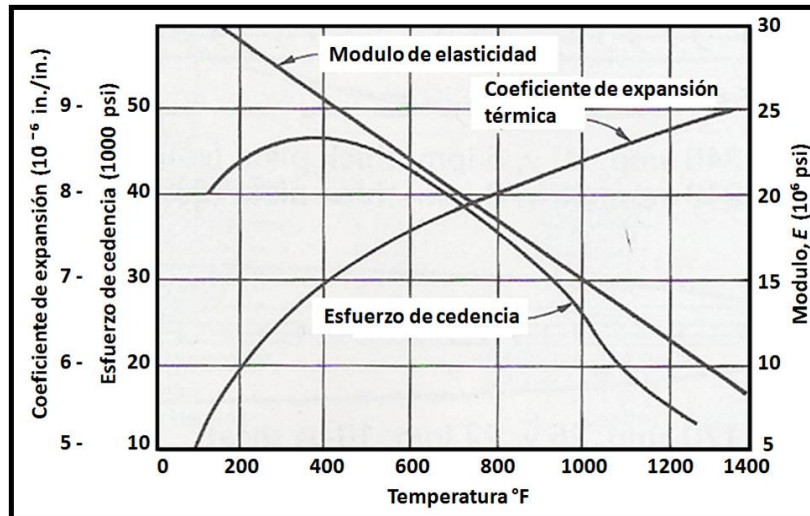


Figura 4. Comportamientos de las propiedades del acero en función de la temperatura. [1]

Como se aprecia en la Figura 4, conforme aumenta la temperatura en el acero, se incrementa también el coeficiente de expansión térmica. El módulo de elasticidad disminuye de manera casi lineal. El esfuerzo de cedencia presenta un comportamiento diferente ya que aproximadamente entre los 100 y 300°F el esfuerzo presenta una tendencia positiva que aumenta pero de manera lenta. Luego de los 300°F la tendencia cambia y el esfuerzo disminuye más rápidamente. Estos cambios que ocurren en las propiedades del acero afectan el flujo y la distribución uniforme del calor a lo largo de las piezas. [1]

Como ya se mencionó anteriormente, la distorsión es afectada por los ciclos de calentamiento y enfriamiento; estos ciclos generan variaciones de temperatura que afectan las propiedades mecánicas de los aceros. Es importante entonces analizar la relación directa que existe entre estas propiedades mecánicas y la distorsión.

El coeficiente de expansión térmica es una medida de la cantidad de expansión o contracción que sufre un metal al ser calentado o enfriado. Para un determinado cambio de temperatura los metales con alto coeficiente de expansión térmica se expanden o se contraen más que uno con menor

coeficiente. Es por esto que al soldar dos metales la posibilidad de ser más afectado por la distorsión es para aquellos con mayor coeficiente de expansión térmica.

Por otra parte, el módulo de elasticidad es una medida de la rigidez del metal: entre más grande sea el módulo de elasticidad, más rígido será el metal y más resistencia pondrá a ser distorsionado cuando le sea suministrado calor.

En cuanto al esfuerzo de cedencia, este es otro parámetro que afecta el grado de distorsión que sufrirá un metal al ser soldado. La relación que existe entre el grado de distorsión que sufrirá una unión soldada y el valor del esfuerzo de cedencia de los metales involucrados es inversa, es decir, metales con bajo esfuerzo de cedencia serán menos propensos a ser distorsionados por el calor generado durante la aplicación de soldadura que los metales con esfuerzo de cedencia alto. [1]

Para lograr una mejor comprensión del porqué de esta relación inversa entre el esfuerzo de cedencia y la cantidad de distorsión en una unión soldada, es necesario observar más a profundidad para analizar los esfuerzos residuales y su relación con el esfuerzo de cedencia y la distorsión. El análisis de los esfuerzos residuales se presentara en el siguiente capítulo.

2.3 Tipos de distorsión

Podemos decir que existen las distorsiones en un plano y fuera de plano. Las Figuras 5 y 6 muestran las variantes de estos tipos de distorsión.

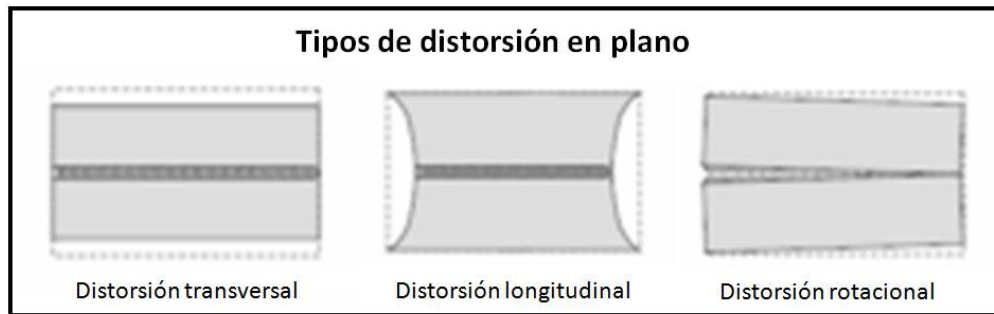


Figura 5. Muestra las variantes de distorsión en un plano. [2]

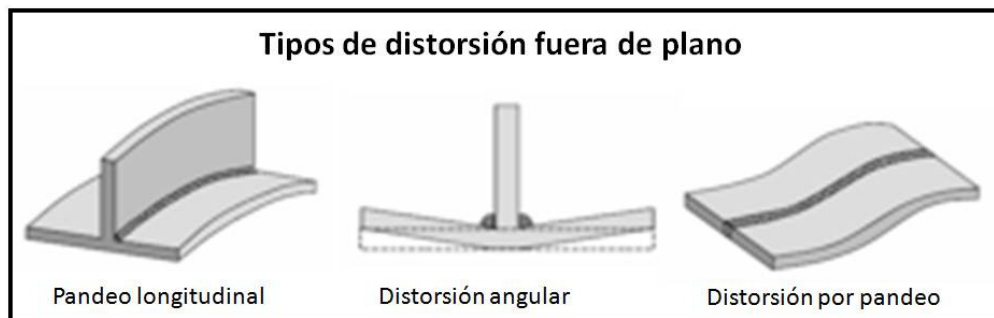


Figura 6. Muestra las variantes de distorsión fuera de plano. [2]

En estructuras de sección transversal delgada es muy común que exista distorsión por pandeo y la magnitud de esta tiende a ser muy grande. Las consecuencias de que exista pandeo son que se tienen pérdidas en la integridad de las estructuras, en el control de las dimensiones y un incremento en los costos de fabricación debido al tiempo invertido en remediar o compensar la desalineación de los materiales. [2]

El pandeo debido a la soldadura se da cuando los esfuerzos residuales exceden los esfuerzos críticos del material. La distorsión por pandeo es provocada principalmente por la componente longitudinal de los esfuerzos residuales, ya que los esfuerzos residuales longitudinales son de tensión en las

áreas cercanas a la unión soldada y de compresión en las áreas más alejadas.
[2]

En capítulos posteriores se presenta un análisis a profundidad del fenómeno de los esfuerzos residuales.

2.4 Distorsión por momento de soldadura

Otro tipo de distorsión es el que se genera por el momento de soldadura. Si bien es factible que la distorsión por momento de soldadura se haga presente en una extensa gama de configuraciones de uniones soldadas, J.U. Park en su artículo *Control of longitudinal bending distortion of built – up beams by high – frequency induction heating* presenta el concepto de momento de soldadura explicándolo a través de un caso real donde se tuvo la necesidad de definir un método para mitigar la distorsión longitudinal en vigas estructurales formadas.

J.U. Park [3] describe una viga formada como la unión en “T” de dos placas de acero unidas entre sí por dos soldaduras de filete depositadas de manera simultánea en cada lado de la unión. La Figura 7 muestra un esquemático de cómo luce una viga formada.

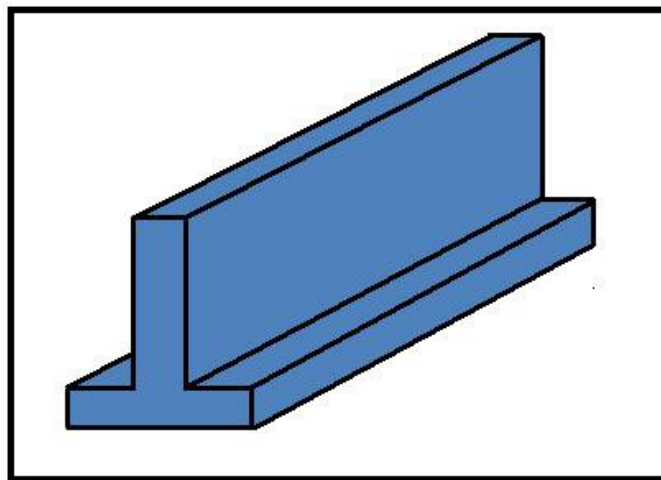


Figura 7. Esquemático de una viga formada

Para entender de una manera más clara los elementos que intervienen para que se genere el momento de soldadura se presenta la Figura 8, que ilustra una sección transversal de la viga formada donde W_t representa el espesor de la placa vertical, F_t representa el espesor de la placa horizontal, W_w y F_w representan la longitud de cada placa que forma la unión, Q_w representa el calor de entrada por la soldadura, N.A representa la línea del eje neutro de la pieza y N_w representa la distancia entre la fuente de calor de entrada y el eje neutro.

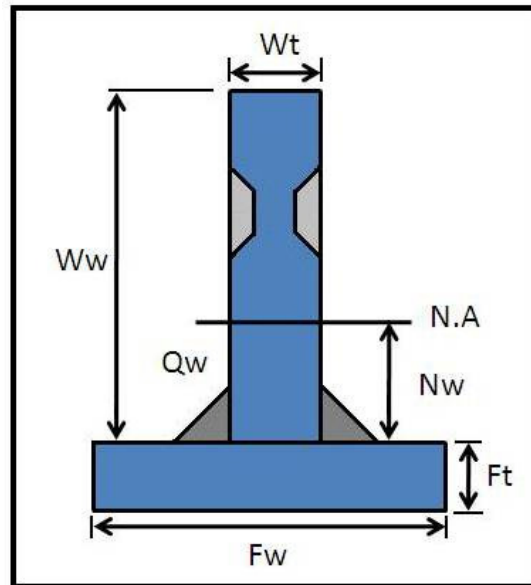


Figura 8. Sección transversal de una viga formada y los elementos que intervienen en el momento de soldadura. [3]

Para este caso práctico la distorsión longitudinal es producida por un momento de soldadura (M_w), debido a que la unión soldada está localizada en un punto más bajo del eje neutro de la sección transversal de la viga formada, tal como se observa en la Figura 9. El momento de soldadura (M_w) es representado por la multiplicación de la fuerza de contracción $P(Q_w)$ de la unión soldada por la distancia (N_w) del eje neutro en la sección transversal de la viga formada a la fuente de calor de entrada de la soldadura (Q_w). La magnitud de la

distorsión longitudinal se incrementa conforme se incrementa la fuerza de contracción y la distancia del eje neutro a la fuente de calor de entrada de la soldadura (Q_w). [3]



Figura 9. Momento de soldadura en una viga formada [3]

2.5 Análisis experimental de la distorsión

En el artículo *Comparison of Buckling Distortion Propensity for SAW, GMAW, and FSW* [2] se hace una comparación entre los procesos de SAW (arco sumergido), GMAW (MIG) y FSW (Soldadura por fricción) y que tan propensos son a producir distorsión por pandeo en placas de acero HSLA-65. En esta comparación se realizan probetas uniendo dos placas por soldadura a tope con cada uno de los procesos anteriormente mencionados.

De acuerdo a la experimentación realizada por los autores de este artículo, existen tres diferentes modos de distorsión para uniones soldadas a tope.

- Distorsión angular: una placa soldada que muestra solamente distorsión angular está compuesta de dos planos formando un ángulo en la unión soldada. [2]
- Distorsión por arqueado: una placa soldada que muestra solamente distorsión por arqueado presenta solamente arqueado longitudinal por todo el largo de la placa. [2]

- Distorsión por pandeo: una placa soldada que muestra solamente distorsión por pandeo puede presentar cualquiera de las modalidades de distorsión por pandeo. [2]

La Figura 10 muestra estos tres tipos de distorsión, mientras que la Figura 11 muestra las modalidades de distorsión por pandeo obtenidas mediante la variación del tipo y magnitud de los esfuerzos residuales en las probetas utilizando el software de simulación por elemento finito Abaqus.



Figura 10. Modos de distorsión en uniones a tope. [2]

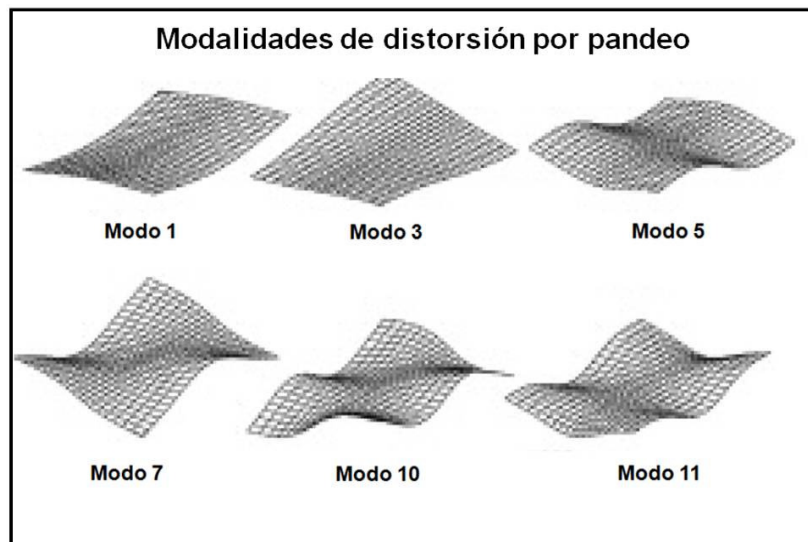


Figura 11. Modalidades de distorsión por pandeo. [2]

De acuerdo a S.R. Bhide, al aplicar la soldadura en las probetas se obtuvo como resultado que para la probeta donde se aplicó el proceso SAW se observó que las orillas de las placas se movieron hacia arriba indicando la presencia de distorsión angular. Al observar desde la parte superior se alcanza a apreciar una forma de arqueado longitudinal. La Imagen 1 muestra la probeta soldada con el proceso SAW. [2]



Imagen 1. Probeta soldada con proceso SAW. [2]

Al experimentar con un proceso diferente al anterior se observó que la probeta donde se aplicó la soldadura por medio del proceso GMAW, presentó distorsión de la misma naturaleza que en la probeta unida por el proceso SAW aunque en menor magnitud. Observar Imagen 2. [2]



Imagen 2. Probeta soldada por el proceso GMAW. [2]

Por último, al experimentar con el proceso de FSW se obtuvo que al observar la probeta soldada desde la parte superior se presenta distorsión longitudinal cóncava por arqueado y convexa por arqueado de manera transversal. El inicio y final de las placas se mueven hacia arriba mientras que las orillas se

mueven hacia abajo. La combinación del arqueo longitudinal y transversal muestra una forma indicativa de distorsión por pandeo que coincide con el modo 1 de pandeo de la figura 11. Ver imagen 3. [2]



Imagen 3. Probeta soldada por el proceso FSW. [2]

En resumen, S.R. Bhide presenta como resultados que los modos de distorsión con los diferentes procesos ensayados se presentaron de la siguiente manera:

- SAW: distorsión angular y por arqueo.
- GMAW: distorsión angular y por arqueo.
- FSW: distorsión por pandeo del Modo 1.

2.6 Control de la distorsión

Existe una diversidad de recursos disponibles para reducir o contrarrestar el efecto de la distorsión, ya que no es posible eliminarla por completo. Una de las aproximaciones más comunes es el compensar en la unión previa a la soldadura y la otra es el rediseño de la junta como tal entre otras. En esta sección veremos algunas de estas aproximaciones iniciando por el método de compensación en la unión previo a la aplicación de la soldadura. [4]

Veamos primero el caso para una unión en T o en ranura en V. para este caso, lo primero a realizar es colocar las partes a soldar y aplicar puntos de soldadura provisional asegurando que las placas estén un poco desalineadas,

al aplicar la soldadura definitiva los esfuerzos residuales se encargaran de alinearlas en posición correcta. Será necesario realizar una serie de pruebas para definir el grado de desalineación inicial. La figura 12 muestra un esquemático del des alineamiento inicial para ambos tipos de uniones.

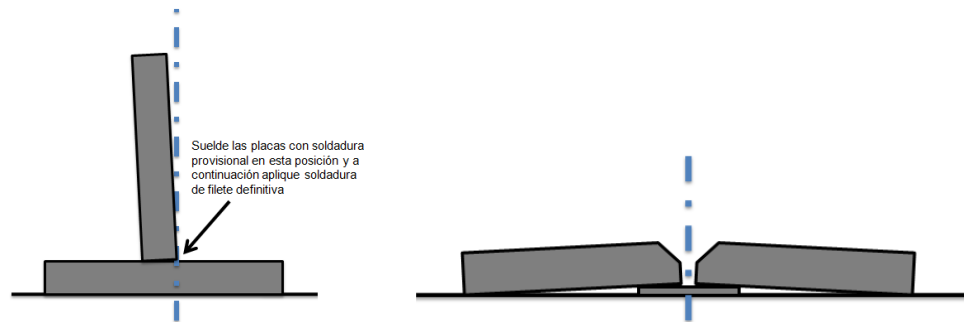


Figura 12. Des alineamiento en unión en T y en ranura en V. [4]

Existe también el control por sujetadores. Este método se utiliza para mantener las piezas en posición correcta hasta que estas se enfrían. Para este método se utilizan sujetadores, calzas y demás aditamentos. Este procedimiento no ofrece resultados perfectos; sin embargo, si reduce considerablemente la distorsión. La Figura 13 muestra un ejemplo de aplicación de este método.

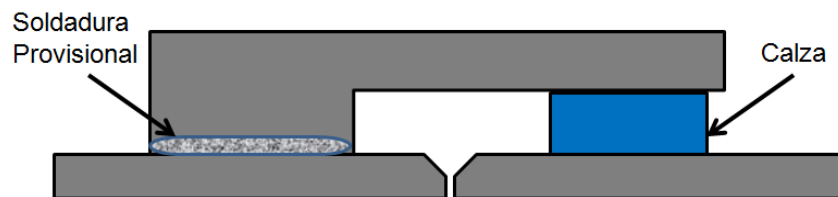


Figura 13. Unión de ranura en V controlada por sujetadores y calzas. [4]

Otro método para controlar la distorsión es limitando el calor utilizando sistemas de enfriamiento. El concepto de barras de enfriamiento es algo semejante al utilizado en el proceso de EBW (Electron Beam Welding). La figura 14 muestra un esquemático con el concepto de las barras de enfriamiento. En este procedimiento se colocan barras de acero o de cobre sujetas a un lado y paralelas al cordón de soldadura, las barras de enfriamiento

disipan el calor de la soldadura e impiden que este fluya al resto de la pieza que se está soldando.

Al estar sujetas estas barras a las piezas de trabajo, estas ejercen fuerza sobre los bordes de las partes impidiendo que se formen ondulaciones en las piezas de trabajo mientras estas están calientes. La ranura que se aprecia en la placa de enfriamiento inferior permite que la soldadura permanezca caliente al mismo tiempo que drena el calor generado. Esta ranura puede ser inundada con gases de protección cuando el proceso utilizado así lo requiera.

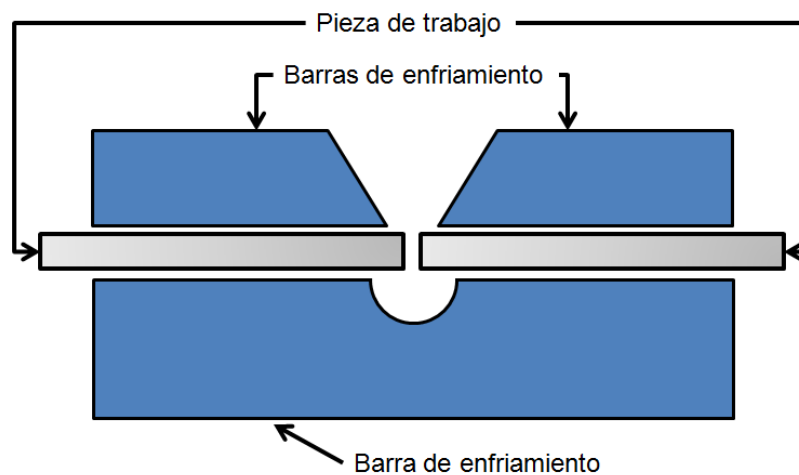


Figura 14. Unión controlada por sistema de enfriamiento. [4]

Cuando se requiere de un alineamiento con alta precisión entre las partes a soldar se puede utilizar el método de pre – tensado. Este método consiste en utilizar abrazaderas o sujetadores para doblar las piezas a unir en dirección opuesta a las fuerzas que se producirán mediante la soldadura. Este método arroja muy buenos resultados cuando se tiene un posicionador y es posible hacer pruebas para definir la cantidad de pretensado que se requiere. La Figura 15 muestra un esquemático del método de pre – tensado. [4]

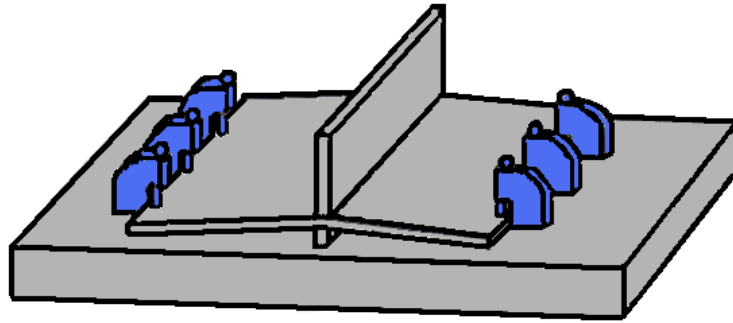


Figura 15. Unión con método de pretensado. [4]

Es posible incluso utilizar las propias fuerzas de distorsión para contrarrestarlas aplicando dos o más cordones de soldadura en el lado opuesto de la unión. Si la unión fuese en T se aplicara un cordón de cada lado tal como se muestra en la Figura 16.

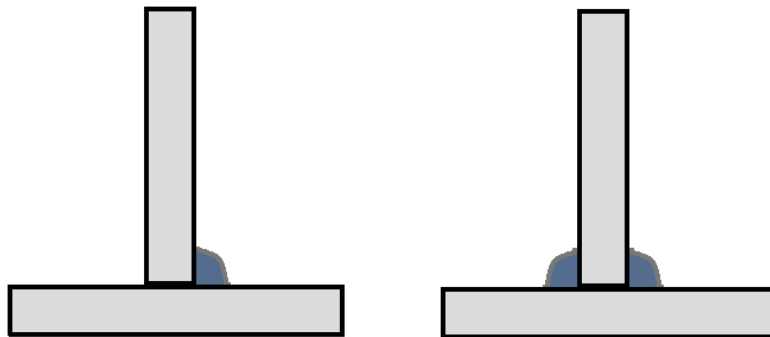


Figura 16. Unión en T en un lado y en ambos lados. [4]

Si la unión fuese de ranura en V se podría compensar haciendo otra ranura por el lado contrario y aplicando soldadura por ambos lados tal como se muestra en la Figura 17.

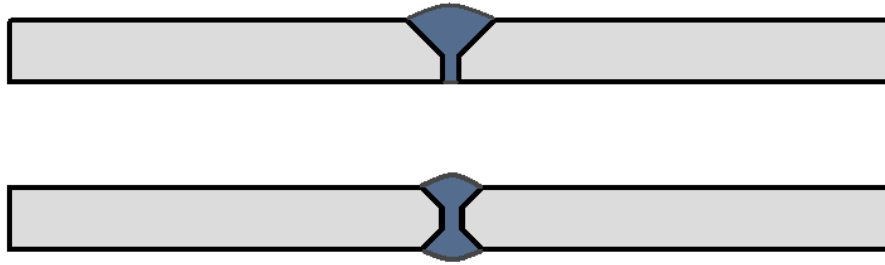


Figura 17. Unión de ranura en V sencillo y doble. [4]

Otra manera de reducir las fuerzas generadas por la distorsión es aplicando cadenas de soldadura escalonada o discontinua. Los cordones discontinuos no solo se balancean mutuamente sino que, al reducir la cantidad total de soldadura, también reducen el esfuerzo residual total, como puede apreciarse en la Figura 18.

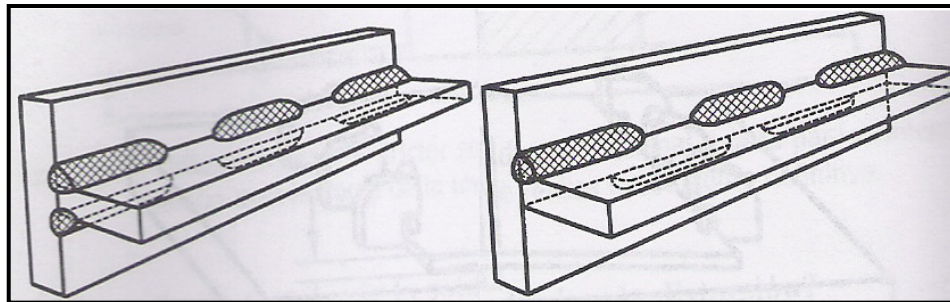


Figura 18. Placas unidas en T con soldadura escalonada o discontinua. [4]

Otra manera de controlar la distorsión es modificando las uniones es en la Figura 19 se aprecia un ejemplo de una unión en T modificada para agregarle una ranura en V por el lado contrario.

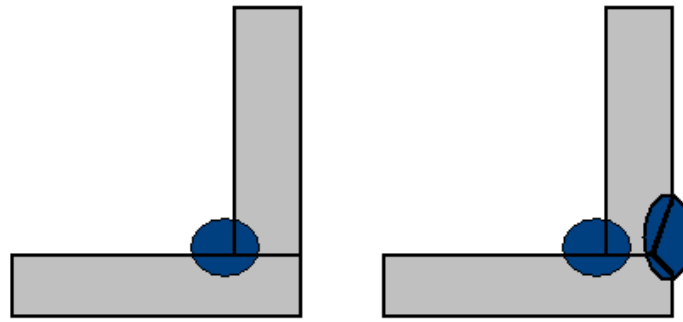


Figura 19. Unión en T modificada. [4]

Cuando se tiene una soldadura larga y continua se puede utilizar la soldadura hacia atrás, en este método lo que se hace es aplicar cordones en dirección opuesta a la inclinación del electrodo, es decir, comenzando en donde normalmente es el final de la soldadura. Si se van a aplicar múltiples pases es recomendable considerar y terminar los cordones de cada pase en diferentes puntos. La Figura 20 muestra un esquemático de la soldadura hacia atrás. [4]

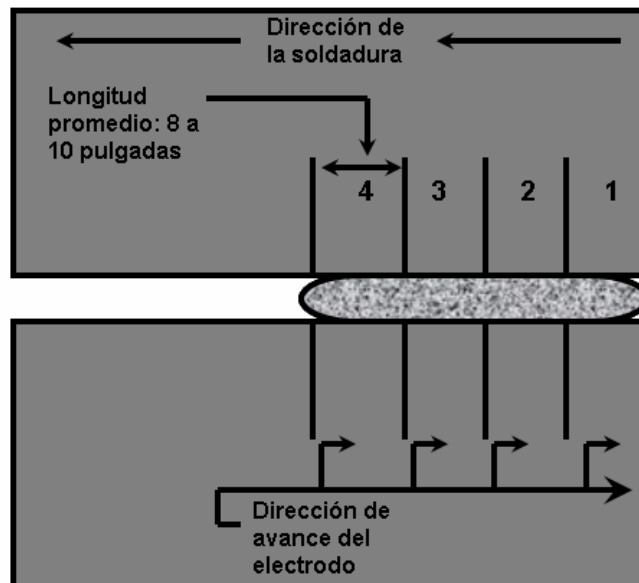


Figura 20. Unión con soldadura hacia atrás. [4]

Cuando la soldadura es larga y continua y la soldadura reduce la raíz se pueden colocar calzas delante de la soldadura para controlar el espaciamiento de la unión, tal como se aprecia en la Figura 21.

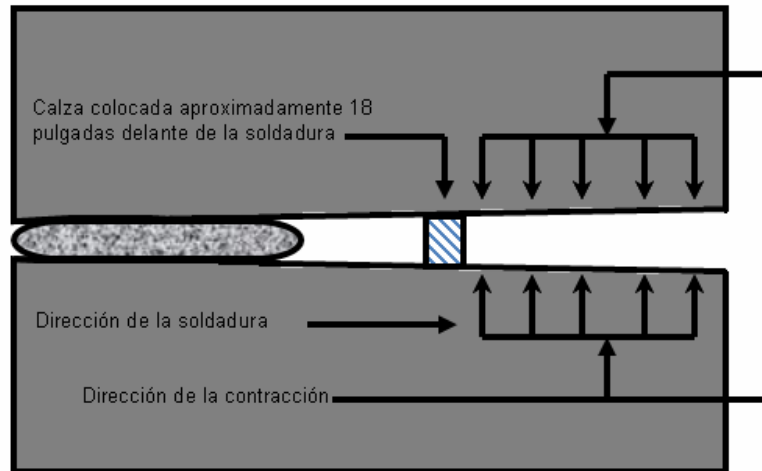


Figura 21. Control de espaciamiento de una unión con una calza. [4]

2.7 Control de la distorsión por Momento de calor inducido

J.U. Park al igual que presenta el concepto de distorsión generada por un momento de soldadura, también presenta un método para mitigar esta distorsión generada por el momento de soldadura aplicando lo que se define como momento de calor inducido.

La Figura 22 ilustra una sección transversal de la viga formada donde W_t representa el espesor de la placa vertical, F_t representa el espesor de la placa horizontal, W_w y F_w representan la longitud de cada placa que forma la unión Q_w representa el calor de entrada por la soldadura, N.A representa la línea del eje neutro de la pieza y N_w representa la distancia entre la fuente de calor de entrada y el eje neutro, Q_i representa la fuente de calor inducido y N_i representa la distancia entre el eje neutro y la fuente de calor inducido.

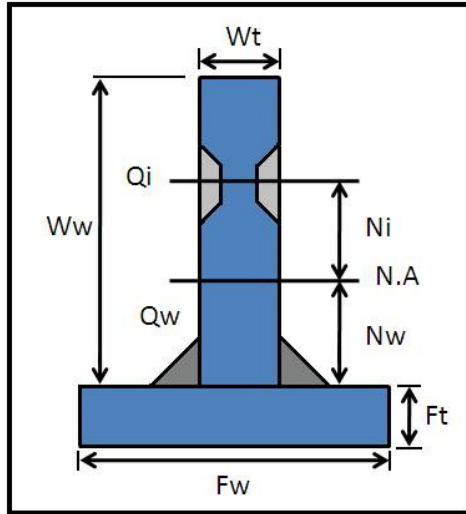


Figura 22. Sección transversal de una viga formada y los elementos que intervienen en el momento de soldadura y calor inducido. [3]

La distorsión longitudinal producida por el momento de soldadura puede ser mitigada generando un momento de calor inducido ($M_i = Q_i \times N_i$) con la misma magnitud de momento de soldadura pero orientándolo de manera opuesta al momento de soldadura. En estructuras T grandes el momento de soldadura se puede obtener con el eje neutro de la sección transversal de la viga formada, la ubicación de la fuente de calor de la soldadura y la cantidad de calor de entrada de la soldadura. De la misma manera el momento de calor inducido puede ser generado al controlar la cantidad de calor inducido de entrada (Q_i) y la distancia (N_i) del eje neutro a la fuente de calor inducido. Asumiendo que la cantidad de calor inducido de entrada es constante, la distancia del eje neutro a la fuente de calor inducido se obtiene por $N_i = Q_w \times N_w / Q_i$. Como resultado, la distorsión longitudinal se puede controlar aplicando un calentamiento en una ubicación determinada con calor inducido de manera simultánea con la aplicación de la soldadura. [3]

La distorsión longitudinal decrece a medida que la temperatura del calor inducido se hace mayor y la distancia del eje neutro a la fuente de inducción de calor se incrementa. Sin embargo existe el riesgo de aplicar demasiado calor de

inducción terminando con mayor distorsión longitudinal en el sentido contrario al inicial por lo que resulta necesario calcular de manera correcta la cantidad de calor inducido a aplicar cuando se desea aplicar este método para el control de la distorsión. [3]

2.8 Otros medios para reducir los efectos de la distorsión.

Existen otros medios para reducir los efectos de la distorsión, algunos de estos son los siguientes:

- **Pre calentamiento del metal base.** Al aplicar calor a la pieza de trabajo previo a la aplicación de la soldadura se reducirán los diferenciales de temperatura, los esfuerzos residuales y la distorsión. [4]
- **El martillado.** Este método consiste en golpear el metal base con un martillo que por lo general es neumático. Al hacer esto se regresa el material a su forma original y se redistribuyen los esfuerzos concentrados. Si el caso es de una soldadura que requiere múltiples pases este procedimiento de martilleo se debe realizar entre cada pase. El método es funcional, mas sin embargo, depende mucho de la destreza y juicio del soldador para controlar la consistencia del martilleo. [4]
- **El relevado de esfuerzos.** Este método que por lo general es utilizado en piezas estructurales, consiste en calentar la pieza entera o al menos la zona afectada por la soldadura en un horno eléctrico o por medio de una bobina para así eliminar la tensión producida por la soldadura. [4]
- **Reemplazo de procesos.** Existe la opción de analizar la posibilidad de utilizar otro tipo de proceso para realizar la unión, un ejemplo seria cambiar la soldadura por fusión a soldadura fuerte o blanda, esto en dado caso que la unión no requiera demasiada fuerza. [4]

La Figura 23 muestra un agrupamiento de los distintos métodos que existen para controlar, remediar o prevenir los problemas de distorsión.

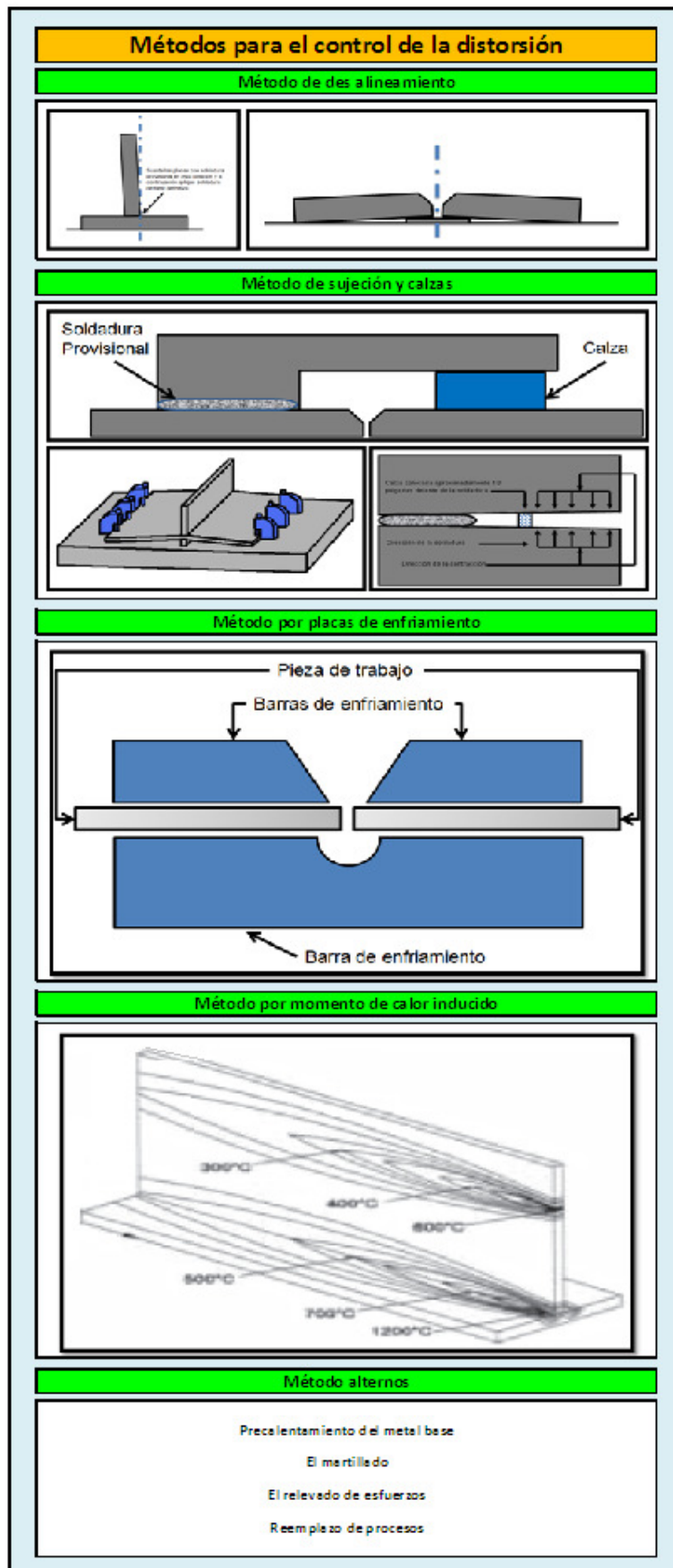


Figura 23. Agrupación de métodos de control de distorsión

2.9 La AWS y la distorsión

La Sociedad Americana para la Soldadura (AWS por sus siglas en inglés) fue fundada en 1919 como una organización multifacética y sin fines de lucro. El objetivo era avanzar y mantenerse siempre a la vanguardia en la ciencia, tecnologías y aplicaciones de soldadura así como las demás disciplinas orientadas a uniones.

La AWS es distinguida, y lo ha sido siempre, como líder en desarrollo de tecnologías y educación de soldadura y sus lineamientos son reconocidos por organismos internacionales.

Uno de los tantos códigos que publica la AWS y que son mandatorios en la mayoría de la industria con procesos de unión por soldadura es el código D1.1 *Structural welding code steel*. Este código cubre los lineamientos para cualquier tipo de estructura soldada fabricada a partir de aceros al carbón de baja aleación. Este código contiene una serie de reglamentos que regulan la fabricación de estructuras de acero por medio de la aplicación de soldadura. Contiene lineamientos para el diseño, procesos, fabricación, evaluación y reparaciones de aceros estructurales soldados así como también anexos no mandatorios pero sí muy relevantes al tema de la soldadura.

Siendo este código mandatorio para la industria de la manufactura de equipos de acero a través de procesos de soldadura se vuelve necesario conocer lo que establece esta norma referente a la distorsión. [5]

El código AWS D1.1/D1.1M:2004 en su apartado dedicado a la fabricación establece en la sección 5.21 *Control de la distorsión y contracción*, normas las cuales regula los factores principales que influyen en la distorsión.

El apartado 5.21.1 establece que cuando se ensamblan y unen partes de una estructura, y en soldaduras de refuerzo el procedimiento y la secuencia debe ser tal que se minimice la distorsión y el encogimiento. [6]

El apartado 5.21.2 refiere que siempre que se aplicable toda las aplicaciones de soldadura deben ser en una secuencia tal que el calor se balance mientras la aplicación de soldadura progrese. [6]

El apartado 5.21.3 establece que para estructuras donde la contracción y distorsión se espera que sea excesiva es responsabilidad del contratista el incluir de manera escrita una secuencia de soldadura que permita cumplir con las especificaciones de calidad para el ensamble o estructura en cuestión. El programa donde se especifica la manera de controla la distorsión y contracción debe de ser proporcionado al ingeniero para información y comentarios antes de iniciar la aplicación de soldadura en la estructura o ensamble donde se espera distorsión. [6]

El apartado 5.21.4 menciona que la dirección en que se debe de aplicar la soldadura es avanzando de los puntos donde las piezas son fácilmente colocadas en posición hacia donde las partes pueden tener más movimiento. [6]

El apartado 5.21.5 refiere que ensambles o juntas en las que se espera que exista contracción significativa deben ser soldados antes de las que se espera que tengan menor contracción, además deben ser soldadas con el mínimo de restricciones (sujeción) posibles. [6]

El apartado 5.21.6 los componentes construidos por empalme de piezas deben ser soldados antes de unirlo con soldadura a otras estructuras. [6]

Por último el apartado 5.21.7 menciona que al realizar uniones soldadas bajo condiciones extremas de contracción, una vez iniciada la aplicación de

soldadura en un ensamble, esta no se debe dejar enfriar por debajo de la temperatura de precalentamiento especificada hasta que el total de las uniones han sido soldadas para asegurar que no existan grietas. [6]

3.

Esfuerzos Residuales

3.1 El fenómeno de los esfuerzos residuales

Los esfuerzos residuales, también comúnmente llamados esfuerzos internos son aquellos esfuerzos que existirían en un cuerpo (en un acero para nuestro caso de estudio) al que se le han retirado las cargas externas. Los esfuerzos residuales que existen en un acero que previamente ha sido sometido a cambios de temperatura no uniforme tales como los generados durante los procesos de soldadura son comúnmente llamados esfuerzos térmicos. [7]

Ahora que se sabe lo que son los esfuerzos residuales surge la necesidad de comprender como se generan estos esfuerzos. Para explicar de una manera más ilustrativa la generación de esfuerzos residuales se utilizará el sistema de barras diseñado por Kou que se aprecia en la Figura 24.

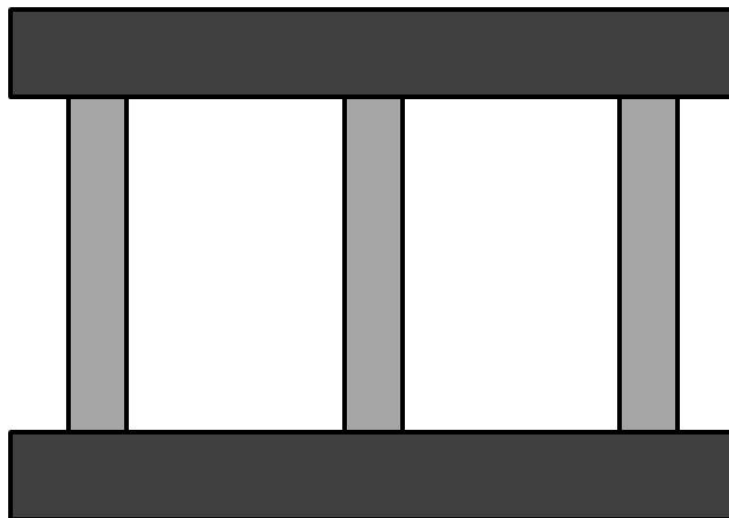


Figura 24. Arreglo de barras de acero. [7]

La Figura 24 muestra un arreglo de tres barras verticales de acero unidas en cada extremo a otras dos barras horizontales de acero de mayor dimensión. Debido a que este arreglo de barras es sólo para fines ilustrativos se despreciará el tipo de acero, sus características y propiedades así como el método utilizado para unir las barras.

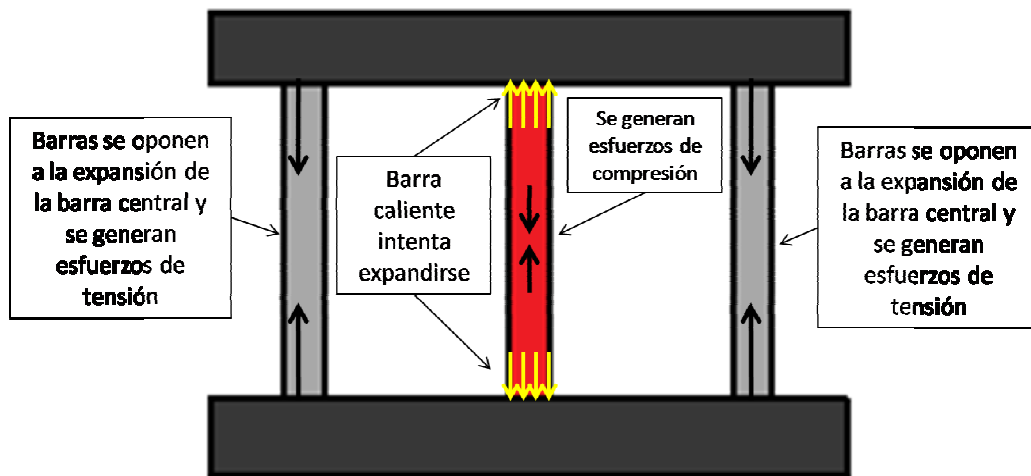


Figura 25. Calor aplicado a barra de acero central. [7]

En condiciones iniciales a temperatura ambiente, se aplica calor a la barra central del arreglo de la Figura 24. Esta intentará expandirse en dirección axial como se observa representado por las flechas amarillas de la Figura 25. Esta expansión se verá restringida por las barras de los lados que aún se encuentran a temperatura ambiente. Al no ser posible la expansión, se generaran esfuerzos de compresión en la barra central, los cuales continuarán en aumento conforme la temperatura aplicada a la barra aumente hasta alcanzar el esfuerzo de cadencia a compresión. Estos esfuerzos representan el límite donde ocurrirá la deformación plástica del material. [7]

Ahora se dejará de aplicar calor a la barra central y se dejará enfriar a temperatura ambiente nuevamente.

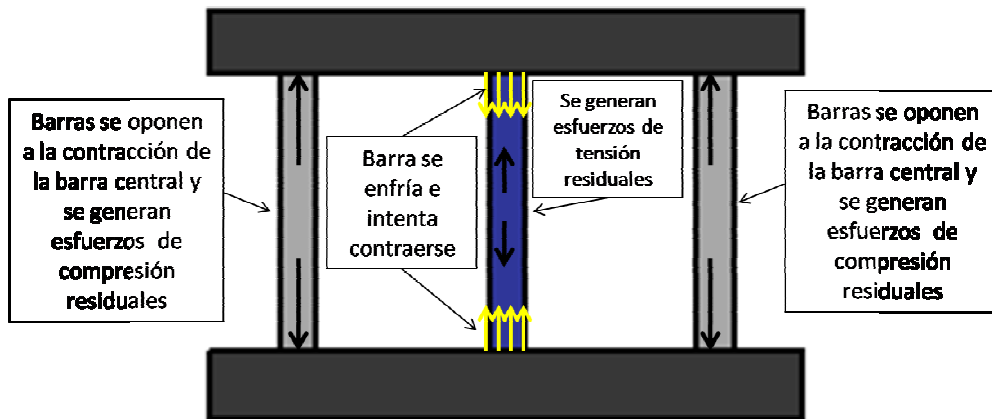


Figura 26. Barra de acero central durante su enfriamiento [7]

Conforme se va dando el enfriamiento la barra de acero intentará contraerse y volver a su estado original, esto se puede visualizar en la imagen de la Figura 26 representado con las flechas amarillas. Sin embargo, la contracción de la barra central se ve restringida por las barras laterales, puesto que estas siguen a temperatura ambiente. En consecuencia, los esfuerzos de compresión que se habían generado en la barra desaparecen y en su lugar se generaran esfuerzos de tensión los cuales aumentarán durante el enfriamiento hasta alcanzar el esfuerzo de cedencia en tensión. Toda vez que la temperatura de la barra ha descendido hasta temperatura ambiente, un esfuerzo residual a la tensión equivalente al esfuerzo de cedencia del metal se generará en la barra central. Los esfuerzos residuales en las barras laterales son de compresión y equivalentes a la mitad del esfuerzo a la tensión generado en la barra central. [7]

$$\sigma_{\text{compresion-barras-laterales}} = \frac{1}{2} \sigma_{\text{tension-barra-central}} \quad (\text{Ec.1})$$

La ecuación 1. Ilustra la relación existente entre estos esfuerzos generados. [7]

Es posible hacer una analogía entre el ejemplo anterior y una unión de placas soldada como la que se aprecia en la figura 27.

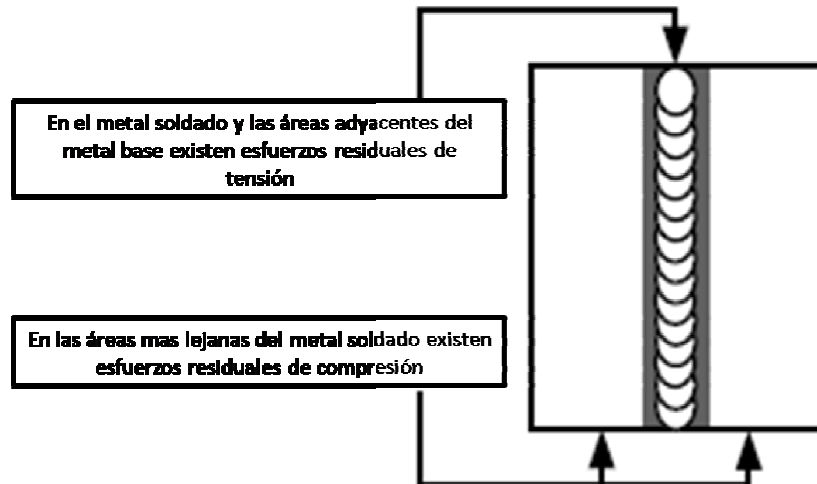


Figura 27. Placas de acero unidas por un cordón de soldadura [7]

En esta analogía, el metal soldado y metal base adyacente se comportarían de manera muy similar a la barra central del arreglo utilizado en el ejemplo anterior, ya que es ahí donde se está aplicando la fuente de calor de manera directa. Las zonas de la placa que están más alejadas del metal soldado presentarían un comportamiento similar al de las barras laterales del ejemplo anterior. Esto se debe al hecho de que la expansión y contracción del metal soldado y de las áreas adyacentes del metal base se ven restringidas por las áreas de metal base más alejadas del calor. Esto provocaría que al enfriarse el metal se generen esfuerzos residuales de tensión en el metal soldado y áreas aledañas y esfuerzos de compresión en las áreas alejadas a las zonas más alejadas del calor. [7]

Otra manera de explicar el fenómeno de los esfuerzos residuales ya vista al cien por ciento desde el punto de vista de la soldadura es mediante la explicación de lo que ocurre en la Figura 28.

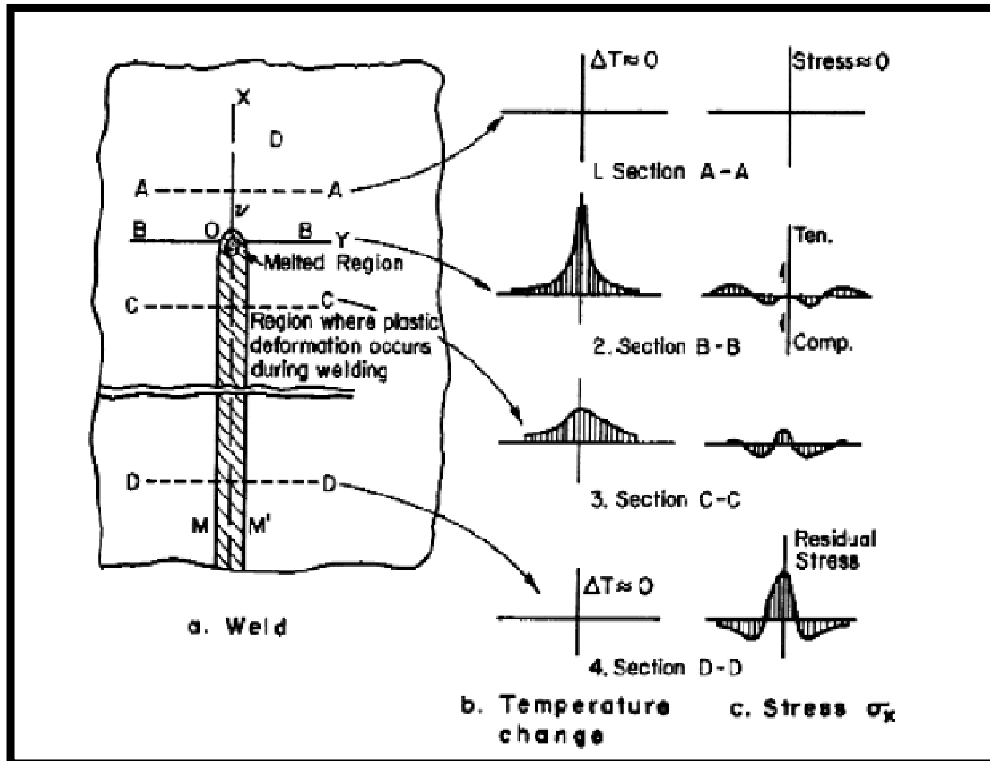


Figura 28. Aplicación de soldadura a lo largo de una placa. [8]

La Figura 28 muestra una representación esquemática de cómo se comporta el cambio de temperatura (ΔT) y los esfuerzos en dirección de la soldadura (σ_x) durante un proceso de soldadura. El área M – M' es la región donde ocurre la deformación plástica. [8]

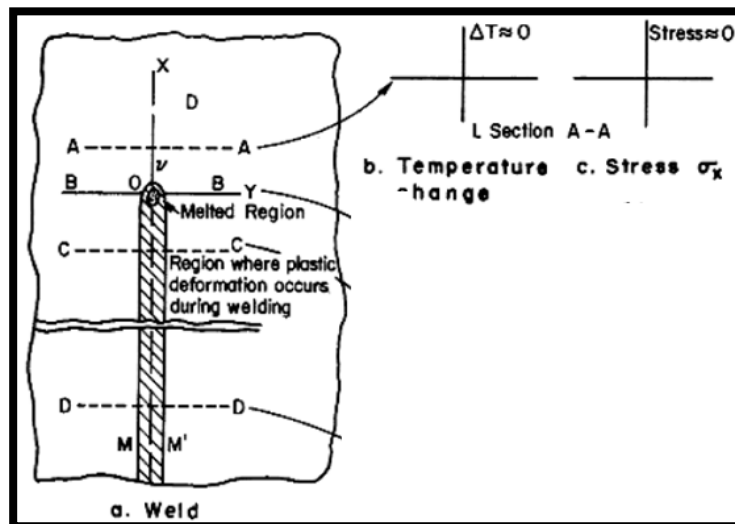


Figura 29. Sección A – A. [8]

La sección A – A ubicada por delante de la fuente de calor aún no ha entrado en contacto con la fuente de calor originada en la sección B; es por esto que en la grafica de ΔT no se aprecia ningún cambio, de igual manera sucede con la gráfica de esfuerzos ya que en ese instante esta sección se encuentra libre de esfuerzos. [8]

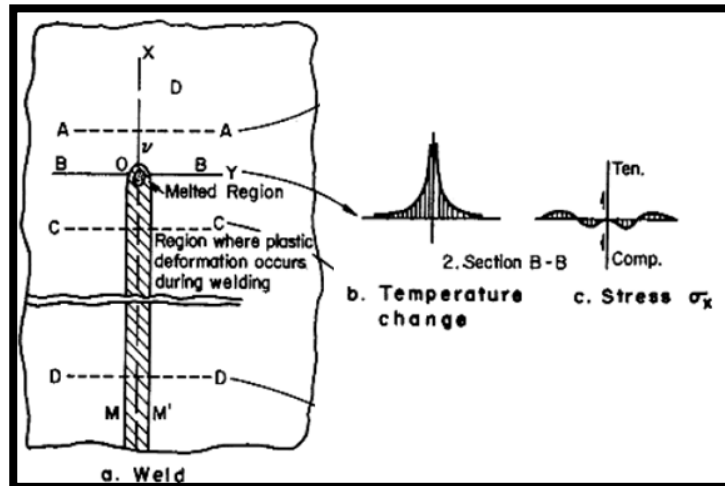


Figura 30. Sección B – B. [8]

En la sección B – B ubicada en el centro del arco, ya se ha interceptado la fuente de calor y esto se ve reflejado en la gráfica ΔT ya que se aprecia un cambio de temperatura muy pronunciado. En la gráfica de esfuerzos vemos que se han generado esfuerzos. Los esfuerzos más cercanos a la fuente de calor son casi cero, ya que en ese momento el charco de soldadura no tiene la fuerza para resistirse a las cargas. En las zonas aún más alejadas de la fuente se empiezan a notar esfuerzos de compresión y en consecuencia en las zonas aun más alejadas a la fuente de calor se generan esfuerzos de tensión. [8]

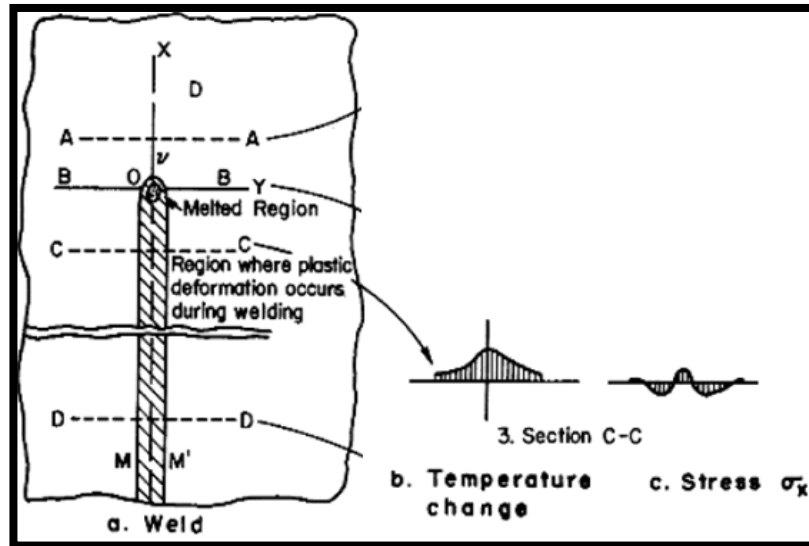


Figura 31. Sección C – C. [8]

La zona C – C se encuentra en proceso de enfriamiento por lo que el metal soldado y las áreas adyacentes del metal base tienen temperatura más baja; esto se aprecia en la gráfica ΔT ya que la curva indica que el cambio de temperatura es cada vez menor. En la gráfica de esfuerzos vemos que existe en el material soldado una tendencia a contraerse lo que da como resultado esfuerzos de tensión y en consecuencia de esto en las zonas más alejadas los esfuerzos son de compresión. [8]

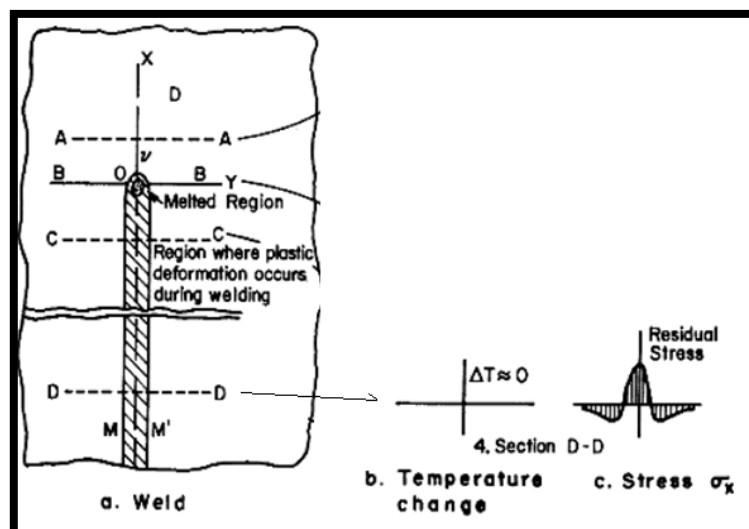


Figura 32. Sección D – D. [8]

Finalmente, a lo largo de la zona D – D que es la más alejada a la fuente de calor se deja de ver un cambio en la temperatura es por esto que la grafica ΔT el cambio es cero. En esta zona los metales se han contraído es por eso que se aprecia en la grafica de esfuerzos valores altos de esfuerzos de tensión en la zonas más cercanas a la soldadura y por ende en las zonas más alejadas los esfuerzos son de compresión. [8]

A esta gráfica de esfuerzos se le conoce como la gráfica de distribución de esfuerzos residuales, ya que representa el estado final de la placa.

3.2 Mecanismos para la medición de esfuerzos residuales.

Existen en la actualidad una gran cantidad de técnicas para medir esfuerzos residuales en los metales. Estas técnicas para medir esfuerzos residuales se dividen en 4 grupos que son los siguientes:

1. Relajación de tensiones.
2. Difracción de rayos – x.
3. Utilización de propiedades sensibles a los esfuerzos.
4. Técnica de agrietamiento.

Estas técnicas separadas en grupos tienen diversos campos de aplicación y utilizan diferentes elementos para la medición. La Tabla 1 muestra estos diferentes elementos. [9]

Grupo	Aplicaciones	Técnicas
Relajación de esfuerzos utilizando deformetros mecanicos y galgas electricas	Aplicable principalmente en placas	1. Técnica de seccionado utilizando resistencias eléctricas strain gauges. 2. Técnica de Gunnert 3. Técnica de barrenado de Mathar-Soete 4. Técnica de fresado sucesivo de Stablein
	Aplicable principalmente a Cilindros sólidos y tubos	5. Técnica de maquinado sucesivo de Heyn-Bauer 6. Técnica de trepanación de Mesnager-Sachs
	Aplicable principalmente a sólidos tridimensionales	7. Técnica de barrenado de Gunnert 8. Técnica de seccionado de Rosenthal-Norton
Relajación de esfuerzos utilizando aparatos diferentes a los anteriores.		9. Técnica utilizando sistema divisor de retícula. 10. Técnica de barrenado con capa frágil. 11. Técnica de barrenado con capa fotoelástica
Difracción por Rayos-x		12. Técnica de película de rayos-x 13. Técnica de difractómetro de rayos-x.
Utilización de propiedades sensibles a los esfuerzos.	Técnicas ultrasónicas	14. Técnicas de ondas ultrasónicas polarizadas 15. Técnica de atenuación Ultrasónica
Técnica de agrietamientos.		17. Técnica de agrietamiento Hidrógeno-inducido 18. Técnica de agrietamiento Esfuerzo-corrosión.

Tabla 1. Condensado de grupos y técnicas para la medición de esfuerzos residuales. [9]

En las técnicas de relajación de esfuerzos, los esfuerzos son determinados midiendo las deformaciones elásticas liberadas. En estas técnicas los esfuerzos residuales son liberados mediante el corte de una muestra en pedazos o por la extracción de un pedazo de muestra. En la mayor parte de los casos se utilizan para medir las deformaciones liberadas deformetros mecánicos o galgas extensiométricas en diferentes configuraciones como por ejemplo la de rosettes. Estas técnicas se aplican a placas, cilindros, tuberías o sólidos tridimensionales. [9]

La Figura 33 muestra un esquemático de tres configuraciones de galgas extensiométrica que existen disponibles comercialmente.

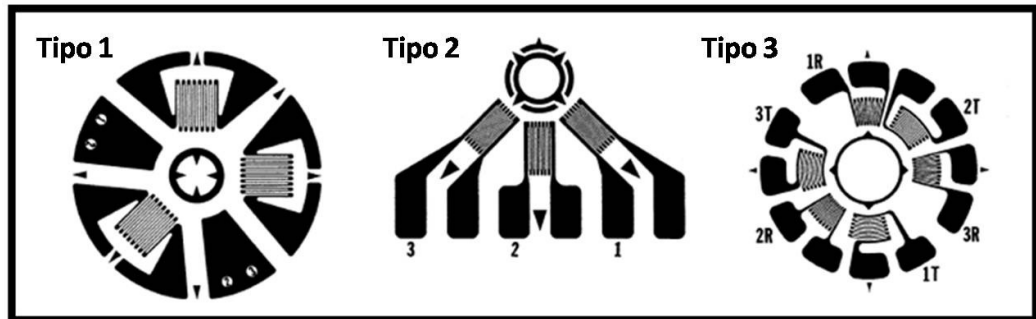


Figura 33. Configuraciones de galgas extensiométricas. [10]

Las deformaciones elásticas de los metales que tienen estructuras cristalinas pueden ser determinadas mediante la medición de sus parámetros cristalinos haciendo uso de la técnica de difracción por rayos x . El parámetro cristalino de un metal sin deformaciones es conocido o puede ser determinado de forma independiente por lo que es posible medir las deformaciones elásticas en un metal de manera no destructible sin la necesidad de maquinarse o barrenarse. [9]

En la actualidad existe dos técnicas de difracción por rayos x , la de película de rayos x y la del difractómetro de rayos x .

Utilizando la técnica de difracción de rayos x , la deformación superficial puede ser determinada en un área pequeña, a una profundidad y diámetro de 0.003 mm. Esta técnica se aplica para medir esfuerzos residuales en rodamientos, dientes de engranes así como esfuerzos residuales superficiales en piezas maquinadas. [9]

Las técnicas de difracción por rayos x tienen también desventajas. Estos procesos son lentos, por ejemplo, para el método de la película de rayos x en cada punto las mediciones tienen que hacerse en dos direcciones requiriendo cada una alrededor de 30 minutos de exposición para arrojar un resultado. Otra desventaja es la carencia de precisión cuando se aplica a materiales que han

sido tratados térmicamente ya que en estos la estructura ha sido distorsionada.
[9]

Otro método que se tiene disponible para la medición de esfuerzos residuales es mediante la medición de propiedades sensibles a los esfuerzos. Este método cuenta con dos técnicas que son las ultrasónicas y la de dureza.
[9]

En las técnicas ultrasónicas se utilizan las ondas ultrasónicas polarizadas y el cambio inducido por los esfuerzos en el ángulo de polarización de las ondas. Ninguna de estas técnicas ha sido desarrollada más allá de la etapa de experimentación por lo que aun no han sido utilizadas para la medición de esfuerzos en estructuras ya soldadas. [9]

Por último está la técnica por agrietamiento, en esta técnica se estudian los esfuerzos residuales observando las grietas producidas por estos en muestras. Este método cuenta con dos técnicas, la de grietas inducidas por hidrógeno y el de grietas por esfuerzo corrosión. Estas técnicas son utilizadas para estudiar los esfuerzos residuales en estructuras complejas con una complicada distribución de esfuerzos residuales. [9]

El método de medición de esfuerzos residuales más comúnmente utilizado es el de barrenado de Mathar-Soete también conocido como método del agujero ciego.

Este método por ser uno de los más utilizados si no el que más, ha sido normado por la ASTM de manera que existan reglas y lineamientos a seguir para poder llevar a cabo esta prueba de manera estandarizada y así lograr cierto grado de consistencia en los resultados obtenidos.

La norma ASTM que se encarga de definir el procedimiento para la aplicación de la prueba es la norma ASTM 837 – 01. Esta norma define que el

método del agujero ciego es un método utilizado para la medición de esfuerzos residuales en áreas cercanas a las superficies de un material. [10]

Sin embargo, el alcance de la norma es hasta cierto punto limitado pues solo cubre los procedimientos para determinar los esfuerzos residuales cercanos a la superficie de los materiales. [10]

Este método de prueba es algunas veces llamado “semi destructivo” ya que el daño que se produce al material es muy localizado y en muchos casos no afecta de manera significativa el uso del espécimen lo cual representa una gran ventaja. [10]

La metodología para llevar a cabo la prueba es relativamente sencilla. El procedimiento ASTM 837 - 01 nos define una serie de pasos a seguir para llevar a cabo la prueba los cuales se muestran a continuación

1. Una galga extensiométrica con tres o más elementos del tipo general ilustrado en la Figura 34 es colocada en el área a considerarse para la prueba. [10]

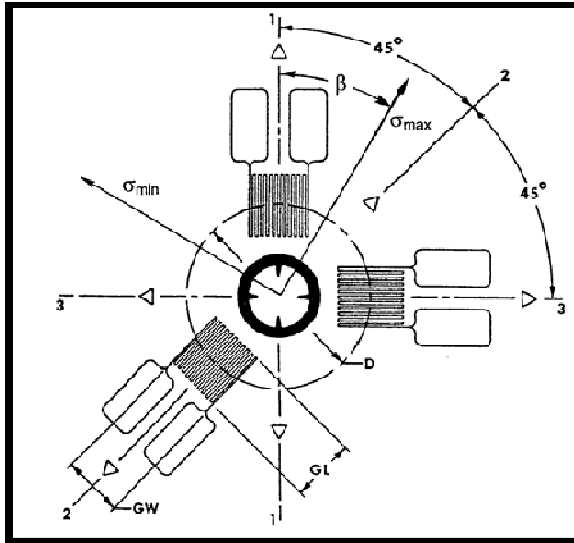


Figura 34. Diagrama esquemático de una galga extensiométrica típica. [10]

2. Se taladra un agujero en el centro geométrico de la galga extensiométrica de una profundidad de 0.4 del diámetro medio del círculo (D) de la galga extensiométrica. [10]
 - a. Los esfuerzos residuales en el área que rodea el agujero se relajan. Las tensiones relevadas deberán ser medidas con un instrumento confiable que registre los resultados. El relevado está casi terminado cuando la profundidad del agujero se aproxima a 0.4 del diámetro del círculo (D) de la galga extensiométrica.
3. La Figura 35 muestra una representación esquemática de los esfuerzos residuales y tensiones relevadas típicas cuando un agujero es taladrado en una probeta. [10]

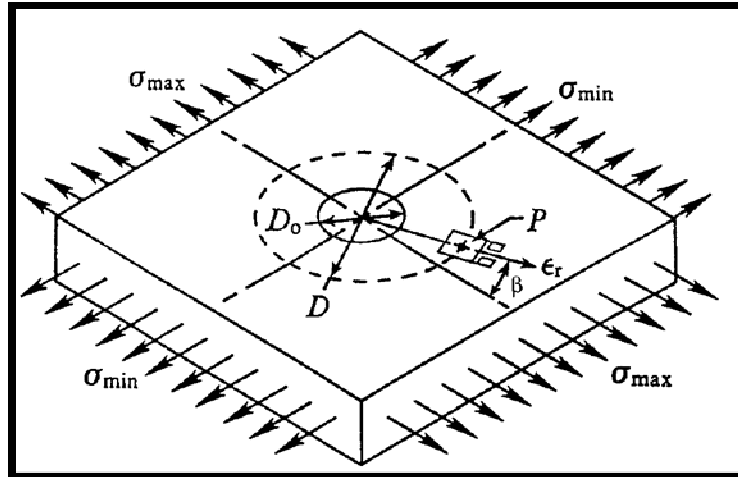


Figura 35. Definiciones de simbología. [10]

Las tensiones relevadas en la superficie se relacionan a los esfuerzos principales por la siguiente relación:

$$\epsilon_r = (\bar{A} + \bar{B} \cos 2\beta) \sigma_{max} + (\bar{A} - \bar{B} \cos 2\beta) \sigma_{min} \quad (\text{Ec.2})$$

Donde:

ϵ_r = Mediciones de las tensiones relevadas medidas por las galgas extensiométricas alineadas radialmente y centradas en P.

\bar{A}, \bar{B} = Constantes de calibración.

σ_{max} = Esfuerzos principales máximos presentes en la ubicación del agujero antes de ser taladrado.

σ_{min} = Esfuerzos principales mínimos presentes en la ubicación del agujero antes de ser taladrado.

β = Angulo medido en sentido contrario a las manecillas de reloj desde la dirección de la galga 1 hacia la dirección de σ_{max} .

D = Diámetro del círculo de la galga.

D_o = Diámetro del agujero taladrado.

- a) Las tensiones relevadas $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ son medidas por tres galgas extensiométricas numeradas como corresponde, tal como se muestra en la Figura 33. Las mediciones de estas tensiones relevadas proveen información suficiente para calcular los esfuerzos principales máximos y mínimos así como su orientación β .

Durante la realización de la prueba será necesario observar algunos detalles y recomendaciones para garantizar la correcta aplicación de la prueba; estos detalles son los siguientes.

- a) Taladrado. [10]
- b) Para protección de las galgas se deberá dejar un margen de al menos 0.012" entre las fronteras del agujero y los extremos de las galgas. La necesidad de este margen limita el diámetro máximo permisible D_o del agujero taladrado. El diámetro mínimo recomendado es de 60% del máximo permisible. [10]
- c) El centro del agujero taladrado deberá coincidir con el centro de la galga extensiométrica con una tolerancia de $\pm 0.004D$ o ± 0.001 ", lo que sea mayor. [10]
- d) Seleccionar la operación de taladrado y la herramienta adecuada para reducir o eliminar la introducción de deformaciones plásticas en las áreas que rodean el agujero taladrado. [10]
 - a. Existen diversas técnicas para realizar el taladrado del agujero de manera satisfactoria para esta prueba.

- i. Maquinado de chorro abrasivo, un chorro de aire con partículas de abrasivos son disparadas a la pieza de trabajo. [10]
 - ii. Taladrado a alta velocidad (hasta 400,000 rpm) con una turbina de aire. [10]
 - iii. Taladrado con herramientas de carburos. [10]
- e) La operación de taladrado deberá realizarse a temperatura constante. [10]
1. Se deberá asegurar de obtener lecturas de cero en cada galga extensiométrica al inicio de la operación de taladrado. [10]
 2. Es necesario calcular la siguiente combinación de tensiones para cada medición $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$. [10]

$$\begin{aligned}
 p &= (\epsilon_3 + \epsilon_1) / 2 \\
 q &= (\epsilon_3 - \epsilon_1) / 2 \quad (\text{Ec.3}) \\
 t &= (\epsilon_3 + \epsilon_1 - 2\epsilon_2) / 2
 \end{aligned}$$

- a) Cuando se trabaja con probetas de espesores “grandes” la prueba deberá realizarse para asegurarse que los esfuerzos residuales son uniformes en toda la profundidad del agujero. En este caso se deberá identificar el conjunto de grandes combinaciones de tensiones q o t . Se expresan cada conjunto de combinaciones de tensiones p y el mayor entre q y t como un porcentaje de sus valores cuando la profundidad del agujero es igual a $0.4D$. se grafican estos porcentajes de tensiones contra (profundidad del agujero/ D). Estas gráficas deberán arrojar puntos de información muy similares a las curvas mostradas en la Figura 36. Los puntos de información que se retiran

de las curvas de la Figura 36 por más de $\pm 3\%$ indican que hay esfuerzos sustanciales no uniformes a través del material o que existe un error en las mediciones. En cualquiera de los dos casos la información medida no es aceptable para el cálculo de esfuerzos residuales utilizando este procedimiento. [10]

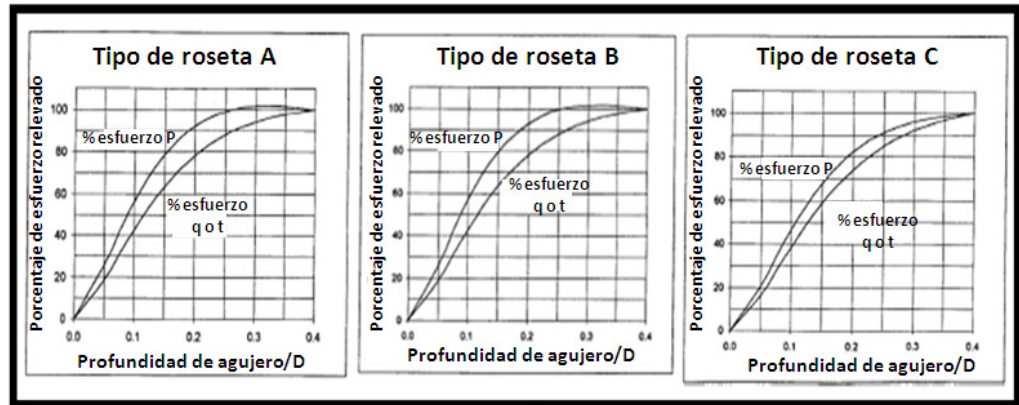


Figura 36. Graficas típicas de las tensiones relevadas contra la profundidad del agujero. [10]

Al momento de realizar el cálculo de esfuerzos es importante seguir las siguientes indicaciones.

1. Para el caso de especímenes de espesores delgados, solo se necesitan un conjunto de mediciones de $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ para calcular la magnitud y dirección de los esfuerzos principales. Estos esfuerzos se asumen uniformes a lo largo de todo el espesor del espécimen. [10]
2. Para el caso de especímenes de grandes espesores, todas las combinaciones de mediciones de $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ se utilizarán para calcular la magnitud y dirección de los esfuerzos principales. Estos esfuerzos son asumidos como uniformes a lo largo de la profundidad del agujero. [10]

Este método entra dentro de los considerados como técnicas de relajación de tensiones, está basada en producir la relajación de las tensiones elásticas al quitar una parte de la pieza sometida a tensiones. Para la aplicación de esta prueba las tensiones deben ser uniformes en el espesor de la placa y no pueden exceder la tensión de fluencia. [11]

La limitante principal de este método es que permite medir los esfuerzos residuales solo en los primeros milímetros del espesor del material. [11]

Otra de las limitantes de este método es que si bien la aplicación es sencilla, es necesario contar con el equipo adecuado para registrar y medir los esfuerzos liberados durante el proceso para poder así determinar los esfuerzos residuales.

Existen como este, otros métodos para la medición de esfuerzos residuales; sin embargo, es este uno de los más utilizados en la industria para realizar la medición de estos esfuerzos.

3.3 Medición de esfuerzos residuales en campo.

S.R. Bhide presenta un caso real donde se realizaron mediciones de esfuerzos residuales en placas unidas por soldadura utilizando los procesos de SAW, GMAW y FSW. En este caso real se utilizó el método de barrenado de Mathar, también conocido como método del agujero ciego para medir los esfuerzos residuales longitudinales que se presentaban en las placas al ser unidas por soldadura. Para esta prueba las probetas fueron fabricadas de un acero alta resistencia y baja aleación HSLA – 65. La medición de esfuerzos residuales se llevó a cabo mediante el uso de galgas extensiométricas localizadas en cuarenta puntos diferentes de las probetas.

Como se comentó en capítulos anteriores, los tipos de distorsión por soldadura para este tipo de probetas son seis, divididas en dos grupos. La distorsión en un plano presenta distorsión transversal, distorsión longitudinal y

distorsión rotacional. Para la distorsión fuera de plano existe la distorsión longitudinal, distorsión angular y distorsión por pandeo. La distorsión por pandeo es una de las que más comúnmente se presentan. [2]

La distorsión por pandeo debido a la soldadura se da cuando los esfuerzos residuales exceden los esfuerzos críticos del material. La distorsión por pandeo es provocada principalmente por la componente longitudinal de los esfuerzos residuales ya que como se vió anteriormente, los esfuerzos residuales longitudinales son de tensión en las áreas cercanas a la unión soldada y de compresión en las áreas más alejadas. [2]

Para realizar esta medición de esfuerzos residuales se aplicó soldadura en tres probetas consistentes de dos placas de 28" x 9" en unión a tope para formar una placa de 18" de ancho, ambas placas de 1/4" de espesor. La Figura 37 muestra la geometría de las probetas y la ubicación de las galgas utilizadas para medir los esfuerzos residuales.

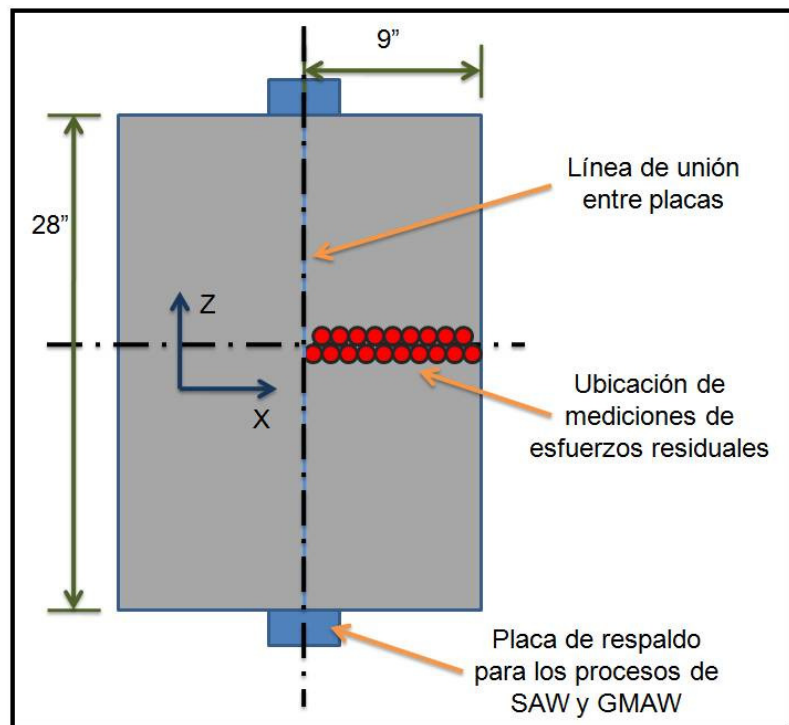


Figura 37. Geometría de la probeta [2]

Para la aplicación de la soldadura se definieron inicialmente los parámetros y condiciones a considerar. Para el proceso de SAW se aplicaron dos pases de soldadura en la probeta, para las probetas con el proceso de GMAW y FSW se aplico un solo pase de soldadura. Durante los procesos de SAW y GMAW las placas estaban libres mientras que para el proceso de FSW están estaban sujetas por las orillas. La tabla 2 muestra las condiciones bajo las cuales se llevaron a cabo las pruebas.

Probeta	Proceso	Calor de entrada en KJ/in.	Consumibles
Probeta 1	SAW	Pase 1, 23.3, Pase 2, 28.4	Aporte EM-12K y Flux F7A2
Probeta 2	GMAW	28.6	Aporte MIL-70S-3 diametro de 0.045 pulg
Probeta 3	FSW	35.9	Nada

Tabla 2. Condiciones iniciales de soldaduras. [2]

Las mediciones de los esfuerzos residuales longitudinales fueron obtenidas por ambas superficies de la placa a lo largo del eje central transversal a la dirección de la soldadura. Las mediciones se realizaron por un lado de la línea central de soldadura para los procesos SAW y GMAW y por ambos lados para el proceso FSW.

La Tabla 3 muestra que para el caso 1 con proceso SAW se obtuvieron las siguientes mediciones de esfuerzos residuales.

Mediciones de esfuerzos residuales longitudinales para el caso 1 con proceso SAW			
Lado de arriba de la placa		Lado de abajo de la placa	
Coordenada X desde el centro (mm)	Esfuerzo residual longitudinal medido (MPa)	Coordenada X desde el centro (mm)	Esfuerzo residual longitudinal medido (MPa)
12.5	520.81	12.7	534.88
25	204.48	22.2	51.3
45	39.71	38.1	-156.08
55	46.72	44.5	-176.39
97.5	62.4	60	-188.54
135	113.45	73	-192.29
185	147.51	89	-186.92
-	-	111	-155.13
-	-	127	-152.18
-	-	190	-113.76

Tabla 3. Mediciones obtenidas para la prueba con el proceso SAW. [2]

En la Tabla 3 se observa que por la parte superior de la placa los esfuerzos permanecen en tensión a lo largo de toda la longitud de la placa variando la magnitud de los esfuerzos desde 39.71 Mpa a 45 mm de la unión soldada hasta 520 MPa a 12.5 mm de la unión soldada. [2]

Las mediciones por el lado inferior de la placa dejan ver que aproximadamente después de los 22.2 mm de la unión soldada los esfuerzos residuales cambian de tensión a compresión a lo largo de la superficie de abajo de la placa. La magnitud de los esfuerzos de compresión por debajo de la placa varía desde 192.29 MPa a 73 mm de la unión soldada hasta 113.76 MPa a 190 mm de la unión soldada. [2] En ambos casos alcanzando la magnitud máxima de esfuerzos residuales a tensión a 12.5 mm de la unión soldada que para este caso fue el punto donde se realizó la medición más cercana al cordón de soldadura.

La Tabla 4 muestra que para el caso 2 con proceso GMAW se obtuvieron las siguientes mediciones de esfuerzos residuales.

Mediciones de esfuerzos residuales longitudinales para el caso 2 con proceso GMAW			
Lado de arriba de la placa		Lado de abajo de la placa	
Coordenada X desde el centro (mm)	Esfuerzo residual longitudinal medido (MPa)	Coordenada X desde el centro (mm)	Esfuerzo residual longitudinal medido (MPa)
10	539.88	10	597
22	28.37	22.5	44.03
45	70.75	35	-84.08
65	-8.79	47.5	-79.73
95	-25.38	65	-77.73
135	-45.1	95	-102.417
165	0	135	-147.52
190	-37.02	180	-130

Tabla 4. Mediciones obtenidas para la prueba con el proceso GMAW. [2]

La Tabla 4 muestra que para esta segunda probeta se observó que por ambos lados de la probeta al igual que con el proceso SAW los valores máximos de los esfuerzos residuales en tensión se dan en la medición más cercana a la unión soldada y esta decrece considerablemente desde el centro hasta aproximadamente 22 mm. Se observa que para la parte superior de la placa los esfuerzos cambian de tensión a compresión a partir de aproximadamente 45 mm y que para el lado inferior estos cambian de tensión a compresión a partir de aproximadamente 22.5 mm. [2]

La Tabla 5 muestra que para el caso 3 con proceso FSW se obtuvieron las siguientes mediciones de esfuerzos residuales. [2]

Mediciones de esfuerzos residuales longitudinales para el caso 3 con proceso FSW			
Lado de arriba de la placa		Lado de abajo de la placa	
Coordenada X desde el centro (mm)	Esfuerzo residual longitudinal medido (MPa)	Coordenada X desde el centro (mm)	Esfuerzo residual longitudinal medido (MPa)
-185	-88.03	-177	-3.3
-165	-51.08	-115	36.72
-140	-91.07	-95	85.1
-110	-73.76	-75	17.03
-85	-103.52	-44	41.9
-65	-34.52	-32	22.7
-35	5.244	-27.5	139.37
0	472.14	-10	566.41
22.5	170.54	10	478.04
50	-26.13	22.5	238
60	-52.66	32.5	59.41
80	-11.72	57.5	3.3
125	-117.14	78	6.36
140	-118.32	95	0.67
165	-142.1	115	19.38
190	-153.4	145	-3.3
--	-	198	3.94

Tabla 5. Mediciones obtenidas para la prueba con el proceso FSW. [2]

La Tabla 5 muestra que en esta probeta se observó que para la parte superior de la probeta los esfuerzos residuales en tensión se incrementaban desde el cordón de soldadura hacia los extremos cambiando de tensión a compresión a partir de aproximadamente -35 mm y 50 mm alcanzando su valor máximo a la tensión en la misma soldadura y su valor máximo a compresión a los 190 mm del cordón de soldadura. Para la parte inferior de la soldadura los esfuerzos residuales son en su mayor parte a la tensión alcanzando su valor máximo a la tensión a -10 mm del cordón de soldadura y su valor máximo a compresión a -177 mm y 145 mm del cordón de soldadura siendo para ambas distancias de una magnitud de 3.3 Mpa. [2]

En conclusión, con esta experimentación entre los procesos de SAW, GMAW y FSW se puede observar que para diferentes condiciones de fijado de las placas la magnitud de la distorsión variaba significativamente en los procesos de SAW y GMAW mientras que el proceso de FSW mostraba más altos valores de esfuerzos a compresión en las orillas de la placa indicando que este proceso es más susceptible a sufrir distorsión por pandeo. En placas de espesores mayores es de esperarse que exista mayor distorsión por pandeo si

se utiliza el proceso FSW a que si se utilizara SAW o GMAW. Las mediciones de los esfuerzos residuales longitudinales muestran también una relación entre estos y el calor de entrada aplicado durante los procesos. [2]

4.

Distorsión en láminas delgadas

4.1 Soldando láminas de bajos espesores.

Para los fabricantes de productos a base de láminas de acero resulta una batalla incansable entre productividad e inversión en equipo para lidiar con problemas como la distorsión, zonas afectadas por el calor excesivas y daños en los materiales por exceso de calor. [12]

El soldar placas o tuberías de acero y láminas delgadas no es para nada lo mismo. Incluso para las empresas manufactureras que se dedican a la fabricación de ensambles estructurales soldados y que se rigen bajo el código estructural ANSI/AWS D1.1/D1.1 M:2004 *Structural welding Code steel* al momento de incorporar laminas de acero de un espesor menor a 1/8 de pulgadas a sus ensambles, estos tienen que cambiar de código de referencia para ahora regirse por el código ANSI/AWS D1.3 – 89 *Structural Welding code Sheet Steel*. [6]

El código ANSI/AWS D1.3 – 89 *Structural Welding code Sheet Steel*. Es una especificación que tiene como alcance la soldadura de láminas, tiras y miembros formados en frío de un espesor de 0.180 pulgas o menos. [13]

Tan es diferente el soldar placa o tubos y soldar láminas de acero, que el código ANSI/AWS D1.3 – 89 *Structural Welding code Sheet Steel* dicta que cualquier soldador que este calificado exitosamente bajo el código ANSI/AWS D1.1/D1.1 M:2004 *Structural welding Code steel* o cualquier otro código no estará calificado para soldar laminas de metal de espesores delgados. [13]

4.2 Recomendaciones generales al soldar láminas delgadas.

Cuando se está soldando laminas metálicas delgadas el objetivo principal es evitar los defectos como los son la distorsión, el daño al material por exceso de calor, zonas afectadas por el calor excesivas mientras que también es de interés mantener las propiedades necesarias para la aplicación. Los procesos de soldadura que brindan un mejor control sobre el calentamiento son el GMAW en corto circuito, GMAW en pulsos, GTAW y GTAW en pulsos. [12]

Al estar utilizando el proceso de GMAW con láminas delgadas es importante seleccionar el electrodo con el diámetro más pequeño que se tenga disponible. Los electrodos más delgados requieren menos calor para fundirse lo que a su vez concentra menos calor en el metal base. Utilizar un electrodo de menor diámetro también provee mayor control sobre la soldadura y brinda también mejores oportunidades de recuperar el metal cuando se cometen errores. Es por esto que profesionales de la industria de reparación automotriz recomiendan utilizar electrodos de 0.023" para láminas calibre 18 (0.0478"). Para mayores tasas de depósito se puede utilizar electrodos de 0.030". [12]

Durante la aplicación de la soldadura es importante no dar movimiento a la pistola para evitar atravesar la placa o generar mucha distorsión ya que al dar movimiento a la pistola se mantiene más tiempo concentrado el arco lo que produce más concentración de calor en los metales. Se recomienda siempre moverse en línea recta y utilizar la velocidad de alambre más alta que permita mantener un buen perfil de la soldadura. [12]

Otra causa principal de distorsión en láminas delgadas es la aplicación de calor mal distribuido por lo que se recomienda aplicar la soldadura de manera distribuida a lo largo de la unión así como el uso de las técnicas de soldadura hacia atrás y la escalonada.

Se recomienda también el uso de barras de respaldo las cuales pueden ser de acero, cobre o aluminio con la finalidad de disipar el calor generado durante la soldadura. [12]

Se recomienda reconsiderar las uniones al soldar laminas delgadas, siempre será más sencillo soldar una unión en traslape que una unión a tope ya que en la unión a traslape se tiene mayor cantidad de metal para disipar el calor. [12]

4.3 Modos de transferencia al soldar laminas.

El progreso en pulsos y otras formas de control de arco en el proceso de GMAW en conjunto con las mejoras en los sistemas automáticos y robóticos han servido de soporte para mantener al proceso GMAW como el proceso dominante para la unión de láminas de metal de pequeños espesores. Esto debido a que por su bajo calor de entrada se pueden lograr buena penetración sin llegar a atravesar el material por exceso de calor. [14]

Los cinco modos de transferencia que están disponibles por el proceso de GMAW son: de corto circuito, globular, spray axial, espray pulsado y corto circuito controlado. [14]

Los modos de transferencia globular y spray axial son generalmente asociados con metales de espesores mayores. Estos modos utilizan arco de alta energía y están limitados a posiciones de soldadura plana y horizontal. [14]

El modo de pulso de espray pulsado, corto circuito controlado y corto circuito tradicional son procesos de relativa baja energía y son más efectivos en la unión de laminad de pequeños espesores. Estos modos de transferencia son preferidos para soldar láminas menores a 1/8" de espesor y pueden ser utilizados en todas las posiciones. [14]

La transferencia por spray es precisamente lo que implica su nombre: un atomizado de gotas diminutas de metal fundido depositado en la unión. La transferencia por spray pulsado es una variante de la transferencia por spray, donde la fuente de poder pulsa rápidamente por un período fijo de tiempo. [14]

4.3.1 Nuevos modos de transferencia del metal de aporte.

Un buen control del calor de entrada en el modo de transferencia de spray pulsado es clave para el aseguramiento de soldaduras sanas y de alta calidad. [14]

El beneficio de la energía pulsada es que produce las características de fusión deseadas mientras se reduce de manera considerable la cantidad de calor de entrada. Esto en comparación con el modo de transferencia de spray axial y los otros procesos. [14]

El promedio más bajo de corrientes alcanzadas por el proceso de GMAW con modo de transferencia de spray pulsado lo hace ideal para la soldadura de láminas de acero e incluso de aluminio. [14]

4.3.2 Transferencia por corto circuito controlado.

El modo de transferencia por corto circuito controlado puede manejar de manera dinámica las tensiones superficiales del charco de soldadura para depositar soldaduras que requieren bajo calor de entrada sin sobrecalentar o quemar la pieza de trabajo mientras minimiza la distorsión en las láminas soldadas. [14]

La Figura 38 muestra un esquemático de cómo se clasifican los modos de transferencia del metal de aporte en el proceso GMAW de acuerdo a las características del material que se va a unir por soldadura.

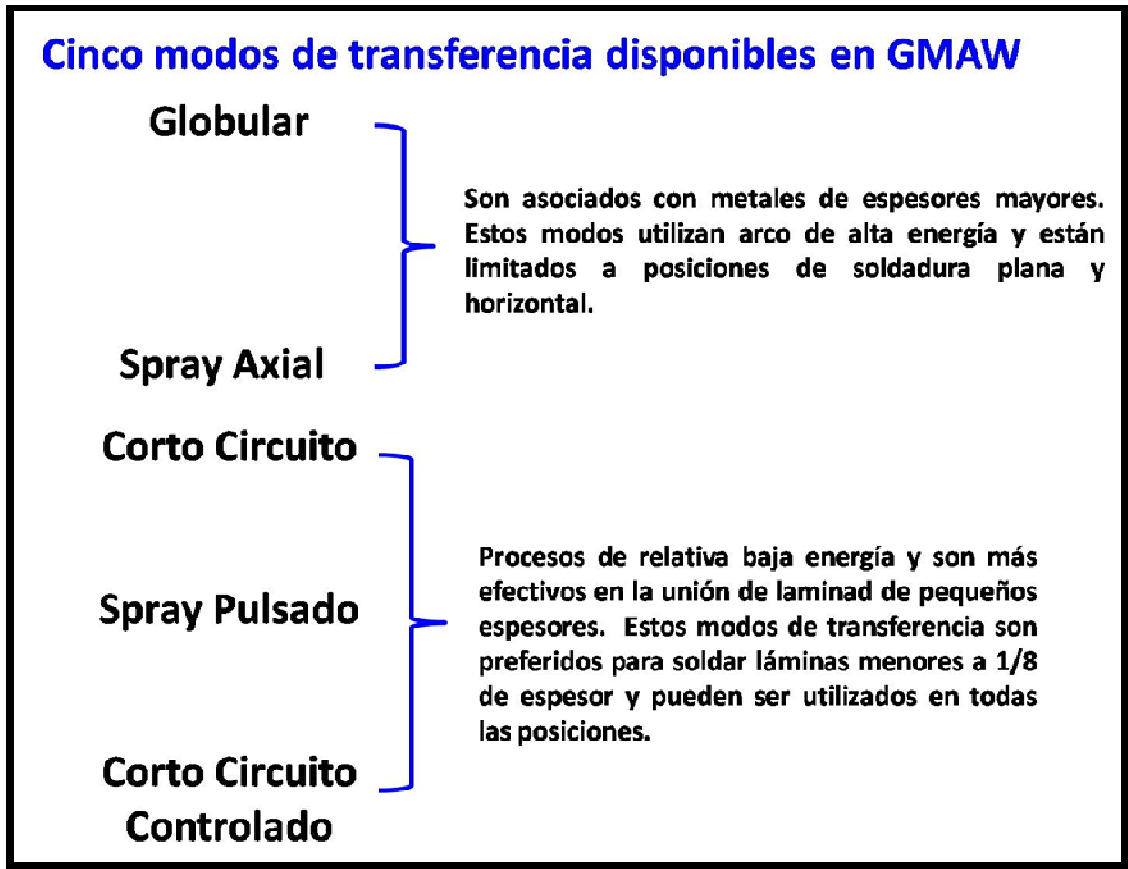


Figura 38. Modos de transferencia para soldadura de placa y lamina.

4.3.3 Gases de protección.

Todos los modos de transferencia tradicionales son posibles con gases de protección con mezcla de gas de argón y dióxido de carbono. [14]

El modo de transferencia de spray axial requiere porcentajes de CO₂ menores al 18 por ciento. Conforme el porcentaje de CO₂ se incrementa, también lo hace el calor de entrada, y consecuentemente el riesgo de atravesar el material por exceso de calor. [14]

Las mezclas de Ar-CO₂ con un porcentaje de hasta el 18% de CO₂ propician la transferencia de spray pulsado. La transferencia por corto circuito es un modo de transferencia de bajo calor de entrada que puede utilizar combinaciones de Ar-CO₂ con 20% o más de CO₂. El uso de Ar – O₂ ha sido asociado con la

soldadura de materiales de espesores delgados a altas velocidades de avance. [14]

4.4 incremento en la productividad durante la aplicación de soldadura.

La idea de velocidad de avance es importante para la productividad en la soldadura de láminas de metal de pequeños espesores. Típicamente entre más grande sea la longitud del arco menor será la velocidad de avance. Grandes velocidades de avance requieren de longitudes de arco más cortas. [14]

De manera adicional la velocidad de avance y el calor de entrada están relacionados. Entre más rápida sea la velocidad de avance más bajo será el calor de entrada. La ecuación utilizada para determinar el calor de entrada en Joules/pulgada es:

$$\frac{Volts \times Amps \times 60}{V_{avance}(\text{pulgadas / min}) \times 1000} \quad (\text{Ec.4})$$

El calor de entrada es un factor clave a considerar en la reducción de la distorsión. Las combinaciones de velocidades de avance altas con los modos de transferencia de los metales de aporte que resulten en menores calores de entrada proveen un método importante para reducir la distorsión e incrementar la productividad. [14]

4.5 Balance entre calor y velocidad

El secreto para soldar láminas de metal de pequeños espesores es lograr un buen balance entre el calor de entrada y la velocidad de avance de tal manera que el proceso arroje soldaduras sanas sin el riesgo de atravesar el material. La lámina es menos bondadosa que las placas de espesores más grandes y

requiere de márgenes de error más pequeños así como tolerancias más cerradas. [14]

Las soldaduras en laminas tienden a terminar más grandes de lo necesario, esto para lograr una unión suficientemente fuerte. De todas maneras es posible lograr soldaduras con menos metal base desperdiciado si se tiene algo de conocimiento y experiencia básica en el tema. [14]

Los soldadores que se mueven con demasiada velocidad o que apuntan el electrodo de manera errática a la unión generan un defecto de soldadura conocido comúnmente como soldadura fría. La soldadura fría ocurre cuando el metal de aporte fundido se solidifica en la pieza de trabajo sin tenerla penetración adecuada. A primera vista una soldadura fría aparenta ser una soldadura sana mas sin embargo cuando se aplica una fuerza a la unión soldada esta se rompe con relativa facilidad. [14]

Una buena unión y un método de sujeción adecuado son necesarios pero cuando una unión pobre es inevitable es necesario seguir algunos pasos que pueden ayudar a compensar. Estos pasos incluyen:

- Reducción de la velocidad de alambre.
- Apuntar el electrodo más lejos en dirección al avance.
- Utilizar un leve movimiento en forma de ondas.

4.6 Diseño de juntas.

El tipo de unión más comúnmente utilizado en la soldadura de láminas es la unión en traslape, ese tipo de unión ayuda a que el metal base no se atraviese por exceso de calor ya que al traslapar las placas el espesor se aumenta. [14]

Las uniones a tope generalmente se descartan para la soldadura de lámina ya que es muy sencillo que el arco atraviese el material, además que resulta muy complicado lograr una buena preparación de la unión. [14]

En las uniones de traslape es muy importante sostener el ensamble lo mejor unido posible cerrando por completo los posibles huecos, ya que estos pueden provocar soldaduras no sanas. [14]

Es necesario asegurarse que las uniones en traslape estén libres de humedad, pintura o contaminantes ya que estas son muy susceptibles a la porosidad debido a gases atrapados generando después agrietamientos en la soldadura. [14]

Si se han de soldar materiales de espesores diferentes se recomienda soldar el material de menor espesor sobre el de mayor espesor. [14]

La manera en que el electrodo es colocado en la unión a soldar también es importante. La soldadura puede no fusionarse en la placa inferior generando soldadura fría si la punta del electrodo está demasiado inclinada hacia la placa superior. De manera inversa si la punta del electrodo está demasiado alejada a la placa superior la soldadura puede no fusionar de manera correcta con la placa superior e incluso puede quemar y atravesar la placa inferior. [14]

4.7 Distorsión por pandeo en láminas soldadas.

La manufactura de placas, paneles y carcasas formadas de láminas de metal vienen siempre acompañadas de distorsión por pandeo en el área de aplicación de soldadura. Si bien es cierto que todas las modalidades de distorsión están presentes en la soldadura de láminas delgadas, la distorsión por pandeo es la que predomina sobre las otras modalidades de distorsión a la hora de soldar láminas de pequeños espesores. [15]

La distorsión por pandeo además de ser la más común en la unión de láminas por soldadura, es también la más da problemas a la hora de soldar ensambles con laminas. [15]

La distorsión por pandeo afecta el desempeño de estructuras de muchas maneras; impiden el acoplamiento entre piezas, impide cumplir con los diseños estéticos de los ensambles, en algunos casos vuelven imposible la eliminación de espacios entre piezas soldadas. Esto genera elevación de costos y pérdida de tiempo en re trabajos y remoción de piezas. [15]

Desde el punto de vista de confiabilidad, la distorsión por pandeo puede disminuir la rigidez de los componentes soldados así como causar variaciones en la calidad final de los productos. [15]

4.8 Patrones típicos de distorsión por pandeo en elementos estructurales de pared delgada.

En la fabricación con láminas de metal los elementos estructurales son en su mayoría diseñados y ensamblados utilizando soldadura por fusión. El pandeo inducido por soldadura difiere de la distorsión por dobles por su alta deflexión fuera de plano y sus patrones más estables. Los patrones de pandeo dependen mucho más en la geometría de los elementos, los tipos de uniones soldadas y los espesores de la lámina. [15]

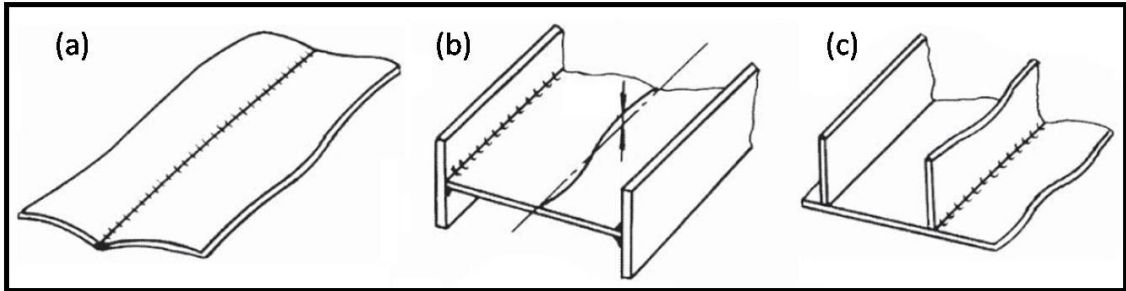


Figura 39. Patrones de distorsión por pandeo en placas y paneles reforzados.

[15]

La Figura 39 muestra algunos patrones de pandeo típicos en placas y paneles reforzados generados por soldaduras longitudinales.

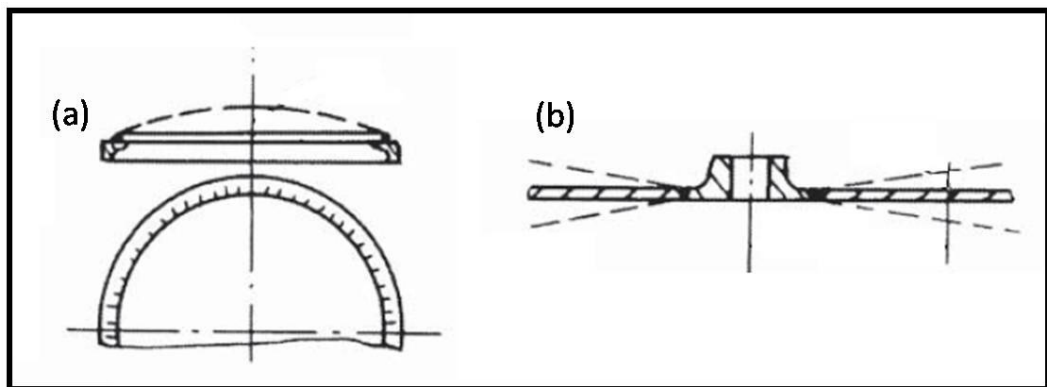


Figura 40. Patrones de distorsión por pandeo generados por soldaduras circulares [15]

La Figura 40 muestra algunos patrones de pandeo típicos en placas y paneles reforzados generados por soldaduras circulares.

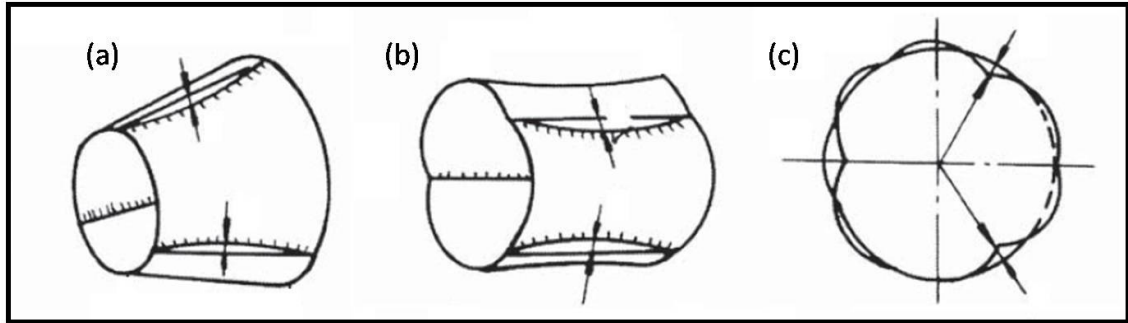


Figura 41. Patrones de distorsión por pandeo en carcasas generados por soldaduras longitudinales. [15]

La Figura 41 muestra algunos patrones típicos de pandeo en carcasas por soldaduras longitudinales.

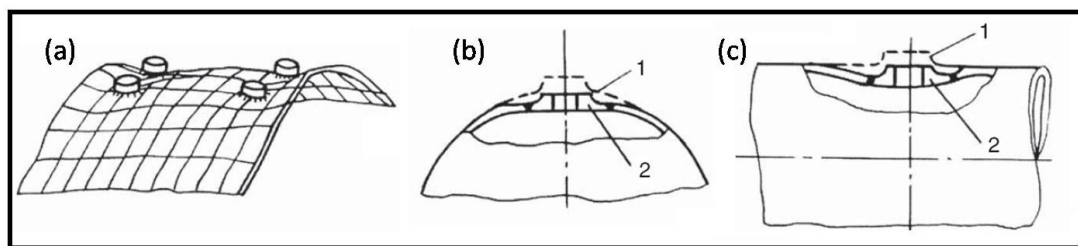


Figura 42. Patrones de distorsión por pandeo en carcasas generados por soldaduras circulares. [15]

La Figura 42 muestra algunos patrones típicos de pandeo en carcasas por soldaduras circulares.

Al hacer un comparativo de las Figuras 39, 40, 41 y 42 se aprecia claramente que las distorsiones generadas por soldaduras longitudinales en placas, paneles reforzados y carcasas están dominadas principalmente por esfuerzos de compresión producidas en áreas alejadas del cordón de soldadura. [15]

4.9 Métodos para remover, mitigar y prevenir la distorsión por pandeo.

Se han desarrollado exitosamente muchos métodos efectivos para remover, mitigar y prevenir la distorsión por pandeo previo, durante y posterior a la aplicación de soldadura. [15]

En la fabricación de componentes con láminas delgadas la distorsión excesiva por pandeo puede ser prevenida por un arreglo adecuado de medidas tecnológicas durante el ensamble y soldadura así como también al seleccionar procesos de soldadura racional. [15]

4.9.1 Clasificación de métodos y medidas tecnológicas.

La etapa más importante en la eliminación de distorsión por pandeo es el diseño racional de elementos estructurales soldados. Es esencial que los diseñadores se adhieran al concepto de que el pandeo no es inevitable y que el problema puede ser resuelto trabajando en conjunto con ingenieros tecnológicos. El pandeo puede ser controlado por medio de una variedad de métodos y medidas tecnológicas para remover, mitigar y prevenir esta modalidad de distorsión. [15]

La Tabla 6 ilustra las etapas y métodos principales de control de distorsión por pandeo. En la etapa de diseño, una selección racional de la geometría, de los espesores del material y diseño de las uniones es esencial. En la etapa de fabricación, medidas tecnológicas y técnicas para eliminar el pandeo pueden clasificarse de la siguiente manera:

1. Métodos aplicados previos a la aplicación de soldadura.
2. Métodos adoptados durante la operación de soldadura.
3. Métodos aplicados posteriores a la aplicación de soldadura.

Etapas	Métodos adoptados
Diseño	Selección racional de geometría y espesores Selección racional de tipos de uniones de soldadura Selección racional de técnicas de soldadura
Fabricación, previo a la soldadura	Pre deformado Pre tensionado (mecánicamente, térmicamente) Ensamble en dispositivos rígidos
Fabricación, durante la soldadura	Selección de procesos de soldadura con bajo calor de entrada Enfriamiento forzado Selección de secuencia de soldadura Tensionado térmico
Fabricación, posterior a la soldadura	Remoción o corrección utilizando medios mecánicos (martilleo, etc.) Tratamientos térmicos

Tabla 6. Etapas y métodos principales en el control de distorsión por pandeo.

[15]

5.

Simulación por Computadora

5.1 Simulación por computadora de la aplicación de soldadura.

La soldadura es por lo general parte esencial de las estructuras ingenieriles. Los esfuerzos residuales en las regiones soldadas debidas a procesos térmicos no lineales durante la aplicación de soldadura pueden tener efectos perjudiciales tales como agrietamientos por esfuerzos, agrietamientos por hidrogeno inducido y reducción de la resistencia a la fatiga. Es por esto que resulta pertinente simular los procesos de soldadura para predecir el comportamiento de las estructuras soldadas. [16]

La simulación numérica de los procesos de soldadura puede llevarse acabo de dos posibles maneras. [16]

La primera, la complejidad del fluido y la termodinámica local para el charco de soldadura son modelados enfocándose en el charco de soldadura y en la zona afectada por el calor. La conservación de masa, momento y calor junto con el calor latente y condiciones frontera de la tensión superficial son convertidos en ecuaciones para representar fenómenos físicos del charco de soldadura fundido y el comportamiento térmico de la zona afectada por el calor. [16]

La segunda, la aproximación de mecanismos sólidos es adoptada al modelar el comportamiento termo – mecánico de las estructuras soldadas, poniendo atención especial a la fuente de calor. Una gran variedad de modelos

simplificados de fuentes de calor pueden ser utilizados en la simulación de soldadura, la exactitud de los cuales dependen los parámetros teóricos y empíricos que describen el tamaño y forma del charco de soldadura. [16]

Existen disponibles comercialmente una gran variedad de paquetes computacionales diseñados para la simulación de soldadura por análisis de elemento finito. Algunos de estos paquetes computacionales comerciales son los siguientes:

1. SYSWELD
2. ABAQUS
3. PHYSICA
4. SOLVIA
5. ADINAT
6. ADINA
7. WELD PLANNER
8. CODE_ASTER
9. SORPAS
10. VFT
11. VistualArc

5.2 Simulación por computadora de soldadura de láminas delgadas.

Haciendo referencia a la problemática inicial de soldar placas de espesores contrastantes, tenemos que de tratarse de soldar lámina con placas de acero de

mayores espesores una alternativa más para unir las piezas por soldadura es el cambio de procesos. Hasta este momento los análisis se han enfocado al uso de procesos como GMAW, GTAW, FCAW, SAW y FSW. Otra alternativa es el uso de soldadura por resistencia de la cual una de sus variaciones es la conocida como spot welding o soldadura de puntos que es su traducción del inglés.

Un factor muy importante y que ha servido ampliamente como soporte al momento de definir los parámetros a utilizar para llevar a cabo una unión de dos metales por medio de soldadura de puntos es la simulación por computadora, esto debido a que en la actualidad existen una gran cantidad de paquetes de simulación dedicados a este proceso. Uno de los paquetes de simulación de soldadura por puntos más utilizado y que es mencionado en la lista anterior de paquetes comercialmente disponibles es el software Sorpas.

Es posible generar ahorros muy significativos de tiempo y dinero con el uso de software que simule el proceso de soldadura por Resistencia. Sorpas ha sido utilizado para asistir en el diseño de partes y uniones por el proceso de soldadura por resistencia, para determinar cómo se deben definir los parámetros de soldadura, de qué manera los parámetros de soldadura pueden ser optimizados para las diferentes condiciones de producción así como también provee una predicción de cómo resultara la microestructura del material posterior a la soldadura. [17]

Sorpas utiliza la potencia de los microprocesadores modernos en computadoras portátiles y personales para articular las variables que intervienen en la soldadura por resistencia. Lleva acabo esto considerando y calculando todas las variables a través de cuatro modelos completamente acoplados. [17]

El modelo eléctrico, con su distribución de voltaje/corriente y generación de calor. El modelo térmico con su transferencia de calor y distribución de temperatura. [17]

El modelo metalúrgico, con sus propiedades dependientes de la temperatura y características de transformación de fases. [17]

El modelo mecánico, con sus deformaciones, esfuerzos y distribución de tensiones, en las áreas de contacto, electrodos y geometría de las piezas de trabajo. [17]

Cada cálculo o iteración involucran el uso de los 4 modelos tal como se muestra en la imagen de la figura 43.

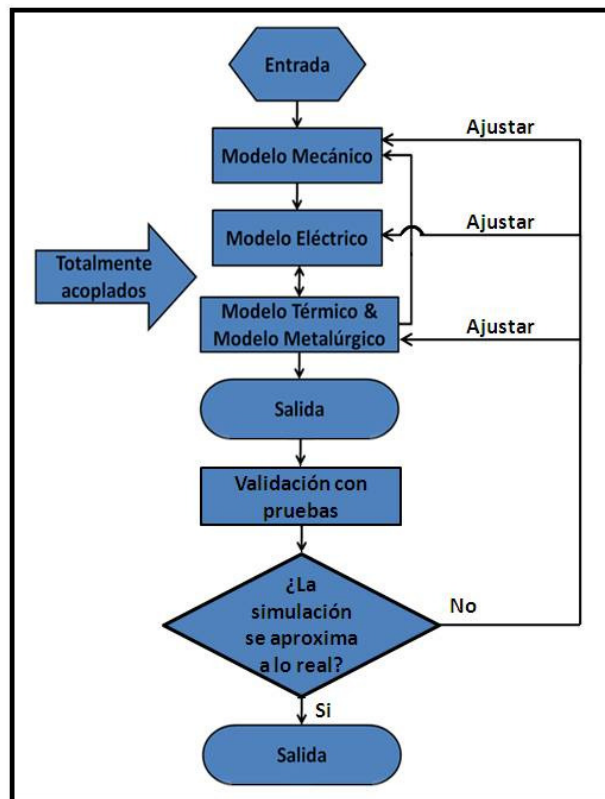


Figura 43. Diagrama de flujo del acoplamiento de los modelos numéricos. [17]

El usuario del paquete introduce a la computadora la geometría de las partes, identificando los materiales a ser soldados, las condiciones de la interface y los electrodos empleados. También se introducen los parámetros de soldadura a ser utilizados tal como la fuerza, tiempo y corriente. El usuario puede solicitar a la computadora que genere los parámetros de soldadura requeridos y de manera manual o automática alterar el nivel de exactitud buscado así como los controles de la simulación completa en general. [17]

El procedimiento de realizar una simulación con SORPAS^{MR} involucra 3 pasos:

1. Preparación de datos.
2. Corrida de simulación.
3. Evaluación de resultados.

Para la preparación de datos los datos de entrada necesarios para realizar una simulación en SORPAS^{MR} son los siguientes:

Geometría y materiales

- Se define la forma y material para los electrodos.
- Se define la geometría y material para las piezas de trabajo.
- Se define el espesor y se selecciona el material para recubrimientos.

Configuración del equipo

- Se define la conexión de los electrodos a la máquina de soldar.
- Se determina la presión a aplicar para soldar.
- Se determina el tiempo y corriente a utilizar.

Controles de Simulación

- Se definen tiempos, pasos, tamaños y se seleccionan los códigos numéricos.

- Se define la optimización automatizada de procedimientos.

Durante la corrida de datos se analiza la información corriendo los cuatro modelos que se muestran en el diagrama de flujo que se presenta en la Figura 43.

Al momento de evaluar los resultados se compara la información obtenida de la simulación con la información obtenida de pruebas reales. Si la aproximación es buena se puede considerar que el modelo es bueno de existir discrepancias se requerirá realizar ajustes a la simulación donde sea necesario.

Al momento de presentar información desplegada por el sistema todas las variables de entrada se mantienen con sus parámetros y terminología comunes. La figura 44. Muestra un ejemplo de uno de los imprimibles que están disponibles el cual provee un resumen de la simulación. [17]

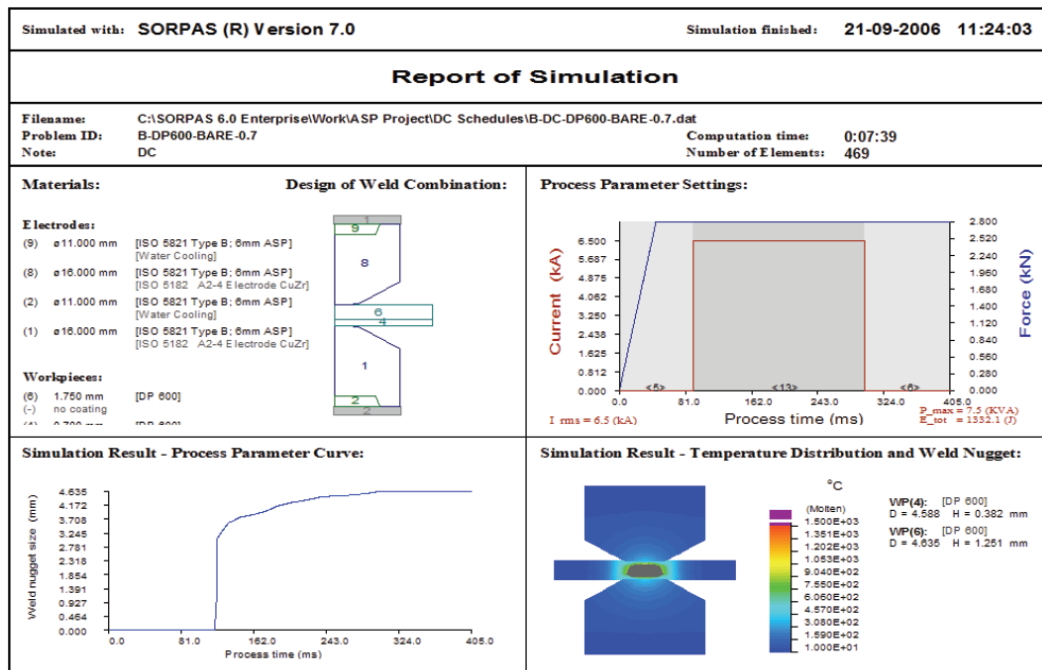


Figura 44. Ejemplo de unos de los reportes de resultados. [17]

En la fase de diseño, las características y limitaciones de varios procesos de unión y materiales son ponderadas y seleccionadas. Es responsabilidad del ingeniero considerar las partes, su diseño y como puedan encajar entre sí. [17]

El mayor uso de Sorpas, de cualquier modo ha probado ser en uso día a día una ayuda para incrementar de manera estable y consistente la producción y la optimización de los parámetros de soldadura. [17]

En general se puede concluir que sin importar el proceso de soldadura a utilizar es conveniente asignar tiempo para llevar a cabo el proceso de simulación por computadora. Independientemente del proceso a utilizar existe de manera comercial paquetes computacionales que se adaptan a los procesos de soldadura, el hecho de invertir tiempo en realizar una simulación y experimentar para realizar los ajustes necesarios resulta conveniente pues se evita posteriormente tiempos perdidos por re – procesamiento de piezas además de que se garantiza una mejor calidad final en los productos que se fabrican.

Es importante también considerar que dado que el proceso de simulación por computadora puede representar una inversión en tiempo considerable resulta de gran importancia el análisis de las piezas a unir y limitar el proceso de simulación para las uniones críticas dentro de un ensamble.

6.

CONCLUSIONES

Con base en el proceso de investigación que se llevó a cabo para esta recopilación bibliográfica acerca del tema de la distorsión generada por la aplicación de soldadura, se puede concluir que efectivamente es este fenómeno uno de los mayores contribuyentes a la generación de defectos dimensionales en la fabricación de ensambles estructurales unidos por soldadura, cualquiera que sea el proceso utilizado. Si bien el grado de distorsión varía con cada proceso de soldadura a utilizarse, ninguno de estos procesos está exento de sufrir distorsión por soldadura.

La distorsión de los ensambles unidos por soldadura depende de muchos factores entre ellos las condiciones geométricas de las piezas a ser unidas. Si se traslada esto a la problemática real que detonó la necesidad de realizar esta recopilación bibliográfica, se observa que al tratar de unir placas de espesores disimiles el problema de distorsión lejos de disminuirse, aumenta. Al analizar los métodos que existen para medir y controlar la distorsión, se observa que efectivamente es posible obtener la magnitud de los esfuerzos residuales que generan las distorsiones; sin embargo, los procedimientos o métodos que existen en la actualidad para controlar, disminuir y remediar la distorsión no son cien por ciento aplicables a todas las uniones o geometrías de los productos a ensamblarse.

En base a la recopilación de métodos de control de la distorsión se realizaron pruebas en ensambles de producción real para verificar si se disminuía o no el grado de distorsión.

La Imagen 4 muestra lo que se realizo para intentar disminuir la cantidad de distorsión por el método de sujeción y calzas referido en la sección 2.6 del capítulo 2 de este documento.



Imagen 4. Métodos de control de distorsión por sujetadores y calzas.

La Imagen 5 muestra otro intento que se realizo para controlar la cantidad de distorsión. En este ensamble se aplico un prensado utilizando un dispositivo hidráulico que aplicaba presión por los cuatro extremos del tubo de manera simultánea.



Imagen 5. Método de control de distorsión por pretensado.

Nuevamente tomando como referencia la información contenida en la sección 2.6 del capítulo 2. Se definió una secuencia de soldadura discontinua y escalonada donde se aplicaron pequeños cordones de soldadura en lugar de un largo y continuo además de que se aplicaban utilizando el método de soldadura

hacia atrás referenciado en la Figura 20 del capítulo 2. La Imagen 6 muestra la secuencia de que definió así como los cordones aplicados en el ensamble real. Dentro de la Imagen 6 las líneas de diferentes colores representan los diferentes cordones de soldadura que se aplicaron y el numero indica la secuencia en que estos cordones se colocaron.

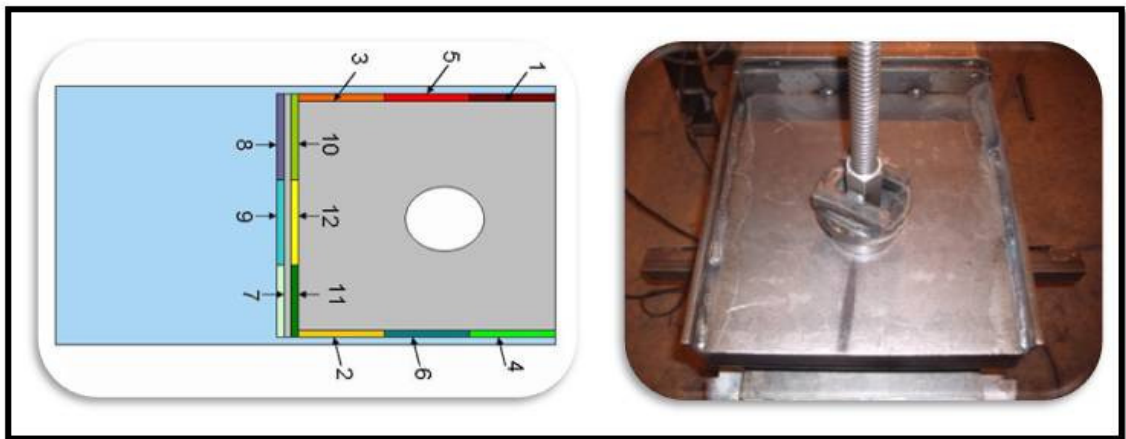


Imagen 6. Método de control de distorsión por soldadura discontinua y hacia atrás.

Si bien el alcance de estas pruebas no era recopilar información para definir de manera precisa la reducción de distorsión, si se logro observar a simple vista una reducción considerable en el grado de distorsión comparado con los ensambles soldados sin ningún método de control de distorsión. La recopilación de información para obtener datos precisos referentes a la disminución de distorsión por estos métodos de control queda como recomendación para trabajos posteriores.

Se observo que mientras los métodos de control probados redujeron el grado de distorsión en los ensambles, no lo evitaron completamente. En respuesta a la ineficiencia de los métodos más comunes para controlar la distorsión por soldadura se tiene la necesidad de recurrir al análisis por elemento finito a través del uso de paquetes computacionales especializados.

El uso de estos paquetes computacionales trae grandes ventajas para las empresas manufactureras, ya que al poder controlar y predecir las cantidades de distorsión a generarse se pueden evitar las pérdidas económicas producto de reparaciones y re procesamientos.

Como recomendaciones para estudios posteriores resulta conveniente ahondar un tanto más en el uso de estos paquetes computacionales especializados y su respectiva validación con pruebas experimentales. Se recomienda esto más que el profundizar en los conceptos involucrados en la distorsión debido a que al final de cuentas el resultado predecir y controlar la distorsión en los ensambles soldados con alto grado de confiabilidad se verá reflejado en mayores utilidades para las empresas manufactureras de ensambles unidos por soldadura.

7.

BIBLIOGRAFIA

- [1]. The PROCEDURE HANDBOOK Of Arc Welding. The Lincoln Electric Inc. Thirteenth edition.
- [2]. Comparison of Buckling Distortion Propensity for SAW, GMAW, and FSW. S.R. Bhide, P. Michaleris, M. Posada, and J DeLoach. The WELDING JOURNAL, Septiembre 2006.
- [3]. Control of longitudinal bending distortion of built – up beams by high – frequency induction heating. J.U. Park, S.C. Park, C.H. Lee.
- [4]. Guía de soldadura para el técnico profesional, Galvery Marlow, Editorial LIMUSA 2007.
- [5]. www.aws.org/w/a
- [6]. ANSI/AWS D1.1/D1.1 M:2004 Structural welding Code steel.
- [7]. Welding metallurgy – Sindo Kou Second Edition.
- [8]. Determinación de esfuerzos residuales en la soldadura GMAW de planchas de 6mm de espesor de acero ASTM A-131-82-B. Carlos Eduardo Matus Parra, Armada de Chile.
- [9]. Tensiones Residuales en la Soldadura. Métodos para su Atenuación. Jorge García Jacobino.

[10]. Estándar Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole – Drilling Strain – Gage Method. ASTM E 837 – 01. Noviembre 2001.

[11]. EVALUACION DE TENSIONES RESIDUALES EN SOLDADURA EN SOLDADURA DE ALUMINIO AA6061 – T6 OBTENIDAS POR EL METODO DE FRICCION – AGITACION (FSW). Pérez, C.R., Ortiz Albuixech, M., Moglioni, A., de Veida, L.A. Inst. de Tecnología, Prof. Jorge A. Sabato. Argentina, SIMPOSIO MATERIA 2003.

[12]. Successfully Welding Sheet Metal with GMAW and GTAW. Knowledge & Technology Articles, Miller.

[13]. ANSI/AWS D1.3 – 89 Structural Welding code Sheet Steel.

[14]. Sheet metal Welding, Achieve new levels of reliability and productivity. Lipnevicius Geoff, METALFORMING MAGAZINE. Septiembre 2006.

[15]. Processes and Mechanisms of Welding Residual Stress and Distortion. Z. Feng, 2005.

[16]. State of the Art Review – Weld Simulation Using Finite Element Methods. Yaghi Anas, Becker Adib. University of Nottingham, UK. Noviembre 2004.

[17]. Saving Time and Money with Resistance Welding Simulation Software. N. Scotchmer, K.R. Chan. Huys Welding strategies, Weston, ON, Canada.

8.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ensamble formado de placas de espesores contrastantes.

Figura 2. Las líneas rojas representan el efecto de la distorsión por soldadura en las placas de menor espesor.

Figura 3. Las líneas rojas representan el efecto de desalineación producto de la distorsión generada por la soldadura.

Figura 4. Comportamientos de las propiedades del acero en función de la temperatura.

Figura 5. Muestra las variantes de distorsión en un plano.

Figura 6. Muestra las variantes de distorsión fuera de plano.

Figura 7. Esquemático de una viga formada.

Figura 8. Sección transversal de una viga formada y los elementos que intervienen en el momento de soldadura.

Figura 9. Momento de soldadura en una viga formada.

Figura 10. Modos de distorsión en uniones a tope.

Figura 11. Modalidades de distorsión por pandeo.

Figura 12. Desalineamiento en unión en T y en ranura en V.

Figura 13. Unión de ranura en V controlada por sujetadores y calzas.

Figura 14. Unión controlada por sistema de enfriamiento.

Figura 15. Unión con método de pretensado.

Figura 16. Unión en T en un lado y en ambos lados.

Figura 17. Unión de ranura en V sencillo y doble.

Figura 18. Placas unidas en T con soldadura escalonada o discontinua.

Figura 19. Unión en T modificada.

Figura 20. Unión con soldadura hacia atrás.

- Figura 21.** Control de espaciamento de una unión con una calza.
- Figura 22.** Sección transversal de una viga formada y los elementos que intervienen en el momento de soldadura y calor inducido.
- Figura 23.** Agrupación de métodos de control de distorsión.
- Figura 24.** Arreglo de barras de acero.
- Figura 25.** Calor aplicado a barra de acero central.
- Figura 26.** Barra de acero central durante su enfriamiento.
- Figura 27.** Placas de acero unidas por un cordón de soldadura.
- Figura 28.** Aplicación de soldadura a lo largo de una placa.
- Figura 29.** Sección A – A.
- Figura 30.** Sección B – B.
- Figura 31.** Sección C – C.
- Figura 32.** Sección D – D.
- Figura 33.** Configuraciones de galgas extensiométricas.
- Figura 34.** Diagrama esquemático de una galga extensiométrica típica.
- Figura 35.** Definiciones de simbología.
- Figura 36.** Gráficas típicas de las tensiones relevadas contra la profundidad del agujero.
- Figura 37.** Geometría de la probeta.
- Figura 38.** Modos de transferencia para soldadura de placa y lamina.
- Figura 39.** Patrones de distorsión por pandeo en placas y paneles reforzados.
- Figura 40.** Patrones de distorsión por pandeo generados por soldaduras circulares.
- Figura 41.** Patrones de distorsión por pandeo en carcasas generados por soldaduras longitudinales.
- Figura 42.** Patrones de distorsión por pandeo en carcasas generados por soldaduras circulares.
- Figura 43.** Diagrama de flujo del acoplamiento de los modelos numéricos.
- Figura 44.** Ejemplo de unos de los reportes de resultados.

9.

LISTA DE IMAGENES

Imagen 1. Probeta soldada con proceso SAW.

Imagen 2. Probeta soldada por el proceso GMAW.

Imagen 3. Probeta soldada por el proceso FSW.

Imagen 4. Métodos de control de distorsión por sujetadores y calzas.

Imagen 5. Método de control de distorsión por pretensado.

Imagen 6. Método de control de distorsión por soldadura discontinua y hacia atrás.

10.

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Condensado de grupos y técnicas para la medición de esfuerzos residuales.

Tabla 2. Condiciones iniciales de soldaduras.

Tabla 3. Mediciones obtenidas para la prueba con el proceso SAW.

Tabla 4. Mediciones obtenidas para la prueba con el proceso GMAW.

Tabla 5. Mediciones obtenidas para la prueba con el proceso FSW.

Tabla 6. Etapas y métodos principales en el control de distorsión por pandeo.

11.

LISTA DE ECUACIONES

$$\sigma_{\text{compresion-barras-laterales}} = \frac{1}{2} \sigma_{\text{tension-barra-central}} \quad (\text{Ec.1})$$

$$\epsilon_r = (\bar{A} + \bar{B} \cos 2\beta) \sigma_{\max} + (\bar{A} - \bar{B} \cos 2\beta) \sigma_{\min} \quad (\text{Ec.2})$$

$$\begin{aligned} p &= (\epsilon_3 + \epsilon_1) / 2 \\ q &= (\epsilon_3 - \epsilon_1) / 2 \quad (\text{Ec.3}) \\ t &= (\epsilon_3 + \epsilon_1 - 2\epsilon_2) / 2 \end{aligned}$$

$$\frac{\text{Volts} \times \text{Amps} \times 60}{\text{Vavance}(\text{pu lg adas} / \text{min}) \times 1000} \quad (\text{Ec.4})$$