

Evaluación de resistencia a tracción y dureza de cordones de soldadura por proceso Smaw y Mig-Mag**Evaluation of tensile strength and hardness of weld beads by Smaw and Mig-Mag processes**VILLARREAL ALBITRES, William Fernando¹; VERA PACHERRE, Julio²; PANTA CARRANZA, Dante Omar³

Universidad César Vallejo

RESUMEN

La soldadura constituye un tipo de unión permanente en el proceso de ensamble en la industria manufacturera secundaria tales como construcción para la fabricación de automóviles, aeronaves, puentes, tanques, barcos, tuberías, entre otros. El objetivo de esta investigación fue comparar la resistencia mecánica a la tracción y dureza de probetas soldadas. La tracción mecánica fue para evaluar la resistencia a la rotura de los cordones de soldadura por el proceso MIG/MAG versus el proceso de soldadura SMAW, sobre material base ASTM 36. La dureza fue para determinar la deformación plástica de la zona afectada por el calor durante el proceso de fusión. Para ello se empleó la máquina universal de pruebas para determinar la relación esfuerzo-deformación de cada proceso; mientras que para la dureza se empleó un durómetro. En este experimento se usó 12 probetas soldadas y dos probeta no-soldadas testigo, para determinar la desviación cuantitativa de la rotura y dureza, respecto a las probetas sometidas a pruebas experimentales. Para determinar la supremacía en propiedades mecánicas, se utilizó la herramienta estadística valor-t. Los resultados indicaron que relación esfuerzo-deformación de las probetas presenta las mismas etapas y características de deformación elástica y plástica hasta su rotura. Asimismo, se halló que el procedimiento MIG/MAG presenta mayores valores de resistencia a la tracción y de dureza que el SMAW, por lo que se tuvo que rechazar nuestra hipótesis cero que afirmaba que el proceso SMAW tenía mejores propiedades mecánicas. Se concluye que la soldadura por procedimiento MIG/MAG presenta propiedades mecánicas superiores que el procedimiento SMAW.

Palabras clave: MIG, MAG, SMAW, tracción, dureza, probeta.


ABSTRACT


Welding constitutes a type of permanent joint in the assembly process in the secondary manufacturing industry such as construction for the manufacture of automobiles, aircraft, bridges, tanks, ships, pipes, among others. The objective of this research was to compare the mechanical tensile strength and hardness of welded specimens. The mechanical traction was to evaluate the resistance to breakage of the weld seams by the MIG/MAG process versus the SMAW welding process, on ASTM 36 base material. The hardness was to determine the plastic deformation of the area affected by heat during the fusion process. For this purpose, the universal testing machine was used to determine the stress-strain relationship of each process; while a hardness tester was used for hardness. In this experiment, 12 welded specimens and two non-welded control specimens were used to determine the quantitative deviation of breakage and hardness, with respect to the specimens subjected to experimental tests. To determine the supremacy in mechanical properties, the t-value statistical tool was used. The results indicated that the stress-strain relationship of the specimens showed the same stages and characteristics of elastic and plastic deformation until failure. Likewise, it was found that the MIG/MAG procedure presents higher tensile strength and hardness values than SMAW, so our zero hypothesis that stated that the SMAW process had better mechanical properties had to be rejected. It is concluded that the MIG/MAG welding process has superior mechanical properties than the SMAW process.


Keywords: MIG, MAG, SMAW, tensile, hardness, specimen.

© Los autores. Este artículo es publicado por la Revista UCV HACER Campus Chiclayo. Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la Licencia Creative Commons Atribución - No Comercial - Compartir Igual 4.0 Internacional. (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>), que permite el uso no comercial, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.

Recibido: 19 de enero de 2021
Aceptado: 21 de abril de 2021
Publicado: 25 de mayo de 2021

¹Doctor en Ciencias e Ingeniería, Docente de la Escuela de Ingeniería Mecánica-Eléctrica Universidad César Vallejo, e-mail: wfvillarrealv@ucvvirtual.edu.pe,  <https://orcid.org/0000-0003-1743-6014>

²Ingeniero Mecánico-Eléctrico Universidad César Vallejo, e-mail: jverap@ucvvirtual.edu.pe,  <https://orcid.org/0000-0001-6119-4820>

³Magister en Energía, Coordinador de la Escuela de Ingeniería Mecánica-Eléctrica Universidad Cesar Vallejo, e-mail: dpanta@ucv.edu.pe,  <https://orcid.org/0000-0002-4731-263X>

INTRODUCCIÓN

La soldadura constituye un tipo de unión permanente en el proceso de ensamble en industrias manufactureras secundarias tales como la construcción para la fabricación de automóviles, aeronaves, puentes, tanques, barcos, tuberías, entre otros. La soldadura también ha sido empleada en trabajos de reparación y mantenimiento en elementos de máquinas con rotura, desgaste y elementos de sujeción. La American Welding Society, AWS, clasifica en dos grupos el proceso de soldadura: soldadura por fusión y soldadura por estado sólido (Weman, 2012). El proceso de soldadura por fusión se lleva a cabo usando calor para fundir dos metales, uno de aporte y el otro de base. Cuando el metal a fundir es uno solo se le denomina soldadura autógena. El proceso de soldadura por estado sólido se diferencia del de fusión por el uso de presión entre las piezas a unir.

La fusión de dos metales por calor se obtiene usualmente mediante soldadura por arco, que usa corriente eléctrica para la fusión de metales, el cual puede llegar a temperaturas mayores a los 5500 °C como consecuencia de que el material de aporte se comporta como una resistencia, fenómeno que hace que el metal de aporte o electrodo se funda. Un parámetro que determina el grado de fusión de un material constituye la densidad calorífica, el cual expresa la potencia eléctrica transferida por unidad de área. Valores de densidad calorífica de 10 W/mm² (soldadura oxi-acetileno) a 10⁵ W/mm² (soldadura con haz de electrones), miden temperatura y tiempo de fusión del metal de aporte. Por ejemplo, la soldadura por arco eléctrico produce una densidad calorífica de 50 W/mm². Uno de los procesos de soldadura por fusión, más practicados y conocidos en la industria de la construcción es el de arco eléctrico protegido (*SMAW*), por ser de bajo costo, portable, soldable sobre superficies contaminadas, y no requiere ningún tipo de protección por gas para una apropiada unión o trabajo de mantenimiento. Sin embargo, tiene la desventaja de tener bajo rendimiento de material, requiere habilidad, materiales de bajo espesor, presenta riesgos de fundir ambos materiales y su rápida oxidación, debido a la alta temperatura de fusión y la exposición del metal a la atmosfera; hecho que ha

sido de interés de ingenieros e investigadores para entender el comportamiento superficial, la microestructura del material de aporte y el metal base durante el proceso de fusión a fin de desarrollar formas tecnológicas que permitan un desempeño óptimo de la soldadura por arco.

Otro de los procesos de soldadura de arco eléctrico conocidos que no presenta las limitaciones de la soldadura de arco eléctrico protegido, *SAEP*, es la soldadura de arco eléctrico con blindaje o protección por un gas son el procedimiento de soldadura con varilla blindada por gas inerte (*MIG*) y el procedimiento de soldadura con varilla blindada por gas activo (*MAG*). En ambos procesos el metal de aporte es constante con inyección de flujo de gas continuo con el propósito de proteger el proceso de soldadura de la contaminación atmosférica.

Uno de los principales problemas del proceso de soldadura con material de aporte protegido o con gas es la discontinuidad cristalina del material, fenómeno que resulta en la falta de homogeneidad, el cual influye en las propiedades mecánicas, metalúrgicas o físicas del material. Este problema se produce al inicio o durante el proceso de fusión y son causadas entre varios factores por porosidad, fusión incompleta, penetración incompleta de la junta, defectos en el tipo de unión, y agrietamiento. Las propiedades mecánicas de un material determinan la resistencia del material sujeta a fuerzas externas e internas por cambios de temperatura, y es importante para la selección de materiales y la fabricación de máquinas y estructuras.

Son propiedades mecánicas y físicas de una material: el módulo de elasticidad, la resistencia a la tracción, resistencia a la fluencia, dureza, densidad, gravedad específica calor específico, conductividad térmica, coeficiente de expansión térmica y resistencia al impacto. De todas estas propiedades, la resistencia a la tracción, RT, es una de las propiedades de mayor interés para ingenieros e investigadores porque determina la fuerza máxima a la que está sometida un material antes que falle o se rompa.

Abundante bibliografía técnica sobre resistencia a la tracción de una unión o cordón de soldadura de metales ferrosos y no-ferrosos ha sido publicada en los últimos 50 años. Mishra et al (2014), analizó la resistencia mecánica del sistema de

soldadura de Tungsteno por protección gaseosa, TIG, y proceso MIG de dos metales disimiles, como acero dulce y acero inoxidable, respectivamente. Los resultados de este experimento mostraron la superioridad del proceso TIG sobre el MIG y el mejor desempeño del proceso de soldadura por arco con protección de un gas.

Este experimento también reveló la formación de grietas indicando que el fenómeno de discontinuidad es intrínseco a la soldadura por fusión. En el trabajo de Ilhe (2017), se estudió la resistencia entre la soldadura TIG y la soldadura SMAW. Ilhe halló que soldando por el proceso TIG, la resistencia a la tracción fue mayor que la soldadura SMAW, para ello tomó como referencia la resistencia a la tracción de una probeta sólida, la soldadura TIG alcanzó el 97% de resistencia respecto a un material sólido, mientras que la resistencia a la tracción fue del 83% respecto a una probeta sólida, indicando que la resistencia a la tracción del proceso TIG es 17% superior respecto al proceso de soldadura SMAW.

El buen desempeño de la soldadura por arco eléctrico blindado por un gas activo o inerte sobre un material base se debe a la menor concentración de esfuerzos residuales, lo cual mejora las propiedades mecánicas del material, incrementando su ciclo de vida; conforme lo reveló Dourado et al. (2014) en su estudio sobre la tecnología MAG y la soldadura laser. Si bien es cierto que la soldadura por arco eléctrico protegido por gas inerte, MIG o gas activo MAG presenta las propiedades mecánicas superiores a la de la soldadura SWAM o por arco eléctrico revestido; sin embargo, hasta donde los autores conocen, muy poca literatura se ha publicado acerca de la resistencia a la tracción del proceso de soldadura MAG respecto al proceso de soldadura SWAM en material base de acero suave o bajo carbono.

La soldadura MAG tiene la ventaja sobre el proceso MIG de usar gases activos como el O_2 o el CO_2 que son más comerciales y económicos que los gases inertes como el argón y el helio; por lo que el objetivo de esta investigación experimental fue evaluar el grado de resistencia a la tracción de las uniones soldadas por MIG/MAG y el de las SWAM. Se espera que la información de este estudio permita llevar a cabo

construcciones y prácticas de mantenimiento más confiables y competitivas.

Proceso de soldadura por arco eléctrico revestido

En el proceso de soldadura por fusión, el calor de fundición del metal se produce por arco eléctrico, donde el flujo de electrones pasa a través del metal de aporte, usualmente un electrodo metálico y el metal base o pieza de trabajo. El comienzo del proceso de soldadura por fusión se inicia formando un arco entre el metal de aporte, recubierto por un fundente o gas, cuya función es proteger de la oxidación y además crear estabilidad del arco y el metal base, como se muestra la Figura. 1. El trabajo eléctrico aplicado proporciona la acción de penetrar sobre el metal base (Lippold, 2015).

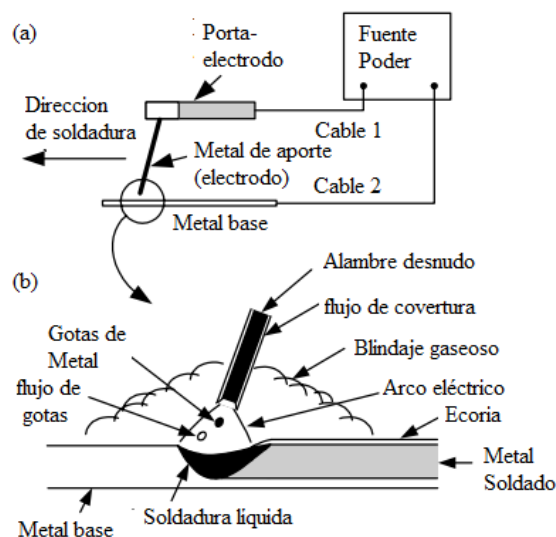


Figura 1. Soldadura blindada por arco eléctrico (a) proceso general, (b) área de soldado ampliada (Dourado, 2014).

El paso de flujo de electrones a través del metal de aporte se comporta como una resistencia eléctrica convirtiéndose la energía eléctrica en energía térmica dando lugar a que el calor generado llegue a temperatura por encima del punto de fusión del electrodo, el cual se derrite como gotas.

Metalurgia de soldadura

El principio básico del proceso de fusión de metales de aporte sobre un metal base por arco eléctrico es el mismo que el usado para fundir metales en un horno metalúrgico a gran escala o industrial. El agrietamiento del material de aporte constituye uno de los principales problemas de la

fusión por soldadura de arco eléctrico, cuyos factores causantes están relacionados a la microestructura del material, medio ambiente y tracción aplicada. Fusión y solidificación son dos procesos importantes que ocurren durante el proceso de fusión. La solidificación o proceso de estado sólido produce la unión del material base a una temperatura menor a la de fusión (fenómeno de coalescencia); sin la necesidad del metal de aporte. En este fenómeno están involucrados el tiempo, temperatura y la presión.

Cada uno de estos parámetros puede actuar de manera independiente o interrelacionada. En estado sólido ocurren varios procesos metalúrgicos: transformaciones de fase, reacciones de precipitación, recristalización, crecimiento de granos, etc. Uno de los efectos del fenómeno de estado sólido es la alteración significativa de la microestructura y las propiedades de la soldadura (metal de soldadura y zona afectada por el calor, HAZ) relativos al metal base. Cuando se altera la microestructura resulta en fragilidad, o agrietamiento de la soldadura. El agrietamiento ha sido estudiado que se debe a la presencia de películas de líquido o pérdida de ductilidad (Deyev, 2006). Otro problema que involucra la soldadura es la generación de esfuerzos internos alrededor de la soldadura, debido a la expansión térmica por calentamiento o contracción por enfriamiento. Ha sido demostrado que los esfuerzos que afectan la microestructura y las propiedades de la soldadura, y promueve la formación de grietas en regiones donde la deformación por tensión que resulta de los esfuerzos son mayores que la ductilidad del material (Weman, 2014; Talabi, 2015).

La Figura 2 exhibe el corte sección de la fusión de material de aporte y base, mostrando la región compuesta de fusión, zona de derretido (fusión con cambio de fase), la región afectada por el calor, y la región no afectada del metal base. Además entre el material base y la región parcialmente derretida se muestra la interfaz de soldadura. De todas estas regiones la de nomenclatura se caracteriza por exhibir una microestructura y propiedades diferentes a las otras regiones. La zona de fusión o compuesta corresponde a la región donde la fusión se ha completado y también resolidificado. Esta zona presenta una fusión distinta a las otras regiones. Para determinar la cantidad de metal base a que la soldadura ocupará una unión soldada, se usa la

expresión Dilución, el cual representa la cantidad de material de aporte respecto al metal base. El resto del material soldado corresponde al material de aporte (Figura 3).

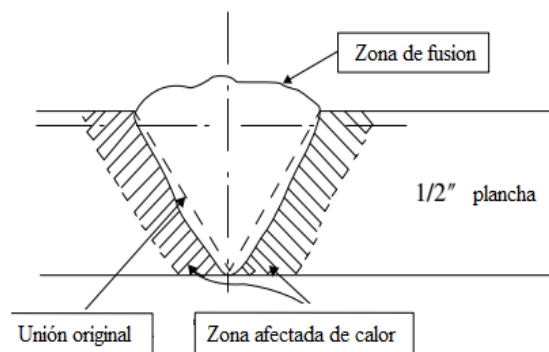
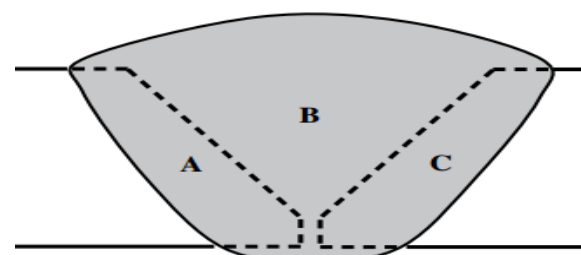


Figura 2. Distribución de las principales regiones en la fusión de soldadura (AWS, 2000).

La base del proceso de soldadura por fusión es la solidificación del material, comprende el cambio de fase de líquido a sólido. Este fenómeno podría causar reducción o contracción de volumen y formación de bolsas de aire si no se toman las precauciones (Jilum, 2013). La solidificación también causa esfuerzos internos y consecuentemente fisuras.

El desarrollo de la microestructura y la distribución de los componentes químicos dependen de la relación fase líquida a fase sólida, la temperatura del líquido, velocidad de solidificación, y velocidad de enfriamiento. Para que el material empiece a solidificarse, la formación de núcleos de partícula, en la parte líquida hace necesaria una determinada cantidad y tamaño de los núcleos, los cuales dependerán tanto de la temperatura de derretido y el diferencial de temperatura respecto al material subenfriado.



$$\text{Dilution (\%)} = \frac{A + C}{A + B + C} \times 100$$

Figura 3. Esquemática para la deformación de la Dilución (Kou, 2003).

La forma superficial en la que el material se va solidificando toma un aspecto ramificado según la parte líquida esté sobre-enfriado o subenfriado frente a la interfaz sólido-líquido. A mayor subenfriado mayor ramificación superficial de la soldadura solidificada. Parámetros que también afectan la formación de ramificaciones superficiales son la velocidad de solidificación y el gradiente de temperatura de la fase líquida (Kou, 2003, 23). La composición de la cantidad sólida, C_s , como líquida C_L , puede modelarse por la ecuación de Flemings como sigue:

$$\begin{aligned} C_s &= C_0 \left[1 - (1-k) \exp\left(\frac{-kRx_c}{D_L}\right) \right] \\ C_L &= C_0 \left[1 + \left(\frac{1-k}{k}\right) \exp\left(\frac{-kRx_c}{D_L}\right) \right] \end{aligned} \quad (1)$$

En un proceso de soldadura, la solidificación de la soldadura ocurre tanto a nivel macro como a nivel micro. A nivel macro la solidificación permite que los compuestos químicos aleados se redistribuyan, la fase sólida se incrementa y la caída de temperatura también. En cambio a nivel micro la redistribución de los componentes aleados en la fase líquida requiere una mezcla completa y la composición del líquido constante, y sin ninguna difusión en la fase sólida. La composición del sólido, a nivel micro, como función de la distribución del soluto, k , la fracción solidificada, f_s , es expresada por la ecuación de Scheil:

$$C_s = kC_0(1-f_s)^{k-1} \quad (2)$$

La fusión en la zona de microestructura varía ampliamente y está basada en el tipo de aleación y composición, así como el proceso de soldadura y condiciones. La zona de no-mezcla de la Figura 4 representa la fusión de la zona inmediatamente adjunta a la frontera de fusión.

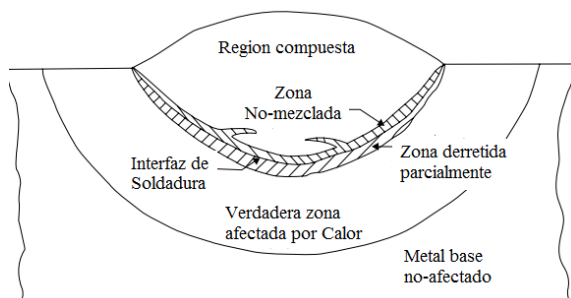


Figura 4. Esquemización de regiones formadas en el proceso de soldadura por fusión (Asibeluo, 2015).

La zona de no-mezcla es muy estrecha e insignificante. La zona parcialmente derretida representa una región de transición que puede estar completamente fundida o sólida, respectivamente. Su temperatura varía entre la aleación del líquido como la temperatura del sólido. La zona afectada de calor, como se muestra en la Figura 4 corresponde a la frontera entre la zona parcialmente mezclada y el metal base. Todas las reacciones que ocurran serán en estado sólido; por lo que ninguna reacción líquida o de fusión ocurrirá.

El comportamiento de la microestructura es muy complejo y está afectado por factores térmicos y de composición del material. Es una zona muy sensible a cambios de temperatura y ocurren muchas reacciones complejas tales como: recristalización, crecimiento de grano, transformación de fases, formación de precipitantes, esfuerzos residuales y de relajación. Durante el soldado, el rápido calentamiento o enfriamiento puede suprimir reacciones de equilibrio y promover otros tipos de reacciones. La zona afectada de calor presenta comportamiento de menor dureza que la zona de fusión para un pase de soldadura, debido a subestructuras solidificadas. Cuando se realizan pruebas de tensión de soldadura en materiales trabajados en frío, normalmente fallan en la zona afectada de calor que en el metal soldado.

Resistencia Mecánica de las Uniones Soldadas

Las propiedades que un metal soldado requiere para su medición, según la norma AWS o ASTM (Mishra, 2014) son dureza, resistencia a la tracción, punto de fluencia, y ductilidad. Diseños, ensambles y reparaciones por mantenimiento en la industria de la construcción son conformados para que resista sin falla a las fuerzas o giros sometidos externamente e internamente; por lo que la resistencia a la tracción del metal base y de aporte; y la zona afectada por el calor del material base (heat affected zone, HAZ) deben ajustarse a las consideraciones de diseño de la soldadura a fin de que los esfuerzos en dicha zona sean los mínimos. La resistencia a la tracción está determinada por la máxima carga que el área de sección soporta antes que se deforme como se ilustra en la Figura 5; y está expresado por la ecuación (3):

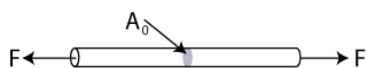


Figura 5. Esquematización de esfuerzo de tracción de partícula sometido a fuerza de tensión.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (3)$$

La deformación del metal base aparece usualmente cuando el material se extiende o elonga sin incrementarse la carga que se aplica, y es de característica plástica. Esta deformación plástica llamado fluencia está en dirección de la carga y va acompañado de una reducción del área seccional. Este comportamiento del material determina dos propiedades: el punto de fluencia y la resistencia de fluencia. El punto de fluencia marca el límite del estiramiento del material iniciado más allá del punto máximo de elasticidad y de etapa breve, mientras que la resistencia a la fluencia expresada matemáticamente por la ecuación (4), se le conoce también como esfuerzo de fluencia.

La deformación del material hasta el punto de fluencia es de naturaleza plástica, debido a que el material ya no vuelve a su estado sin tensión. Para cálculos de ingeniería y determinación la ecuación (4) simplifica la complejidad de las tensiones generadas en la superficie de una partícula de masa. Los esfuerzos generados como se indica en la Figura 6 sugiere que la acción de una fuerza externa o interna sobre una partícula de material produce esfuerzos normales, σ , y esfuerzos cortantes, τ , paralelos a la caras. Sin embargo, la tensión en cualquier plano es posible calcularlo a partir de cada esfuerzo de los tres planos ortogonales que pasan por la partícula. Como cada plano contiene tres tensiones, luego cada partícula su estado de tensión es descrito por nueve componentes de tensión, es decir, en cada una de las direcciones x, y y z, hay tres componentes que hacen un vector: esto es conocido como tensor de esfuerzos.

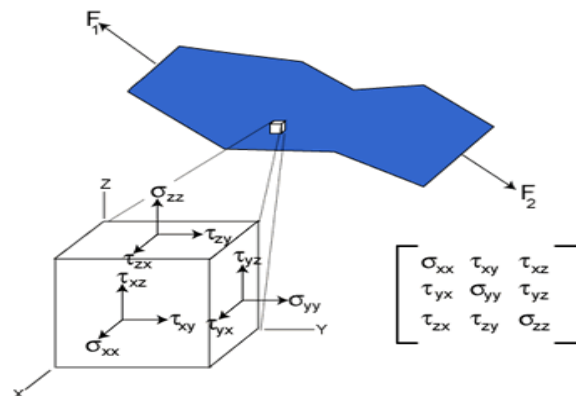


Figura 6. Tensiones generadas en un punto de partícula (Davis, 1992).

El diseño de elementos de máquinas o armaduras requiere que el área sea fija por lo que la zona de deformación plástica no puede ser usada, sino la zona elástica para diseño. En ingeniería la deformación o "strain" es expresada como la relación entre elongación del material y la longitud original del material, matemáticamente como:



Figura 7. Esquematización de elongación de partícula debido a fuerza de tensión.

$$\delta = \frac{\Delta L}{L} \quad (4)$$

donde δ es la deformación plástica o strain, ΔL es la elongación, y L es la longitud antes de la deformación (Figura 7). La importancia del parámetro deformación es que combinada con el parámetro esfuerzo permite comprender el comportamiento del material e identificar el punto máximo de elasticidad; así como el punto de rotura con respecto al grado de elongación. Otra de las propiedades mecánicas de los materiales constituye la dureza. Este parámetro evalúa la ductilidad del material base y de aporte, de manera particular aquellos materiales de alto contenido de carbones y aleación. Por ejemplo, una alta dureza indica que el material no tendrá una suficiente ductilidad; es decir, la capacidad de material para deformarse sin romperse. La dureza mide la capacidad de un material a la resistencia a

ser deformado plásticamente en un punto localizado. Además, la dureza da un rápido indicador de su soldabilidad. Según la dureza del material, tres son los métodos más empleados para medir la dureza: Brinell, Rockwell, y Vickers. El método de medición de la dureza está basado en la teoría que una predeterminada carga o fuerza de compresión constante aplicada a una superficie a través de un elemento de indentación mecánica o abrasión causa una determinada deformación plástica de penetración superficial en los enlaces intermoleculares. Según la composición de material, la dureza medida está relacionada a su microestructura.

La microestructura del material puede ser alterado debidos a: incremento en las cantidades de aleación, por rolado en frio, tratamiento térmico, entre otros. El tipo de dureza empleado depende del tamaño del área de soldadura a medir. La prueba Brinell es empleada para medir grandes áreas, tales como caras de soldadura de aporte o metal base. Para áreas pequeñas de soldadura, líneas de fusión, zonas afectadas por calor, ZAC, o cordones discontinuados de soldadura; las pruebas empleadas son Rockwell y Vickers (Ihle, 2017). Tanto la prueba de dureza Vickers como Rockwell son procedimientos similares, la diferencia está en el penetrador de forma piramidal de diamante a 136° de ángulo (Jilum, 2013). La dureza Vickers es obtenida mediante la ecuación:

$$HV = 1.852 \frac{F}{d^2} \quad (5)$$

donde HV es el valor de la dureza, F es la carga aplicada y d es el diámetro de la diagonal (promedio de dos diámetros).

METODOLOGÍA

El Objeto de estudio

Para evaluar experimentalmente los procesos de soldadura por arco eléctrico MIG/SAW y MAG, respectivamente, se emplearon probetas de acero al carbono ASTM A36 de geometría normalizada (Groover, 2010). Las probetas fueron cortadas y unidas con soldadura. Una unión de soldadura debe tener la capacidad de resistir una determinada carga sin romperse; sin embargo, su

resistencia mecánica va a depender fundamentalmente del material y la fusión de la soldadura de aporte. Siendo las propiedades mecánicas los indicadores que definen la resistencia del material; en el presente trabajo de investigación el cordón de soldadura para cada proceso de arco aplicado, fue tomado como objeto de estudio para evaluar su resistencia mecánica del cordón de soldadura por el procedimiento SMAW y MIG/MAG. Para la elaboración de las probetas se confeccionaron 35 unidades de una platina ASTM A36, de 3 mm de espesor por 25. mm de ancho y 6 m de 160 mm de longitud, según la norma ASTM E3.

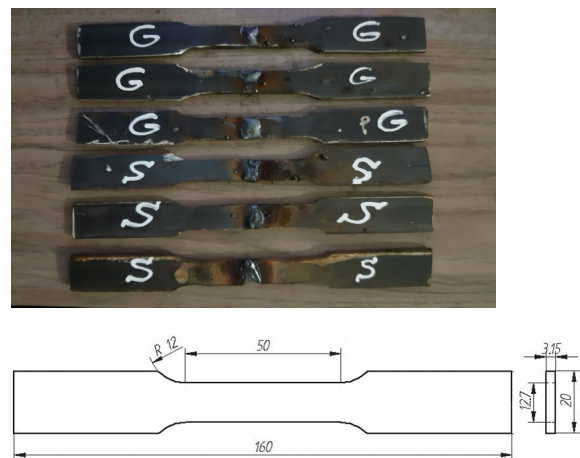


Figura 8. Preparación de probetas para pruebas experimentales por sistema.

De esta población de 35 probetas se seleccionó de manera aleatoria 14 unidades para llevar a cabo las pruebas experimentales. El número de muestras fue determinado arbitrariamente por el autor. Uno de los factores que determina la resistencia mecánica de un elemento u objeto es el material solido o de aporte, el cual está definido por sus propiedades mecánicas. De las varias propiedades que determinan el comportamiento de un material, en esta investigación se consideró como indicadores para evaluar la resistencia dos parámetros: la tracción y la dureza del material en la zona afectada de calor.

Para determinar los puntos de máxima elasticidad y fluencia, se tomó como variable independiente a la deformación o elongación del material; mientras que como variable dependiente al esfuerzo de tracción. Razones para seleccionar estos dos indicadores fueron la disponibilidad de equipo y el grado de sometimientos a que los elementos soldados están mayormente sometidos. Por otro lado, determinar la medición de dureza

del cordón de soldadura fue conocer el comportamiento la rigidez del material en la zona afectada por el calor de fusión.

Materiales, Aparatos y Equipos Instrumental

Para esta investigación, la Máquina de Prueba Universal, MPU, fue usada determinar la tracción mecánica de las probetas. Esta máquina, ubicada en el laboratorio de ingeniería mecánica de la Universidad Nacional de Trujillo, tiene una capacidad de tensión uniaxial de 1000 kN. Esta máquina tiene incorporado un servohidráulico y un controlador de sensores de fuerza, posición y deformación y convertidores a valores numérico.

Los valores del esfuerzo a la tracción, posición y la deformación se registran en un ordenador tipo PC. Para realizar la unión de soldadura se usó una máquina de soldar SWAM o de arco eléctrico. Para la unión de soldadura por arco con protección de gas activo fue argón. Otros instrumentos usados para este estudio fue un vernier escalado en milímetros y, el cual se empleó para medir asperezas presentadas en el cordón de soldadura. Para medir la dureza del cordón y el material base, se usó un durómetro.

Para soldar por el método SMAW se empleó una máquina de soldar marca “Sol Andina TC-230 de 25 V y 100 A de capacidad. El metal de aporte empleando fue electrodo AWS 6011AP de 3 mm de diámetro. Para el soldado por el procedimiento MAG se empleó una máquina de soldar marca “Telwin” de 21.3 V y 133 A de capacidad, y velocidad de avance de 9.80 m/s. El gas de protección fue Argon-CO₂, y el metal de aporte un alambre desnudo tipo 70 S3 de 0.90 mm de diámetro.

Metodología

Primeramente se seleccionaron dos grupos de probetas, de tres unidades cada grupo (Figura 5), las mismas que fueron cortadas simétricamente en dos partes, y luego se soldaron cada una de ellas por arco eléctrico mediante el método SMAW (S). El intervalo de tiempo entre cada probeta fue de 20 minutos, y a las mismas condiciones de temperatura y presión atmosférica, 20 °C y 1 atm. Previa a la unión con soldadura, las áreas de contacto de las probetas fueron liberadas de partículas sólidas retenidas y de asperezas resultantes del corte practicado. Los cortes de unión fueron transversales respecto a su largo. El soldado fue continuo según norma AWS (Ihle,

2017). Para la preparación de las probetas soldadas con el Procedimiento MIG/MAG (G) el procedimiento fue similar al procedimiento SMAW. Todas las probetas fueron liberadas de tensión por ligeros golpes con martillo antes de ser sometimiento a prueba. El procedimiento experimental para cuantificar la tensión consistió en colocar las probetas por cada una de sus extremos en los dos sujetadores o mordazas de manera firme. Luego se procedió a tensar axialmente cada probeta, mediante su sistema servo-hidráulico, partiendo de cero elongaciones hasta su estiramiento a punto de rotura.

Los datos de esfuerzo y elongación se registraron en el Modulo de Control, el cual tiene transductores de fuerza, posición y deformación que lo convierten a valores numéricos, y luego son registrados y graficados en el plano de manera cartesiana, el comportamiento entre el esfuerzo a la tracción, MPa versus elongación, mm. Se analizó el esfuerzo y deformación de la probeta testigo para evaluar el comportamiento entre una probeta no-soldada y otra soldada. Las pruebas para medir la dureza fueron conducidas según la norma ASTM E18, a condiciones ambientales de 20 °C y 1 atm. El equipo empleado fue un Durómetro “Analogico” Frank-Español instalado en el Laboratorio de resistencia de materiales de la escuela de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Nacional de Trujillo.

Se prepararon siete probetas, de las cuales tres se soldaron con el proceso MIG/MAG y las otras restantes con el proceso SMAW. Una probeta, como testigo, se mantuvo sólida y sin soldar. (SS). Las probetas fueron de material ASTM36 de 1/8” de espesor. La dureza se midió en unidades Rockwell, HRC, utilizándose para ello un indentador cónico Para causar penetración se aplicó una carga previa de 10 kg sobre la superficie soldada. El punto aplicado del indentador en el cordón de soldadura fue la zona fundida y en la zona ZAC (zona afectada por el calor), lugar donde se produce fisuras durante el proceso de soldadura.

Análisis estadístico de los datos experimentales

En este trabajo de investigación, la hipótesis fue que el procedimiento de soldadura SMAW presenta una mayor resistencia mecánica a la tracción que el procedimiento de soldadura MIG/

MAG. Para demostrar esta hipótesis y determinar su aceptación o rechazo, se definió que la hipótesis nula, $H_0 = 0$; es decir, si el valor promedio de los datos experimentales de tres replicas para cada procedimiento era menor que el valor a la probabilidad al 5% de confianza entonces se rechazaba la hipótesis, de lo contrario se aceptaba la hipótesis alternativa $H_1: \Theta_1 > 0$.

$$t = \frac{\bar{X} - \bar{Y}}{\sqrt{\frac{(n-1)s_x^2 + (m-1)s_y^2}{n+m-2} \left(\frac{n+m}{n \cdot m}\right)}} \quad (6)$$

$$gl = \frac{\left(\frac{s_x^2}{n} + \frac{s_y^2}{m}\right)^2}{\left[\frac{\left(\frac{s_x^2}{n}\right)^2}{n-1}\right] + \left[\frac{\left(\frac{s_y^2}{m}\right)^2}{m-2}\right]} \quad (7)$$

Para demostrar la prueba de hipótesis se usó la prueba estadística de Wilcoxon y t-student para muestras independientes y expresadas por la ecuación (6). Siendo \bar{X} y \bar{Y} valores promedios de las muestras de cada procedimiento evaluado, s_x y s_y la desviación estándar para cada procedimiento, n y m son el número de muestras para cada grupo, y gl el número de grados de libertad. La ecuación (7) determina el grado de libertad (Cochran, 1978).

RESULTADOS

Experimentos sobre probetas soldadas tanto con el procedimiento *SWAM* y *MIG/MAG* fueron conducidos con el objetivo de evaluar cuál de estos procedimientos presentaba las mejores propiedades mecánicas, analizando tres parámetros importantes: la tracción mecánica, deformación, y la dureza del área soldada. Las pruebas de tracción y dureza, respectivamente, se llevaron a cabo sobre probetas con cordón de soldadura aplicando el procedimiento de soldadura por arco, como con probeta sin soldadura. Los resultados hallados fueron probados usando la herramienta estadística llamada la *prueba t* y mostrado también como

resultado. La Tabla 1 exhibe resultados de valores promedios de esfuerzo a la tracción de probetas con cordón de soldadura empleando el procedimiento *SWAM* y *MIG*, respectivamente. El procedimiento *MIG/MAG* mostró mejores propiedades mecánicas con respecto al *SMAW*, debido a que su rotura se produce a mayores valores de esfuerzo. La elongación de la probeta soldada por procedimiento *MIG/MAG* fue mayor respecto al procedimiento por soldadura por arco eléctrico manual.

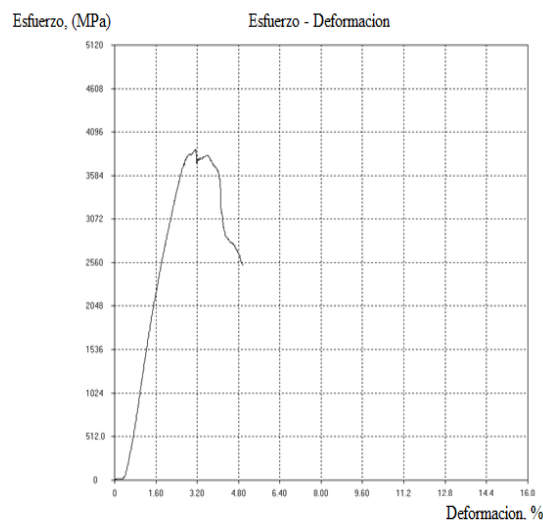


Figura 9. Diagrama esfuerzo-deformación de probeta #1 soldada por procedimiento SMAW.

Según la Tabla 1, el límite de máxima elasticidad del procedimiento *MIG/MAG* fue 35.85 % mayor al procedimientos *SMAW*; mientras que el límite máximo de rotura para el procedimiento *MIG/MAG* fue de 64.54 % más que el procedimiento *SMAW*. La deformación experimentada en las probetas soldadas para cada procedimiento aplicado indican que para el procedimiento *MIG/MAG* el grado es elasticidad fue 47.50% mayor que el procedimiento *SMAW*, pero 37.50% de capacidad de estiramiento respecto a una probeta.

Las Figuras del 9 al 15 exhiben que relacionan esfuerzos-deformación presentan mayores valores para el procedimiento *MIG/MAG*. Los valores de la deformación de la probeta están referidos a la ecuación (4) y al límite de fluencia.

Tabla 1. Resultados promedios de Tracción mecánica por SWAM y MAG.

| Grupo | Proceso | Deformación (%) | Límite Máxima Elasticidad (MPa) | Resistencia Máxima Rotura (MPa) |
|-------|---------|-----------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 1 | MIG/MAG | 26.17 | 3686.40 | 4039.00 |
| 2 | SMAW | 14.74 | 2713.60 | 2383.30 |
| 3 | SS | 43.20 | 4096.00 | 5120.00 |

SS: probeta no-soldada.

Esfuerzo-deformación de Cordón de Soldadura a la Tracción Mecánica por procedimiento SWAM

Las Figuras 9 al 14 muestran el comportamiento mecánico de las diferentes probetas de acero dulce ensayadas para la relación esfuerzo-deformación; para evaluar deformación elástica, límite de proporcionalidad, punto de fluencia, deformación plástica, máximo esfuerzo y punto de rotura. Para aquellas probetas soldadas por arco eléctrico. El esfuerzo máximo de rotura, se produjo entre 2304 a 2560 MPa. Para el caso de la probeta #3 (Figura 11), la rotura se originó cuando la deformación alcanzó el 30.40% de su valor inicial.

Las Figuras del 12 al 14, respectivamente, indican que para las probetas que fueron soldadas con el proceso MIG/MAG presentaron una curva de relación esfuerzo-deformación no similares entre ellas, ni tampoco con la curva de la Figura 15. Este comportamiento podría haber sido influenciado por tipo de procedimiento de soldadura empleado en las probetas; causando entre el metal base y de aporte una homogeneidad cristalina en su junta, metal base o la zona afectada por el calor durante la fusión del electrodo; mejorando las propiedades mecánicas del material.

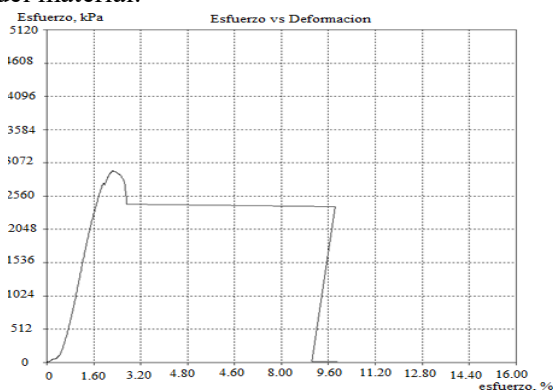


Figura 10. Diagrama esfuerzo-deformación de Probeta #2 soldada por procedimiento SMAW.

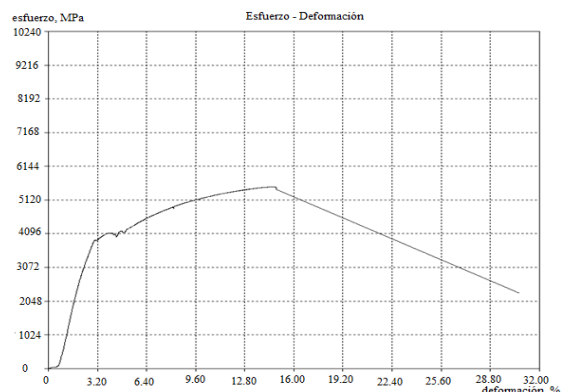


Figura 11. Diagrama esfuerzo-deformación de Probeta #3 soldada por procedimiento SMAW.

Esfuerzo-deformación de Cordón de Soldadura a la Tracción Mecánica por procedimiento MIG-MAG

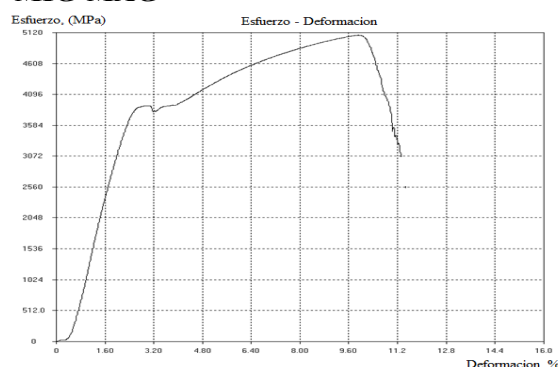


Figura 12. Diagrama esfuerzo-deformación de Probeta #4 soldada por procedimiento MIG-MAG.

Para el procedimiento de soldadura MIG/MAG, los esfuerzos de límite máximo de elasticidad promedio medidos fue de 3686.40 MPa. En cuanto al punto máximo de rotura, los esfuerzos variaron entre 3072 a 4403 MPa y la elongación alcanzó valores entre 11.2 a 41.60% de su valor inicial. Este procedimiento MIG/MAG respecto a la probeta sin cordón de soldadura, presentó una desviación del 10% para el esfuerzo a su máxima elasticidad, y un 22.67% al máximo punto de rotura y 39.42% para su deformación.

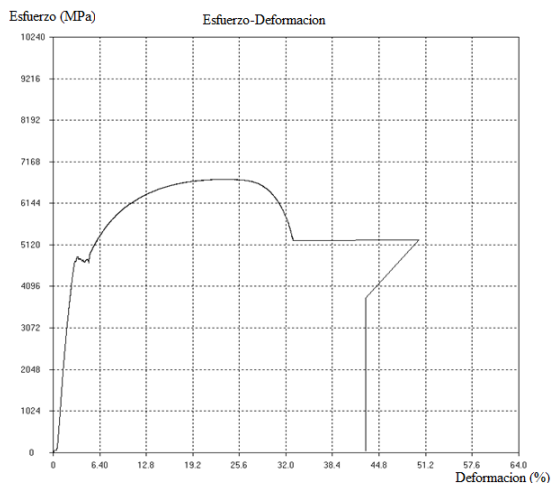


Figura 13. Diagrama esfuerzo-deformación de Probeta #5 soldada por procedimiento MIG-MAG.

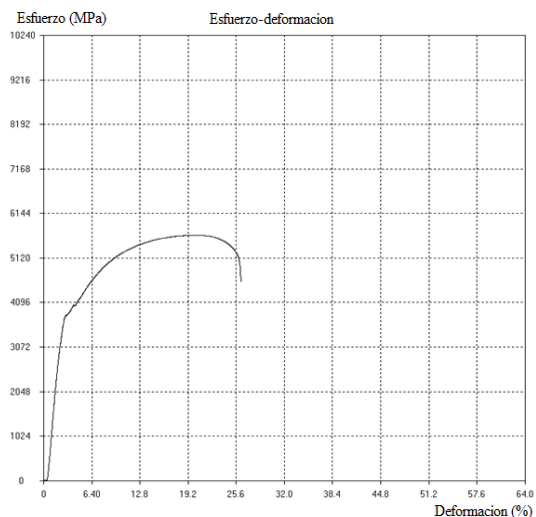


Figura 14. Diagrama esfuerzo-deformación de Probeta #6 soldada por procedimiento MIG-MAG.

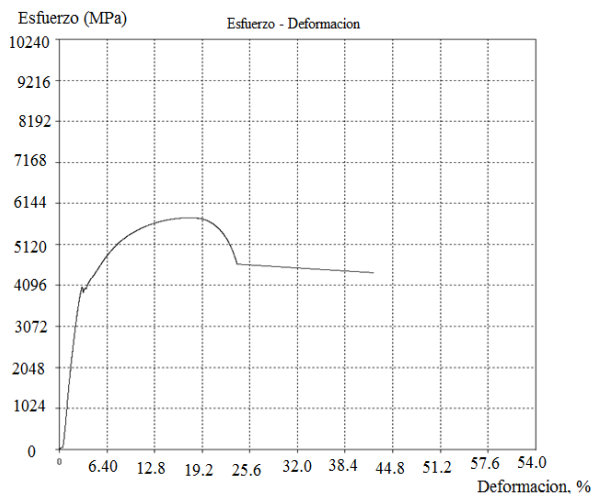


Figura 15. Diagrama esfuerzo-deformación de Probeta #5 sin cordón de soldadura.

Dureza de Cordón de Soldadura por procedimiento SWAM y MIG/MAG

La medición de la dureza, como propiedad mecánica, mide la resistencia del material a ser deformado plásticamente. La Tabla 2 indica valores de dureza en *RHC* de la zona afectada de calor, en los cordones de soldadura en las probetas, para los dos procedimientos ensayados y en probeta sin cordón.

Tabla 2. Resultados de Medición de Dureza de la Zona Afectada de Calor, de Cordón de soldadura según procedimiento.

| Grupo | MIG/MAG | SMAW | SS |
|----------|---------|-------|-------|
| | RHC | RHC | RHC |
| 1 | 28.50 | 29.50 | |
| 2 | 29.50 | 26.00 | |
| 3 | 30.50 | 27.00 | 20.00 |
| Promedio | 29.50 | 27.50 | 20.00 |

Fuente: Elaboración propia.

De los dos procedimientos ensayados, el procedimiento *MIG/MAG* presenta un 7.27% más de dureza que el procedimiento *SMAW*, pero 47.50% más que la dureza de la probeta sin soldar.

DISCUSIÓN

La teoría de la resistencia de materiales de elementos soldados sometidos a fuerzas externas experimentan un comportamiento elástico, elástico-plástico y plástico, respectivamente, indica que los materiales presentan una resistencia a la tracción mayor a la resistencia a la fluencia en materiales dúctiles (Ortiz, 1991).

Los resultados hallados no lleva a inferir que las probetas soldadas según procedimiento empleado con el material base y de fusión, el comportamiento esfuerzo y deformación estuvo en buena concordancia con la teoría referenciada (Figuras del 9 al 15). Aunque la zona plástica en cada probeta probada muestra un comportamiento distinto, una explicación es que tiene que ver con la deformación plástica experimentada en las probetas. Según la Tabla 1, el procedimiento *MIG/MAG* (grupo 1-G) presentó mayor deformación que el procedimiento *SMAW* (grupo 2-S). Este comportamiento estaría relacionado a un

incremento en su dureza; parámetro que relaciona la deformación plástica (Tabla 2). El procedimiento MIG/MAG funciona con un blindaje de gas protector, el cual durante el proceso de fusión entre el material de aporte y el metal base, estaría dando lugar a que la estructura cristalina del material y la zona afectada por el calor, sea a menor temperatura que cuando se usa el procedimiento *SMAW* (Pérez, 2018)

Esfuerzo-deformación de Cordón de Soldadura a la Tracción Mecánica por procedimiento SWAM

De acuerdo a la Tabla 1, los resultados hallados están en buena concordancia con los hallados por Ilhe (2017). Probables factores que influyeron en este comportamiento sería el blindaje del gas protector durante el proceso de fusión entre el material de aporte y el metal base, aspecto que harían que la estructura cristalina del material y la zona afectada por el calor, sea a menor temperatura que cuando se usa el procedimiento *SMAW* (Kou, 2003; Zappa, 2020). Este resultado también fue reportado por Ihle (2017), quien halló baja concentración de esfuerzos en cordones de soldadura con el procedimiento *MIG/MAG*. Aunque la probeta #2 respondió mecánicamente de manera atípica a partir del punto de fluencia, es probable que el cordón de unión haya presentado imperfección como discontinuidad cristalina afectado por otros parámetros como voltaje, dureza de material, etc. [Dorta, 2011; Abisuelo, 2015]. Esta imperfección podría que el límite de proporcionalidad varíe 2500 a 3800 MPa. Otro factor a considerar podría ser la calidad de corriente, fenómeno estudiado por García (2009).

Comparando la tracción mecánica de cada grupo de probetas ensayadas respecto al procedimiento de soldadura, los resultados sugieren que el procedimiento de soldadura *SMAW* podría reducir la capacidad a la tracción del material haciendo del material menos resistente a las fuerzas externas a las que son sometidas; con respecto a materiales soldados con el procedimiento *MIG/MAG*. Estos resultados indican que el proceso *MIG/MAG* se comporta con mejores propiedades mecánicas cuando está sujeto a fuerzas externas (Talabi, 2014; Pereira, 2015). Esta afirmación fue corroborada estadísticamente a través de la prueba-t, el cual no solo determina si existe diferencias significativas en sus propiedades mecánicas

representados por la relación esfuerzo-deformación entre ambos procesos, sino también el grado de desviación entre los procedimientos *SMAW* y *MIG/MAG*, respectivamente. Los resultados de aplicar la ecuación 6 y ecuación 7; para aceptar la hipótesis nula, $H_0 = 0$, que el procedimiento *SMAW* presenta mejores propiedades mecánicas a la tracción que al procedimiento *MIG/MAG*; de los datos de la Tabla 1, que para un valor t-experimental de $t = 3.41$, comparado con el t-estadístico, a 2 grados de libertad y 5% de confianza, y un valor $t = 2.92$ como valor crítico, se rechaza la hipótesis nula y se acepta que el procedimiento *MIG/MAG* presenta mejores propiedades mecánicas a la tracción, corroborando con la menor desviación de valores que presenta con una probeta sólida.

Dureza de Cordón de Soldadura por procedimiento SWAM y MIG/MAG

El incremento de dureza en el cordón ha sido explicado por Das et al (2015), el cual es causado por un incremento de la temperatura en la zona afectada de calor. Este incremento de la dureza por el procedimiento *MIG/MAG* explicaría que las probetas presentan más resistencia a ser deformadas que las probetas con soldadura *SMAW*, aumentando su resistencia a la tracción y su límite elástico. Esto podría estar influenciado por el blindaje del gas usado al producirse el proceso de soldadura. Este blindaje impediría una transferencia de calor con el ambiente. Además, el incremento de dureza respecto al material que no está soldado, lo que demostraría su efecto sobre la microestructura cristalina en el proceso de fusión del material de aporte y de base (Costa, 2015; Das, 2015). Los valores de dureza adquiridos durante las pruebas de ambos procedimientos, son relativamente bajos frente a valores de materiales cuyo contenido de carbón está por encima del 0.3 %, considerando la composición química del material usado en las probetas, de ASTM 36. Esta característica lo hace soldable aun cuando la dureza se eleva a valores de hasta el 50 % respecto al metal base sin soldadura.

A fin de determinar si existe diferencia significativa entre los valores de la dureza resultantes entre el procedimiento *MIG/MAG* y *SMAW*, se hipotetizó que el procedimiento *SMAW* produce cordones mas duros que el proceso *MIG/MAG*. Análisis estadístico utilizado a un nivel de significancia del 5% y grados de

libertad 3, resultado que el valor-t crítico para rechazar fue $t_{3,0.05} = 2.353$; por lo que para un valor calculado fue $t = 2.06$ (ecuac. 6), indicando que la hipótesis nula tuvo que rechazarse y aceptar la hipótesis alternativa que expresaba que el procedimiento MIG/MAG producía mayor dureza que el procedimiento SMAW.

Esta investigación fue llevada a cabo con probetas que estuvieron sujetas a tracción y fusión de térmicas; puesto que en condiciones reales y de aplicación industrial los elementos de máquinas o estructuras están sujetas a condiciones de fatiga y flexión; es posible que bajo estas condiciones los resultados varíen; por lo que este estudio debería replicarse con probetas sean sometidas a cargas de fatiga y flexión.

CONCLUSIONES

Pruebas experimentales se llevaron a cabo para realizar un análisis comparativo de la resistencia mecánica a la tracción y la dureza en probetas con cordones soldados por procedimiento MIG/MAG y SMAW, respectivamente. Análisis estadísticos de los resultados, usando la prueba-t de student, indicaron que el procedimiento MIG/MAG, presenta mejores propiedades mecánicas tanto a la tracción como a la dureza en los cordones de soldadura.

El límite de máxima elasticidad del procedimiento MIG/MAG fue 35.85 % mayor al procedimientos SMAW; mientras que el límite máximo de rotura para el procedimiento MIG/MAG fue de 64.54 % más que el procedimiento SMAW. Probables factores que influyeron en este comportamiento sería el blindaje del gas protector durante el proceso de fusión entre el material de aporte y el metal base, aspecto que harían que la microestructura cristalina del material y la zona afectada por el calor tengan un comportamiento diferente a cuando se usa el procedimiento SMAW. Asimismo, el procedimiento MIG/MAG produce menor concentración de esfuerzos.

La resistencia a la tracción entre la probeta soldada por MIG/MAG respecto a la probeta no-soldada (SS) sufre una reducción en su límite máximo de elasticidad en 11.11 % mientras que en su límite máximo de rotura en 29.31%. Esto

corroborar la menor capacidad de rotura de los materiales soldados respecto al no-soldado. La dureza de los cordones de soldadura de las probetas de ambos procedimientos mostró un incremento respecto a la probeta no soldada, aspecto que mejora la capacidad de deformación del material.

REFERENCIAS

- Asibeluo I.S. y Emifoniye E (2015). Effect of Arc Welding Current on the Mechanical Properties of A36 Carbon Steel Weld Joints. *SSRG-International Journal of Mechanical* 2(9).
- AWS Committee on Methods of Inspection (2000). *Welding Inspection Handbook*, (3rd Edit.), American Welding Society Pub. 106-109.
- Chainarong, S., Sitthipong, S., Meengam, C., Muangjunburee, P. y Tehyo, M. (2016). A comparative study: Life extension of weld surfacing of AISI 4340 high tensile strength Low Alloy Steel. *Journal of Engineering and Applied Sciences* 11(7), 1644-1649.
- Cochran W. G., Cox G. M. (1978). *Diseños Experimentales*. Editorial Trillas.
- Costa P. S. et al. (2015). Optimización de los Parámetros de Soldadura por Arco Sumergido en Acero HSLA: una Aplicación para Manufactura de Tuberías de Conducción de Hidrocarburos”, *Soldagem & Inspeção*, 20(4), 456-466.
- Das C. R., Bhaduri A. K., Lakshmi S., Chakravarty S., Kar S. K, y Albert S. K. (2015). Influence of boron and nitrogen on the affected zone of modified 9Cr–1Mo steel—Gleeble simulation study, *Welding in the World*. 59, 1-7. <https://link.springer.com/article/10.1007/s40194-015-0226-3>.
- Davis A.C. (1992). *The science and practice of welding*, (10th edit.), Cambridge University Press.
- Deyev G. y Deyev D. (2006). *Surface Phenomena in Fusion Welding Processes*. Taylor and Francis Pub.
- Dorta-Almenara, M., Vidal, J., Mateo, A., Fargas, G. y Camejo, F. (2011). Modelos empíricos para la predicción de la geometría del cordón en soldadura a tope

- de un acero inoxidable dúplex 2205. *Dyna*, 78(169), 206-215. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0012-73532011000500024&lng=e&nrm=iso
- Dourado M., Soares D., Barbosa J., Marques A., Meireles J., Branco P., Ribeiro C., Rei C. (2014). A comparative study of fatigue behaviour of MAG and laser welded components using reliability analysis, *Materials Science & Engineering A*, 606, 31-39.
- Durgutlu, A., Gülenç, B. y Tülbentçi, K. (199). The effect of welding speed on the microstructure and penetration in arc welding. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Science*. 23(4), 251-259.
- García A., Gómez C. R., Rivera O. M., Oriol V. M. (2009). Comportamiento del tiempo de duración, la frecuencia de los cortocircuitos y la conductividad eléctrica durante el reencendido del arco en la soldadura SMAW (AC) con electrodos E6013. *Soldag. Insp.* 14(1), 66-73.
- Groover M.P. (2010). *Fundamentos de manufactura externa*, (3era ed.), McGraw-Hill Pub.
- Ilhe M. (2017). Strength analysis of TIG and SMAW welding. *International Journal of Advance Research and Innovative Ideas in Education*, IJARIE, 3(4), 1754-1763.
- Jilum P. (2013). *Arc Welding Control*. CRC Press.
- Kou S. (2003). *Welding Metallurgy*. (2nd Edit.) John Wiley.
- Lippold J.C. (2015). *Welding Metallurgical and Weldability*. John Wiley & Son.
- Llallor, L. (1987). Tubular cored welding wires – the state of the art. *FWP journal*, 27(5). 6-32.
- Martínez-Conesa, E.J., Estrems, M. y Miguel, V. (2010). A mathematical approach based on finite differences method for analyzing the temperature field in arc welding of stainless steel thin sheets. *Revista de Metalurgia*, 46(6), 511-519
- Mishra R.R., A study of tensile strength of MIG and TIG welded dissimilar joints of mild steel and stainless steel, *International Journal in Material Science and Engineering*, 3(2), 23-31.
- Ortiz_Berrocal, L. (1991). *Resistencia de materiales* (3ra ed.). McGraw-Hill/Interamericana de España.
- Pereira, A.S., Buschinelli, A.J.A. y Kejelin, N.Z. (2015). Evaluation of burn-through in MIG/MAG welding of high-strength, low thickness pipelines. *Welding International*. 29(9), 681-688.
- Pérez-Cepeda J. A. y Olaya-Flórez J. J. (2018). Influencia del tipo de electrodo sobre la microestructura y el coeficiente de rozamiento obtenido por ensayo de deslizamiento a recubrimientos duros depositados por soldadura SMAW”. *Ingeniería y Desarrollo*, 36(2), 327-342.
- Talabi S. I., Owolabi O. B., Adebisi J.A. y Yahaya T. (2014). Effect of welding variables on mechanical properties of low carbon steel welded joint. *Advances in Production Engineering & Management*, 9(4), 181-186.
- Weman K. (2012). *Welding processes handbook* (2nd ed.). Woodhead Publishing.
- Zappa S., Martínez J. y Svoboda H. (2020). Efecto del calor aportado y la cantidad de capas sobre la evolución microestructural en recargues de acero inoxidable dúplex. *Soldag & Insp.* 25(1-3), 1-13. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/si25.10>