

Revisión bibliográfica de los efectos de los parámetros de soldadura en las tensiones residuales del proceso.

Review of the effects of welding parameters on residual stresses of the process.

Yuniel-Ernesto Martínez-Pérez¹, René Collazo-Carceller²

Recibido: julio 2018

Aprobado: noviembre 2018

Resumen. - La soldadura constituye uno de los métodos de unión más utilizados para la fijación de elementos que posee, además, amplia variedad de aplicaciones en la industria y los servicios. Sin embargo, es habitual encontrar tensiones residuales que se generan en las uniones soldadas a causa de los gradientes térmicos. En el presente trabajo se consideran tanto novedosas tecnologías de soldadura y aquellas más convencionales. A partir del análisis de la literatura consultada, se describe la influencia de los principales parámetros del proceso soldadura sobre las tensiones residuales y las técnicas fundamentales para obtener los valores de las mismas. Esto permitirá determinar cuáles son las variables de mayor incidencia en la formación, la distribución y el comportamiento de dicho fenómeno y las técnicas para medirlas según su tipo, allanando el camino para acometer estudios futuros de mayor envergadura en torno al tema.

Palabras clave: “tensiones residuales”; “parámetros de soldadura”; “efectos”; “técnica de medición”

Summary. - *Welding is one of the most commonly used joining methods for fastening elements, which presents a wide variety of applications in industry and services. However, it is common to find residual stresses that are generated in the welded joints due to thermal gradients. In present work both innovative welding technologies and more conventional ones are considered. From the analysis of the consulted literature, the influence of the main parameters of the welding process on the residual stresses and the fundamental techniques to obtain their values is described. This will allow to determine which are the variables with the greatest incidence in the formation, distribution and behavior of welding residual stresses and the techniques to measure them according to its type. This will make more viable the path to undertake future studies of greater significance about the issue.*

Keywords: “residual stresses”; “welding parameters”; “effects”; “measurement technique”

1. Introducción.- Se denomina tensiones residuales (TR), esfuerzos residuales (ER) o tensiones internas, al estado tensional existente en el volumen de un material en ausencia de una carga externa (incluyendo la gravedad) u otra fuente de esfuerzos tal como un gradiente térmico [1]. Aparecen en procesos tecnológicos de fundición, conformación y maquinado [2] así como en tratamientos térmicos, transformando el material y sus propiedades. En los procesos de soldadura las tensiones residuales son provocadas por el desigual calentamiento de las zonas de soldadura y las condiciones mecánicas de borde [3]. Intervienen en su aparición, además, diferentes procesos

¹Ingeniero. Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”.yuniel@mecanica.cujae.edu.cu

²Doctor en Ciencias. Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”.collazo@mecanica.cujae.edu.cu

independientes tales como los efectos de un enfriamiento rápido, las transformaciones de fases, así como la expansión y contracción debidas a la distribución de temperatura no-homogénea [4]. Según su comportamiento pueden ser clasificadas en tensiones compresivas o tractivas. Según la dirección en la que actúan; para placas, láminas y soldaduras longitudinales de tuberías, en transversales y longitudinales y para soldaduras en anillo o circunferenciales en axiales y radiales. También pueden clasificarse en tres tipos de acuerdo a la escala sobre la cual se equilibran. La primera de ellas denominada macroscópicas o tipo I se extienden sobre varios granos del material. La segunda, las micro-tensiones estructurales o tipo II, abarcan la distancia de un grano o parte de uno, pueden presentarse entre fases diferentes y tener características físicas distintas. La última clase, denominada tensiones residuales tipo III, se presenta sobre varias distancias interatómicas dentro de un grano [4].

Estas afectan de manera significativa las propiedades mecánicas del material [5, 6] y por consiguiente ponen en riesgo la integridad y el desempeño de las piezas [7] de ahí el creciente interés por estudiar este fenómeno. Generalmente las tensiones que afectan y producen fallas en las uniones soldadas, son las de tracción ya que disminuyen la resistencia a la fatiga de los materiales [8] y en consecuencia la duración de su vida útil.

Uno de los debates más significativos en el campo de las tensiones residuales es su influencia en la vida útil de las estructuras, componentes y elementos soldados. De ahí se desprende la necesidad de conocer primeramente las variables de este proceso con mayores efectos en el comportamiento de estas tensiones, cuestión de creciente relevancia en la industria de la soldadura. Los parámetros del proceso de soldadura responsables de las tensiones residuales pueden agruparse de tres maneras: los relacionados con factores geométricos como la forma y el espesor de los elementos a soldar; los relacionados con los materiales como las propiedades mecánicas del material base y de aporte; y los de naturaleza tecnológica como son la energía introducida [9] o aporte térmico, el tipo de electrodo, la velocidad de soldadura, entre otros. El desarrollo de los métodos de medición, los métodos numéricos y la informática han permitido estudiar con mayor profundidad este tema.

Gran parte de la importancia en una investigación reside en la literatura existente sobre el tema a tratar. Es por esto que el presente trabajo contempla desde novedosas tecnologías de soldadura hasta las más convencionales. A partir del análisis de la literatura consultada, se describe el efecto de los principales parámetros de un proceso de soldadura sobre las tensiones residuales y se presentan los principales métodos para la obtención de los valores de las mismas. Esto permitirá determinar cuáles son las variables de mayor incidencia en la formación, distribución y comportamiento de dicho fenómeno y cuáles son los métodos más convenientes para su estudio en función del tipo de tensiones a investigar. Lo anterior posibilitará, a su vez, acometer estudios futuros de mayor envergadura en torno al tema.

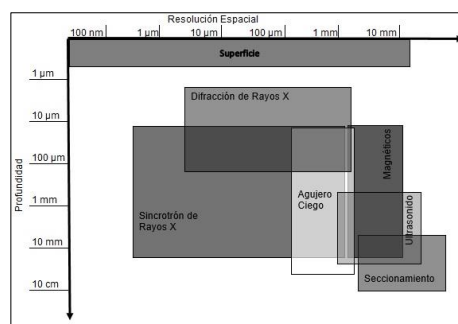


Figura 1. Profundidad de la medición vs. Resolución de la técnica de medición de tensiones residuales [10].

2. Técnicas (métodos) de medición.- Independientemente de los métodos o técnicas que se utilicen, el carácter interno de las tensiones residuales hace difícil la evaluación de las mismas ya que la medición se realiza de manera indirecta, evaluando otros elementos como la deformación o el desplazamiento y a partir de estos son interpretadas, deducidas o computadas las tensiones residuales [10]. La literatura reporta múltiples técnicas que son utilizadas para la medición de tensiones residuales. Según la bibliografía, [1, 11, 12] estas se agrupan en métodos no destructivos y destructivos o de relajación de tensiones, clasificación que será utilizada en el presente estudio. Otros autores [4, 13, 14] plantean los métodos semidestructivos como una clasificación adicional. En la Tabla I pueden observarse los métodos experimentales más comunes utilizados en la medición de tensiones residuales según su tipo. En la figura I se muestra una comparación entre los métodos experimentales más comunes en cuando a resolución de la técnica y la profundidad de medición.

Método	Tipo de método	Tipo de tensiones
Agujero Ciego	Destructivo	Tipo I
Seccionamiento	Destructivo	Tipo I
Difracción de Rayos X	No destructivo	Tipo I y Tipo II
Difracción de Neutrones	No destructivo	Tipo I y Tipo II
Ultrasonido	No destructivo	Del Tipo I al Tipo III
Magnéticos	No destructivo	Del Tipo I al Tipo III

Tabla I. Métodos fundamentales de medición de tensiones residuales[15].

2.1. No destructivas.- Las mediciones no destructivas se basan en la relación de los parámetros físicos y cristalográficos, sin requerir la destrucción de la parte a evaluar lo cual permite realizar mediciones en campo [16] en su gran mayoría.

2.1.1. Método de los elementos finitos. - Los avances que se han dado en la informática con el desarrollo de potentes procesadores y novedosos softwares de simulación han permitido aplicar el método de los elementos finitos (FEA por sus siglas en inglés) para realizar cálculos de diferente naturaleza. Esta última herramienta se ha convertido en uno de los métodos más utilizados para el análisis y obtención de los valores de tensiones residuales, aun cuando estos resultados se deban validar con métodos experimentales. En ese sentido Rong et al. [17] señalan no solo la importancia de este nuevo método, sino también afirman que, realizando comprobaciones con técnicas experimentales, es el que más se utiliza. Los autores brindan, además, dos variantes del mismo. La primera, Inherent Strain FEA, se utiliza para predecir la tensión inherente a una deformación plástica, a una fuerza equivalente o a una expansión, mientras que la segunda, denominada Thermal Elastic Plastic FEA (TEP-FEA) se basa en simular el comportamiento transitorio de la deformación y las tensiones de soldadura utilizando una carga térmica dependiente del tiempo. Entrando en contradicción con el planteamiento anterior, Nasir et al. [15], sin dejar de destacar el creciente uso de esta técnica, referencian que por ser compleja aun no es de la preferencia de los académicos. La Tabla II muestra un resumen de las aplicaciones del TEP-FEA para diferentes procesos de soldadura.

2.1.2. Métodos de difracción. - Los métodos de difracción están basados en determinar la deformación elástica que causa cambios en las distancias interplanares partiendo de los valores libres de esfuerzos. Para esto es necesario tener una medida precisa de la distancia interplanar libre de tensión [13] entonces las magnitudes de las tensiones residuales se calculan empleando la ley de Hook. De manera similar, Schajer [10] plantea que los métodos de difracción miden las distancias interplanares de un cristal y que esto puede estar relacionado con la magnitud y dirección del estado tensional existente en el material. Entre estos métodos podemos encontrar la difracción de rayos X, la difracción de neutrones y la difracción de rayos X de sincrotrón. La diferencia de los métodos radica, principalmente, en los rangos en los cuales pueden ser aplicados. Los rayos X

tienen la facilidad de poder ser usados en disímiles lugares [10] sin embargo este presenta la energía más baja de los tres y solo puede penetrar en unos pocos micrómetros de la superficie del material. La difracción de neutrones, con la energía más alta de estos métodos, puede medir a una mayor profundidad, pero requiere el acceso a grandes instalaciones científicas y mayores tiempos de medición dada su baja intensidad. Por su parte, la difracción de rayos X de sincrotrón, equilibrando energía e intensidad, necesita igualmente el acceso a grandes y especializadas instalaciones.

No	Proceso de Soldadura	Metal base	Tipo de Unión	Espesor (mm)
1	TIG	Acero de alta resistencia	A tope	2.3
2	MIG	Aleación de Aluminio	Unión en T	2
3	SAW	Acero Dulce	Unión en T	66
4	EGW	Acero TMCP EH40	A tope	80
5	EBW	Aluminio 6061-T6	A tope	20
6	Laser	Acero DP600	A solape	2.5
7	Laser-arc	Acero SS400	A tope	6
8	Laser-magnetic	Acero 316L	A tope	3.8

Tabla II. Procesos de soldadura donde fue aplicado TEP-FEA [17]. TIG-tungsten inert gas, MIG-metal inert gas, SAW-submerged arc welding, EGW-electro gas welding, EBW-electron beam welding.

2.1.3. Técnicas de Ultrasonido. - La técnica del ultrasonido para medir tensiones residuales se basa en el efecto acústico-elástico. La velocidad de propagación de la onda elástica a través de un sólido depende directamente de las tensiones, por lo que cualquier cambio en la constante elástica por efecto de un esfuerzo (aplicado o residual) se manifiesta en la variación de la velocidad de propagación de la onda [16, 18, 19]. El método empleado para medir la velocidad de la onda ultrasónica se basa en la medición del tiempo de vuelo o en la medición de la frecuencia. Con la variación del estado tensional, el espesor del material también varía y entonces la longitud de la trayectoria de la onda se modificará [16].

2.1.4. Método de Ruido Barkhausen.- El método magnético de ruido Barkhausen (MBN por sus siglas en inglés) es una técnica de gran rapidez y versatilidad que puede ser empleada en mediciones in-situ. Genera gran interés en la comunidad científica debido a su potencial como técnica no destructiva para evaluar tensiones residuales en la superficie de materiales ferromagnéticos compuestos por regiones de pequeño orden llamadas dominios magnéticos [13]. Observado por primera vez por el científico alemán Heinrich Barkhausen, esta técnica mide el número y magnitud de las reorientaciones magnéticas repentinas causadas por los dominios magnéticos durante la magnetización invertida. Debido a que estas reorientaciones son observadas como pulsos de amplitud, duración y período aleatorios se les llama ruido. Este es afectado de manera repetida por las tensiones residuales dado que la presencia de estas influye en la manera en que ocurren los cambios magnéticos locales [10].

2.2. Destructivos. - Estos métodos analizan la relajación de esfuerzos producida en una parte del metal antes y después de remover material en una zona previamente seleccionada. Luego las tensiones se calculan a partir de los valores de las deformaciones obtenidas mediante el empleo de galgas durante la remoción. Aquí se encuentran dos métodos fundamentales: el método del agujero ciego y el método de seccionamiento.

2.2.1. Método del Agujero Ciego.- Este método fue propuesto por primera vez por Mathar en 1934 [4, 20]. También llamado Hole Drilling, requiere perforar un pequeño orificio y con ayuda de galgas especiales tipo roseta de tres elementos se miden las deformaciones superficiales relajadas en el material alrededor del orificio perforado. Finalmente, las tensiones residuales existentes en el material antes de la perforación del orificio pueden ser calculadas a partir de las deformaciones relajadas [4] utilizando las expresiones (1), (2), (3) y (4).

$$P = \frac{E}{(1+\nu)\alpha} p, \quad Q = \frac{E}{b} q, \quad T = \frac{E}{b} t \quad (1)$$

$$\sigma_{\max}, \sigma_{\min} = P \pm \sqrt{Q^2 + T^2}, \quad (2)$$

Donde,

$$p = \frac{\varepsilon_3 + \varepsilon_1}{2}, \quad q = \frac{\varepsilon_3 - \varepsilon_1}{2}, \quad t = \frac{\varepsilon_3 - 2\varepsilon_2 + \varepsilon_1}{2} \quad (3)$$

y

$$\sigma_y, \sigma_x = P \pm Q \quad (4)$$

Aquí $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ son las deformaciones medidas utilizando las galgas extensométricas; $\sigma_{\max}, \sigma_{\min}$ son las tensiones residuales máximas y mínima respectivamente; p, q y t son deformaciones combinadas obtenidas a partir de los esfuerzos P, Q y T ; σ_y, σ_x son las tensiones residuales axial y radial en dependencia de la posición del elemento y de las galgas. Nótese que σ_y, σ_x también pueden ser las tensiones longitudinales y transversales según la geometría que se esté usando en la investigación.

2.2.2. Método de Seccionamiento.- El método o técnica de seccionamiento ha sido ampliamente usado para analizar las tensiones residuales en elementos de acero [12, 21]. Consiste en hacer un corte con un plato instrumentado para relajar las tensiones residuales presentes en la línea cortante. Para esto, el proceso de corte utilizado no debe introducir efectos de plasticidad o calor a fin de que la tensión residual original sea medida sin la influencia de estos efectos en la superficie de los planos de corte [13]. Este método tiene una precisión del 10%-30 %.

3. Efecto de los parámetros de soldadura sobre las tensiones residuales del proceso.- Los parámetros de soldadura tienen un determinado efecto sobre el surgimiento y el comportamiento de las tensiones residuales del proceso. A su vez, estas tienen influencia en la vida útil de la unión. Por tal motivo, es de vital importancia el análisis de los efectos de las variables del proceso sobre las tensiones residuales que aparecen.

3.1. Influencia del aporte térmico.- Uno de los parámetros fundamentales para analizar la calidad de la soldadura es el aporte térmico (Heat Input) ya que influye en la razón de enfriamiento del proceso afectando tanto a las propiedades mecánicas como a la microestructura de la soldadura y en consecuencia la distribución de las tensiones residuales [22]. Masubuchi [1] estudió las tensiones residuales y sus consecuencias a partir de diversos experimentos. Demostró que, con el aumento del aporte térmico, el ancho de la zona de tensiones residuales tractivas incrementa igualmente. Estas conclusiones encuentran respaldo en las de Silva [23], quien utilizando un difractor de rayos X investigó el comportamiento de las tensiones residuales en tuberías de acero de pequeño diámetro en un proceso TIG (manual y automático). El autor reporta que los bajos aportes térmicos mantienen un perfil de tensiones uniforme mientras que para altos valores presenta variaciones. Un enfoque diferente lo aportan Akbari y Sattari-Far [22] al estudiar (método del agujero ciego y elementos finitos) las tensiones residuales en una unión de dos tuberías de diferentes materiales (acero al carbono y acero inoxidable) utilizando soldadura TIG para el pase de raíz y soldadura manual con electrodo revestido (SMAW por sus siglas en inglés) para el relleno. Lograron demostrar como la distribución de tensiones residuales decrece con la disminución del calor introducido. En sintonía con lo planteado anteriormente, Melo et al. [24] centran su atención

en las tensiones que surgen durante la aplicación de electrodos de acero inoxidable sobre chapas de acero al Cr-Mn en un proceso SAW. Usando al MBN, observaron una tendencia al aumento en la magnitud de las mismas cuando aumenta el aporte térmico. Por su parte, Kim et al. [25] estudiaron el efecto del aporte térmico de un proceso de soldadura híbrida (láser-soldadura al arco). Los autores concluyeron que debido al coeficiente del aporte térmico existe una ligera variación en el tamaño de la distribución de las tensiones residuales y los valores absolutos de las mismas.

Schroepfer y Kannengiesser [26] estudiaron las tensiones residuales en un proceso de soldadura al arco con protección gaseosa (GMAW por sus siglas en inglés) en componentes de aceros bajo aleados de alta resistencia (HSLA por sus siglas en inglés). Aquí plantean que un alto valor de aporte térmico causa que los valores de tensiones residuales, obtenidos por el método del agujero ciego, muestren un significativo aumento. Con esto llegan a conclusiones similares a las de otros autores como Masubuchi [1], Silva [23] y Melo et al. [24]. Lin et al. [27] midieron las tensiones residuales en aceros TS590 y TS270 utilizando la difracción de rayos X encontrando que fueron significativamente influenciadas por el aporte térmico. En la investigación de Hemmatzadeh et al. [28] fueron empleados el método de los elementos finitos y del agujero ciego para examinar las tensiones residuales. Aquí reafirmaron la tendencia al aumento de las tensiones residuales (axiales y radiales) al aumentar el aporte térmico en una soldadura TIG orbital de dos tuberías de acero. Del mismo modo Costa et al. [29] midieron la distribución de las tensiones residuales en una unión soldada utilizando un proceso CW-GMAW (cold wire-gas metal arc welding) planteando que una reducción del aporte térmico disminuye las tensiones residuales longitudinales en la zona afectada térmicamente (ZAT). Alipooramirabad et al. [30] compararon las tensiones residuales obtenidas en aceros HSLA en un proceso de soldadura combinado multipasada (flux cored arc welding, FCAW y modified short arc welding, MSAW), con las obtenidas en un proceso SMAW convencional bajo condiciones análogas. Recurriendo a la difracción de neutrones, los autores señalan que el aporte térmico y el espesor del material base afectan las tensiones residuales. De esta manera demuestran también, el carácter termomecánico del fenómeno de las tensiones residuales dada la relación entre el aporte térmico y geometría del material base.

3.2. Influencia de la secuencia de soldadura.- Cuando se habla de la secuencia de soldadura se hace referencia a la cantidad y orden en el que serán realizadas las pasadas. Para uniones soldadas donde se utilizan más de un proceso, la secuencia de soldeo determina también el orden de los mismos para los pases de raíz, complementario y de relleno. Dado que el surgimiento de las tensiones residuales de soldadura es un fenómeno con un marcado carácter termomecánico y la unión soldada está continuamente sujeta a cambios de temperatura en procesos multipasadas es de gran importancia el análisis de la secuencia de soldadura. En ese sentido Radaj [11] hace referencia a que en un proceso multipasadas solo la primera y última presentan un comportamiento similar a los de pasada simple. El resto de las pasadas precalientan la posterior y postcalientan la anterior [11] actuando de manera similar a un tratamiento de relajación de esfuerzos. Sandin et al. [31] trabajaron la soldadura SMAW en placas de acero sometidas a un tratamiento térmico postsoldadura utilizando la técnica del ruido de Barkhausen para la medición de tensiones residuales. Los autores llegaron a conclusiones similares a Radaj [11] pues a partir de la quinta pasada (de nueve realizadas) el material experimenta un efecto de alivio de tensiones. Cofiño [32] analizó las tensiones residuales en una junta de acero soldada por el proceso SMAW (17 pasadas) en condiciones de overmatch. Comprobó que la ZAT correspondiente a la última pasada presentó altos valores de tensiones compresivas y el máximo se alcanzó en la zona fundida (ZF).

Por otro lado, Solís [16] estudia las tensiones residuales con técnicas ultrasónicas, en un proceso GMAW aplicado a aceros. El autor no apreció grandes variaciones entre pasadas, sin embargo, observó un incremento de las tensiones residuales al alcanzar la máxima temperatura del componente. Esta diferencia de criterios, aunque se trate de procesos de soldadura diferentes, radica en la resolución espacial y la profundidad de medida de la técnica utilizada para la obtención de los valores. Otros autores, como la ya referida Cofiño [32], pudieron observar el

comportamiento de las tensiones residuales en cada una de las pasadas con métodos de mayor profundidad, demostrando que la técnica de medición de tensiones utilizada tiene un alto grado de importancia para observar los valores de las tensiones residuales, aunque no sea una variable de soldadura. Llama la atención que en la investigación hecha por Vasantharaja et al. [33], donde se observan las tensiones residuales en diferentes procesos de soldadura multipasadas de un acero inoxidable, la secuencia de soldadura no es relacionada (directa o indirectamente) con la formación, distribución o el comportamiento de las tensiones residuales.

Li et al. [34] tratan la influencia de la secuencia de soldeo de un proceso TIG en una junta soldada de acero. En el estudio apuntan que la tensión inducida en una pasada es eliminada, parcial o totalmente por las subsecuentes y en la pasada final la transformación auténtico-martensítica juega un papel importante en la formación de tensiones. Del mismo modo Alipooramirabad et al. [30] señalan que a causa de la efectiva convección de las primeras pasadas, la razón de enfriamiento tiene mayor rapidez. A su vez las pasadas posteriores son menos afectadas por el calor generado en las pasadas subsecuentes y estas últimas tienden a aliviar las tensiones de las pasadas precedentes, cuyos picos se encuentran en la ZF y la ZAT. Un nuevo enfoque lo aportan Genchev et al. [35] estudiando, numérica y experimentalmente, la distribución de tensiones residuales en un acero S355J2+N en una soldadura multipasadas (GMAW para el pase de raíz y SAW para los pases de relleno). Los resultados que obtuvieron mostraron que cada pasada subsecuente genera una microestructura con diferente límite elástico a las anteriores, factor fundamental en la formación y distribución de tensiones residuales.

Número de Pases Unión a Tope	Tensión Residual	Tracción	Compresión
Pase Simple	Longitudinal	Cerca de la soldadura	Lejos de la soldadura
	Transversal	Centro de la placa	Al final de la soldadura
Multipasada	Longitudinal	Cerca de los puntos de soldadura a lo largo del cordón	Lejos del cordón de soldadura
	Transversal	Superficie superior de la placa	Superficie inferior de la placa

Tabla III.- Distribución de las tensiones residuales según la secuencia de soldadura [15].

Por su parte, Moat et al. [36] estudiaron las tensiones residuales en soldaduras multipasadas, comentando que las principales diferencias entre las compresivas y las tractivas están en la región donde se establecen los primeros cordones de soldadura. En esa zona las tensiones fueron menos compresivas con la reducción de la temperatura interpasadas. Wang et al. [37] investigaron el efecto del aporte térmico en la microestructura y las propiedades de un acero HSLA soldado con un proceso híbrido de soldadura láser-arco eléctrico (hybrid laser-arc welding, HLAW).

Los autores mencionan que, para este tipo de proceso, donde se requiere solo una pasada para espesores entre 10-20 mm, las tensiones residuales resultan menores que en soldaduras al arco convencionales multipasadas para iguales espesores. En la Tabla III se muestra la distribución de las tensiones residuales, en una unión a tope, según la secuencia de soldadura con un proceso de pase simple y otro de pasadas múltiples.

3.3. Influencia del Tipo de Soldadura.- El tipo de proceso utilizado es un factor que guarda estrecha relación con el aporte térmico. Cada proceso de soldadura presenta una capacidad de generación diferente y por tanto cada uno influirá de manera distinta en los valores, distribución y

comportamiento de las tensiones residuales. En esa línea Sprauel et al. [38] estudiaron y compararon, utilizando la difracción de rayos X, las tensiones residuales en placas de titanio unidas por un proceso TIG y uno EBW. Los resultados a los que arribaron mostraron diferencias en la magnitud de las tensiones residuales en la profundidad de la ZF para cada tipo de soldadura, mientras que en la superficie presentaron valores similares. La dimensión de las zonas afectadas por estas tensiones alcanza mayor importancia en la soldadura TIG. Por su parte Silva [23] reporta que tanto la soldadura TIG como la SMAW presentaron perfiles de tensiones residuales con buena uniformidad; para esta última solo en el caso de que se utilice bajo aporte térmico.

Vasantharaja et al. [33] plasman en su estudio el efecto de un proceso TIG y uno A-TIG (activated flux-tungsten inert gas) en placas de acero inoxidable austenítico utilizando técnicas ultrasónicas. Los autores demostraron que los valores más bajos de tensiones residuales se obtuvieron en el proceso A-TIG sin preparación borde. Del mismo modo Pamnani et al. [39] compararon la influencia de esta última variante con la soldadura SMAW en placas de acero utilizando las técnicas de difracción de rayos X y ultrasónicas. Los investigadores señalaron que las tensiones encontradas en ambos procesos tuvieron valores similares con un menor incremento en el proceso A-TIG, recalando el bajo aporte térmico de esta variante. Alipooramirabad et al. [30] plantean que un nivel significativamente mayor de tensiones residuales correspondió al uso de procesos combinados (FCAW y MSAW) aplicados en aceros HSLA en comparación con las obtenidas por un proceso SMAW para igual material. Estos niveles podrían estar relacionados con la microestructura que se forma en el metal soldado y la ZAT.

Las tensiones residuales en calentadores de agua eléctricos de acero fueron abordadas por Puzoza et al. [40] determinando que las que surgen tanto en la superficie como en la raíz de la unión en una soldadura láser y en otra al arco por plasma son muy similares en magnitud. En cambio Mikhailchenkov y Lyalyakin [41] acero concluyen que la magnitud de las tensiones sí dependen del método de soldadura utilizado, sin embargo la naturaleza de su variación no. Wang et al. [37] refieren que en el proceso HLAW se obtienen valores menores de tensiones residuales que en procesos de soldadura al arco convencionales. Costa et al. [29] midieron la distribución de las tensiones residuales en una soldadura CW-GMAW y en una GMAW tradicional. Los resultados que obtuvieron mostraron que el proceso CW-GMAW presenta menor cantidad de tensiones compresivas que el proceso GMAW convencional. Xu et al. [42] realizaron una comparación entre las tensiones residuales obtenidas en una tubería de acero inoxidable por un proceso TIG y las obtenidas por un proceso de soldadura láser (laser beam welding, LBW). Los autores apuntan que existe una clara diferencia entre las distribuciones de las tensiones residuales radiales de ambos procesos. Igualmente anotan que en el proceso LBW las tensiones en la ZAT cambian de compresivas a tractivas mientras que en la soldadura TIG ocurre de manera contraria siendo las tensiones residuales obtenidas en esta notablemente mayores a las de la soldadura LBW. Acherjee [43] plantea que la concentración de tensiones residuales en soldaduras híbridas láser-TIG es más baja que la concentración obtenida en soldaduras láser o en soldaduras TIG por sí solas. El autor también refiere que la combinación entre una razón de enfriamiento-calentamiento más rápida y un menor volumen de metal fundido produce menores valores de tensiones residuales en procesos de soldadura híbridos que en una soldadura TIG.

3.4. Influencia de la geometría.- La geometría de los componentes a unir es otro factor que afecta la distribución de las tensiones residuales [15, 44]. Se toma como geometría a aquellos aspectos estructurales tales como el espesor, el largo, el ancho, la forma (chapa o tubería); así como las relaciones entre estos. Radaj [11] plantea que hay considerables diferencias entre las tensiones residuales transversales en la soldadura longitudinal de una chapa y las de una soldadura orbital de un cilindro, debido a la constricción de esta última. Por su parte los valores de tensiones residuales reportados por Silva [23] presentan un pico en la ZAT de tuberías de acero de 101,6 mm (4") de diámetro, mientras que para muestras con diámetro de 50,8 mm (2") no se reporta este efecto. Así mismo el autor reporta que el comportamiento del perfil de tensiones es diferente al que se

encuentra en la literatura para procesos similares que utilizan chapas y no tuberías. Nasir et al. [15] plantean que durante la soldadura de geometrías en forma de placa se producen tensiones tractivas en la ZF y compresivas en la ZAT. Concluyen también que su comportamiento es diferente al que tienen en la soldadura de tuberías ya que existen apreciables diferencias entre las tensiones de las superficies interior y exterior.

Apoyando esta última idea, Prasad et al. [45] estudian los efectos de la geometría de soldadura orbital TIG en tuberías de acero inoxidable. Estos autores observaron que en el centro del cordón de soldadura (superficie exterior) existen tensiones residuales axiales compresivas que cambian a tractivas y luego se anulan pasados los 60 mm de distancia al centro del cordón. De forma análoga se reporta este comportamiento para la superficie interior donde inicialmente las tensiones son tractivas. Alipooramirabad et al. [30] señalan que el espesor del material base es un factor que influye a través de la velocidad de enfriamiento de la ZF y la extensión de la ZAT. Con esto demuestran que, entre el aporte térmico, el tipo de soldadura empleado y la geometría del material base existe una relación que puede ser de significativa importancia. Un nuevo punto de vista lo aportan Hemmatzadeh, Moshayedi y Sattari-Far [28] con un estudio en el que tratan la relación R/t (radio/espesor) en una tubería de acero. Esta relación es considerada un parámetro causante del incremento de las tensiones residuales, aunque tal efecto se vuelve insignificante cuando los valores de dicha relación son altos. De manera similar Somodi y Kövesdi [46], trabajaron esta relación en cajas de sección cuadrada fabricadas de aceros de diferentes grados. En el trabajo comentan que el espesor por sí solo no tiene influencia significativa en las tensiones residuales de compresión, mientras que la relación b/t (ancho/espesor) si tiene tal influencia no solo en las de compresión sino también en las de tracción.

3.5. Influencia del tipo de acero.- En el proceso de soldadura es de vital importancia conocer no solo el material base, sino el material de aporte con el que se va a trabajar, así como las propiedades físicas, químicas y mecánicas de ambos. En tal sentido el comportamiento de las tensiones residuales de soldadura estará sujeto al material que se utilice (base o de aporte), la microestructura y los cambios en la misma durante el proceso. Es válido destacar que la combinación del material base y el material de aporte también juega un papel importante en la distribución de las tensiones residuales [15]. Akbari y Sattari-Far [22] observaron como el decrecimiento de la distribución de tensiones residuales se evidencia más en un acero inoxidable que en un acero al carbono en una soldadura de diferentes materiales. Plantean, además, que las máximas tensiones residuales se encontraron en el acero inoxidable.

Melendo et al. [47] mencionan que el material base es uno de los factores de los cuales dependen los valores de este tipo de tensiones. De manera similar Melo et al. [24] referencian al material base como uno de los factores influyentes en la formación, distribución y comportamiento de las tensiones residuales. Un punto de vista interesante lo aportan Bhatti et al. [48] en su trabajo sobre la influencia de las propiedades termomecánicas de diferentes grados de acero utilizando para ello un modelo por elementos finitos. Aquí llegaron a la conclusión que las propiedades térmicas y mecánicas (excepto el esfuerzo de fluencia termo-dependiente) por sí solas no tienen influencia significativa en la evaluación de tensiones residuales pudiendo ser consideradas como constantes y que la influencia de la transformación de fase debe ser tomada en cuenta para lograr una mejor estimación de las mismas.

Por su parte Pamnani et al. [39] agregan que cuando el efecto de la transformación de fase predomina resulta en una deformación plástica del material. Esto conlleva a la existencia de un variado patrón de tensiones residuales compresivas en las zonas donde ocurra dicha transformación. Nasir et al. [15] centran su investigación en un proceso TIG comentando que un acero de medio carbono si tiene efecto significativo sobre las tensiones residuales en cambio un acero de bajo carbono no. Por otro lado, Costa et al. [29], aunque no centran su investigación en la

influencia del material, si remarcan el efecto del mismo en la distribución de tensiones residuales en una unión soldada.

Huang et al. [49] analizan las tensiones residuales que surgen en la unión de dos materiales diferentes en una soldadura láser a tope utilizando el método de los elementos finitos, recalando que la transformación de fase es uno de los factores influyentes en las tensiones residuales del proceso. Esta afirmación es apoyada y ampliada por Hensel et al. [44] quienes exponen que los efectos de la transformación de fases en la ZAT causan una distribución no homogénea de las tensiones residuales. También señalan que diferentes grados de acero, con límite elástico entre los 300 MPa y 1000 MPa, presentaron altos valores de tensiones en la zona del cordón mientras que en el pie de la soldadura fueron bajos. Siguiendo esta última línea, Somodi y Kövesdi [46] expusieron análogamente que en soldaduras de componentes de sección cuadrada, mientras más alto es el grado del acero más bajos serán los índices de tensiones residuales. También explican que en la medida que el límite elástico del material sea más grande, el índice de tensiones residuales será menor.

3.6. Influencia de la velocidad de soldadura.- En el caso de que una pieza se encuentre libre de esfuerzos en el momento en que aparece un gradiente térmico, las tensiones residuales son inducidas por cambios térmicos de volumen [16] y estos a su vez son determinados, directa o indirectamente, por la velocidad de soldadura. Por otra parte la rapidez del ciclo térmico (calentamiento y enfriamiento) debida a una alta velocidad de soldeo produce también grandes gradientes de temperatura en la zona de soldadura [43].

Coelho et al. [50] trabajan el efecto de diferentes combinaciones de aporte térmico y soldadura autógena láser en los gradientes de tensiones residuales en uniones a tope de acero grado S500MC. Sin embargo, a pesar de tratar el efecto de la velocidad del proceso, no analiza su influencia en las tensiones residuales. Del mismo modo Solís [16] obvia el efecto de este parámetro aun cuando investiga el fenómeno de las tensiones residuales en un proceso de soldadura por fusión. De la misma manera, Costa et al. [29] no profundizan en las consecuencias que la velocidad de desplazamiento pueda tener sobre las tensiones residuales. Por su parte Puoza et al. [40] no tratan nada del efecto de la velocidad del proceso sobre las tensiones residuales a pesar de estudiar la influencia del referido parámetro.

A pesar de esto existen autores que, directa o indirectamente, tratan el efecto de esta variable en las tensiones residuales del proceso. Entre estos se encuentra Acherjee [43] quien comenta que un incremento de la velocidad de soldeo puede reducir eficazmente la concentración de tensiones residuales aunque una alta velocidad genere defectos metalúrgicos en un proceso láser. En contradicción con esto, Hemmatzadeh et al. [28] referencian que las tensiones residuales aumentaron en un proceso TIG orbital por la alta velocidad de soldadura en combinación con la reducción del espesor. En la misma línea, Alipooramirabad et al. [30] comentan que la baja velocidad de soldeo, relacionada a su vez con un mayor nivel de aporte térmico produce un decrecimiento de las tensiones residuales longitudinales en combinación con la baja deposición en cada pasada y las características del arco de una soldadura SMAW. Lo reportado por estos dos últimos autores sugiere la existencia de una proporcionalidad directa entre la velocidad de soldadura y el comportamiento de las tensiones residuales; así como una estrecha correlación con otros parámetros del proceso.

4. Conclusiones.- Los efectos de los parámetros de soldadura sobre las tensiones residuales que se generan en dicho proceso fueron descritos a partir de la bibliografía consultada. Fueron mostrados, además, las principales técnicas para la medición de tensiones residuales. Se dedujo que las investigaciones que tratan directamente la influencia de los parámetros de soldadura en las tensiones residuales es escasa. Esto es más profundo cuando se trata de los procesos de soldadura convencionales. Las tensiones residuales resultaron ser menores en los procesos de soldadura en

estado sólido ya que la temperatura de trabajo y el aporte térmico son menores que en los procesos de soldadura por fusión. Así mismo los valores de las tensiones en estos últimos tienden a ser mayores en aquellos procesos más tradicionales. Se observó una tendencia a que la formación, distribución y comportamiento de las tensiones residuales fuese proporcional al aporte térmico. De igual manera las investigaciones que tratan el efecto de la velocidad de soldadura han demostrado que este factor tiene significativa influencia en el comportamiento de las tensiones residuales tanto para soldaduras por fusión como en estado sólido. Sin embargo, este es un parámetro del proceso que apenas se trata, respecto al cual existen diferencias de criterios entre los autores que, escasamente, lo han estudiado. Queda entonces profundizar en como este parámetro afecta a la formación, distribución y comportamiento de las tensiones residuales de soldadura.

Es recurrente el análisis de otras variables dentro del parámetro secuencia de soldeo para el estudio del efecto de este en las tensiones residuales. Ejemplo de lo anterior son la microestructura y temperatura existentes en las pasadas intermedias durante el proceso. En estas investigaciones no se encontraron análisis donde se empleen técnicas de soldadura para la aplicación de cordones como la técnica del paso de peregrino. Se destaca que, a pesar de encontrar referencias al efecto de las interacciones de los parámetros de soldadura en la formación, distribución y comportamiento de los esfuerzos residuales del proceso, sin profundizar mucho en el tema, aun son escasos. Del mismo modo se ha visto poca relación entre la microestructura del depósito y las tensiones residuales. Las técnicas de medición más utilizadas por los autores han sido la difracción de rayos X y el agujero ciego. No obstante, a pesar de las divergencias en cuanto a su empleo, cada vez son más los investigadores que recurren al método de los elementos finitos debido a su rapidez, bajo costo y a que con pequeños errores en la simulación se obtienen magnitudes de tensiones residuales similares a las obtenidas por métodos experimentales. Esto constituye una línea de investigación con horizontes prometedores en la detección, y mejor aún, en la predicción de la formación, distribución y comportamiento de las tensiones residuales en procesos de soldadura.

Referencias

- [1] K. Masubuchi, *Analysis of Welded Structures*. Londres: Pergamon Press, 1980.
- [2] V. R. Gordillo, "Análisis mediante Simulación del Efecto de las Reparaciones en las Tensiones Residuales de Soldeo," Tesis de Grado, Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena, España, 2013.
- [3] P. M. A. Zaldivar, R. E. Cingualbres, and R. P. Rodríguez, "Evaluación por el método de los elementos finitos de la influencia de las tensiones residuales en la fatiga de uniones soldadas," *Ingeniería Mecánica*, vol. 19, no. 1, pp. 40-48, 2016.
- [4] I. Mejía, C. Maldonado, A. Bedolla, et al. "Esfuerzos Residuales Generados en la Soldadura de Placas de Acero Inoxidable AISI 304 mediante el Proceso SMAW," *CONAMET/SAM*, vol. 2006, pp. 1-7, 2006.
- [5] M. Monsalve, M. E. López, and F. V. Galvis "Técnicas utilizadas para la medición de esfuerzos residuales en películas delgadas depositadas por PVD," *Scientia et Technica*, vol. 1, no. 36, pp. 765-760, 2007.
- [6] M. U. Jiménez, B. L. de-la-Cruz, T. F. Columbié, et al. "Efecto de las tensiones en la unión soldada tubobrida del transportador de mineral reducido," *Minería y Geología*, vol. 32, no. 1, pp. 76-92, 2016.
- [7] S. I. R. Juárez, R. R. Castro, E. L. Vargas, et al. "Revisión del estado del arte del efecto de procesos de fabricación sobre esfuerzos en componentes de aluminio," *Pistas Educativas*, no. 119, pp. 224-233, 2016.
- [8] Y. García, J. Burgos, F. Gil, et al. "Obtención de tensiones residuales a lo largo de un cordón de soldadura mediante métodos analíticos y experimentales," *Soldagem & Insp*, vol. 11, no. 2, pp. 4-9, 2006.
- [9] S. K. Sharma and S. Maheswari, "A review on welding of high strength oil and gas pipeline steels," *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, no. 38, pp. 203-217, 2017. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.jngse.2016.12.039>
- [10] G. S. Schajer, Ed., *Practical Residual Stress Measurement Methods*. Reino Unido: John Wiley & Sons, Ltd, 2013.
- [11] D. Radaj, *Heat Effects of Welding. Temperature Field, Residual Stress, Distortion*. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1992. DOI 10.1007/978-3-642-48640-1

- [12] O. Lagerqvist and A. Olsson. Residual stresses in welded I-girders made of stainless steel and structural steel. In *Nordic Steel Construction Conference: 18/06/2001-20/06/2001*, Helsinki: Helsinki University of Technology, 2001, pp. 737-744.
- [13] N. S. Rossini, M. Dassisti, K. Y. Benyounis, et al. "Methods of measuring residual stresses in components," *Materials and Design*, no. 35, pp. 572-588, 2012. DOI 10.1016/j.matdes.2011.08.022
- [14] M. Zeinoddini, S. Amavaz, A. P. Zandi, et al. "Repair welding influence on offshore pipelines residual stress fields: an experimental study," *Journal of Constructional Steel Research*, no. 86, pp. 31-41, 2013 DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2013.03.010>
- [15] N. S. M. Nasir, M. K. A. A. Razab, S. Mamat, et al. "Review on Welding Residual Stress," *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 11, no. 9, pp. 6166-6175, 2016.
- [16] M. A. Solís Alvarez, "Determinación de los esfuerzos residuales mediante la constante acústico-elástica en aceros cementados 4320 y soldados por el proceso GMAW," Tesis de Maestría, Corporación Mexicana de Investigación en Materiales, 2014.
- [17] Y. Rong, J. Xu, Y. Huang, et al. "Review on finite element analysis of welding deformation and residual stress," *Science and Technology of Welding and Joining*, 2017. DOI <https://doi.org/10.1080/13621718.2017.1361673>
- [18] Y. Kudyavtsev, J. Kleiman, O. Gushcha, et al., "Ultrasonic technique and device for residual stress measurement," in *X International Congress and Exposition on Experimental and Applied Mechanics. Costa Mesa, California USA. Canada*, 2004, pp. 1-7.
- [19] Y. Javadi, S. Sadeghi, and M. A. Najafabadi, "Taguchi optimization and ultrasonic measurement of residual stresses in the friction stir welding," *Materials and Design*, no. 55, pp. 27-34, 2014. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2013.10.021>
- [20] Vishay Precision Group, "Group Measurement of Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain Gage Method", *Micro-Measurements*, TN-503, pp. 19-33, 2010.
- [21] F. M. Mazzolani, *Aluminium alloy structures*. Florida: CRC Press, 1995.
- [22] D. Akabari and I. Sattari-Far, "Effect of the welding heat input on residual stresses in butt-welds of dissimilar pipe joints," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, no. 86, pp. 769-776, 2009. DOI 10.1016/j.ijpvp.2009.07.005.
- [23] C. Carvalho Silva, "Avaliação das tensões residuais de soldagem em tubulações de pequeno diametro usadas em refinaria de petróleo". Tesis de Maestría. Universidade Federal do Ceará, Benfica, Fortaleza, Brasil, 2007.
- [24] R. H. F. Melo, V. R. Batista, M. M. Silva, et al., "Avaliação das tensões residuais de revestimentos aplicados por soldagem – Parte 1," *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, vol. 7, no. 1, pp. 52-61, 2012.
- [25] Y. C. Kim, M. Hirohata, M. Murakami, et al. "Effects of heat input ratio of laser-arc hybrid welding on welding distortion and residual stress". *Welding International*, 2014. DOI <http://dx.doi.org/10.1080/09507116.2014.921039>.
- [26] D. Schroepfer, T. Kannengiesser, "Stress build-up in HSLA steel welds due to material behaviour," *Journal of Materials Processing Technology*, no. 227, pp. 49-58, 2016. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.08.003>.
- [27] J. Lin, N. Ma, Y. Lei, et al. "Measurement of residual stress in arc welded lap joints by $\cos\alpha$ x-ray diffraction method," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 243, pp. 387-394, 2016. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.12.021>.
- [28] M. Hemmatzadeh, H. Moshayedi, I. Sattari-Far, "Influence of heat input and radius to pipe thickness ratio on the residual stresses in circumferential arc welded pipes of API X46 steels," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2017. DOI 10.1016/j.ijpvp.2017.01.001.
- [29] E. S. Costa, P. D. C. Assunção, E. B. F. D. Santos, et al. "Residual stresses in cold-wire gas metal arc welding," *Science and Technology of Welding and Joining*, 2017. DOI <http://dx.doi.org/10.1080/13621718.2017.1306014>.
- [30] H. Alipooramirabad, A. Paradowska, R. Ghomashchi, et al. "Investigating the effects of welding process on residual stresses, microstructure and mechanical properties in HSLA steel welds," *Journal of Manufacturing Processes*, no. 28, pp. 70-81, 2017. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.04.030>.

- [31] J. C. S. Sandin, B. A. Fernández, F. J. M. Caballero, et al. "Non-destructive evaluation of residual stresses in welding and hard-surfacing processes," *Nucleus*, no. 19, pp. 2-5, 1995.
- [32] R. C. Cofiño "Análise Das Tensões Residuais Em Uma Junta Soldada Em Condição Overmatch," Tesis de Grado. Centro Universitario da FEI, Assunção, São Bernardo do Campo - SP, 2010.
- [33] P. Vasantharaja, M. Vasudevan, P. Palanichamy "Effect of welding processes on the residual stress and distortion in type 316LN stainless steel weld joints," *Journal of Manufacturing Processes*, pp. 769-776, 2014. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2014.09.004>
- [34] S. Li, S. Ren, Y. Zhang, et al. "Numerical investigation of formation mechanism of welding residual stress in P92 steel multi-pass joints," *Journal of Materials Processing Technology*, 2017. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.01.033>.
- [35] G. Genchev, N. Doynov, R. Ossenbrink, et al. "Residual stresses formation in multi-pass weldment: A numerical and experimental study," *Journal of Constructional Steel Research*, no. 138, pp. 633-641, 2017. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.08.017>
- [36] R. J. Moat, S. Ooi, A. A. Shirzadi, et al. "Residual stress control of multipass welds using low transformation temperature fillers," *Materials science and technology*, 2017. DOI <https://doi.org/10.1080/02670836.2017.1410954>
- [37] X.-N. Wang, S.-H. Zhang, J. Zhou, et al. "Effect of heat input on microstructure and properties of hybrid fiber laser-arc weld joints of the 800 MPa hot-rolled Nb-Ti-Mo microalloyed steels," *Optics and Lasers in Engineering*, no. 91, pp. 86-96, 2017. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.optlaseng.2016.11.010>
- [38] J. M. Sprauel, R. Rodriguez, J. L. Lebrun, et al. "Contraintes Résiduelles après soudage par le procédé Tungsten Inert Gas et par faisceau d'électrons de tôles épaisses en TA6V," *Journal of the Lea-Cordon Metals*, vol. 69, no. 1, pp. 107-120, 1980.
- [39] R. Pamnani, G. K. Sharma, S. Mahadevan, et al. "Residual stress studies on arc welding joints of naval steel (DMR-249A)," *Journal of Manufacturing Processes*, no. 20, pp. 104-111, 2015. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2015.09.004>
- [40] J. C. Puoza, X. Hua, A. Moro, et al. "Assessment of mechanical properties, residual stresses and diffusible hydrogen of longitudinal weld in electric water heater tanks," *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, vol. 1, no. 19, 2017. DOI 10.3390/jmmp1020019
- [41] A. M. Mikhailchenkov, V. P. Lyalyakin, R. Y. Solovev, "Effect of welding methods on the magnitude of residual stresses in welding up cracks in grey cast iron casing components," *Welding International*, v.32, no. 1, pp. 67-71, 2018. DOI <http://dx.doi.org/10.1080/09507116.2017.1382077>
- [42] J. Xu, J. Chen, Y. Duan, et al. "Comparison of residual stress induced by TIG and LBW in girth weld of AISI 304 stainless steel pipes," *Journal of Materials Processing Technology*, 2017. DOI <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.jmatprotec.2017.05.014>
- [43] B. Acherjee "Hybrid laser arc welding: State-of-art review," *Optics and Laser Technology*, vol. 99, pp. 60-71, 2018. DOI <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.09.038>
- [44] J. Hensel, T. Nitschke-Pagel, D. T. Ngoula, et al. "Welding residual stresses as needed for the prediction of fatigue crack propagation and fatigue strength," *Engineering Fracture Mechanics*, 2017. DOI <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.10.024>
- [45] V. M. V. Prasad, V. M. J. Varghese, M. R. Suresh, et al. "3D simulation of residual stress developed during TIG welding of stainless steel pipes," *Procedia Technology*, no. 24, pp. 364 - 371, 2016. DOI 10.1016/j.protcy.2016.05.049
- [46] B. Somodi, B. Kövesdi, "Residual stress measurements on welded square box sections using steel grades of S235-S960," *Thin-Walled Structures*, 2018, vol. 123, pp. 142-154, 2018. DOI <https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.11.028>
- [47] J. C. Melendo, A. Burgueño, L. Tufaro, et al., "Evaluación de Tensiones Residuales en Soldadura de Aluminio por FSW Y GMAW," *Proceedings of the IBEROMETXI, X CONAMET/SAM*, Viña del Mar, Chile, 2010.
- [48] A. A. Bhatti, Z. Barsoum, H. Murakawa, et al., "Influence of thermo-mechanical material properties of different steel grades on welding residual stresses and angular distortion," *Materials and Design*, no. 65, pp. 878-889, 2015. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2014.10.019>
- [49] J. Huang, M. Yang, J. Liu, et al., "Residual stress field analysis of Al/steel butt joint using laser welding-brazing," *Materials science and technology*, 2017. DOI <https://doi.org/10.1080/02670836.2017.1343760>

- [50] R. S. Coelho, M. Corpas, J. A. Moreto, et al., "Induction-assisted laser beam welding of a thermomechanically rolled HSLA S500MC steel: A microstructure and residual stress assessment," *Materials Science & Engineering A*, no. 578, pp. 125-133, 2013. DOI 10.1016/j.msea.2013.04.039