

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

CARACTERIZACIÓN DE JUNTAS EN T SOLDADAS BAJO PROCESO GTAW (GAS TUNGSTEN ARC WELDING) EN PLACAS PLANAS DE 3MM DE ESPESOR, DE ACERO INOXIDABLE AISI

430

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

HUGO DANIEL MORENO MORALES

DIRECTOR: ING. WILLIAN LEOPOLNO MONAR MONAR M.Sc.

DMQ, marzo 2022

CERTIFICACIONES

Yo, HUGO DANIEL MORENO MORALES declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

Hugo Daniel Moreno Morales

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por HUGO DANIEL MORENO MORALES, bajo mi supervisión.

Ing. Willan Monar, M.Sc.
DIRECTOR

Certificamos que revisamos el presente trabajo de integración curricular.

NOMBRE_REVISOR1
REVISOR1 DEL TRABAJO DE
INTEGRACIÓN CURRICULAR

NOMBRE_REVISOR2
REVISOR2 DEL TRABAJO DE
INTEGRACIÓN CURRICULAR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el producto resultante del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

Hugo Daniel Moreno Morales

Ing. Willian Monar M.Sc.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de titulación a mis padres, Hugo y María quienes, con su paciencia, apoyo, esfuerzo, sacrificio y amor me han permitido culminar hoy mi gran sueño de niño, gracias por inculcar en mí, el espíritu de justicia, lucha y valentía.

A mi hermana Jaqueline por su cariño y apoyo incondicional. A mi hermana Belén por su paciencia y apoyo. A mi hermana Karina quien siempre ha estado presente con sus palabras de aliento.

Finalmente quiero dedicar este trabajo a mi yo de la infancia quien nunca dejo de soñar que era posible.

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi agradecimiento a mi familia por su apoyo y sacrificio.

A ti Andrea por ser incondicional y darme fuerzas para seguir adelante.

A todos mis amigos y amigas por todo lo que vivimos y superamos juntos.

A todas aquellas personas que se interesaron en mi y me extendieron una mano sin pensarlo.

Agradezco a mis docentes, por haber compartido sus conocimientos y experiencias.

ÍNDICE DE CONTENIDO

| | |
|--|------|
| CERTIFICACIONES | I |
| DECLARACIÓN DE AUTORÍA | III |
| DEDICATORIA | IV |
| AGRADECIMIENTO | V |
| RESUMEN | VIII |
| ABSTRACT | IX |
| 1. DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO | 1 |
| 1.1 Objetivo general | 1 |
| 1.2 Objetivos específicos | 1 |
| 1.3 Alcance | 1 |
| 1.4 Marco teórico | 2 |
| 1.4.1 Aceros Inoxidables | 2 |
| 1.4.2 Principales elementos aleantes | 2 |
| 1.4.3 Clasificación de los aceros inoxidables | 3 |
| 1.4.4 Diagrama de fases Hierro – Cromo | 5 |
| 1.4.5 Propiedades y aplicaciones AISI 430 | 7 |
| 1.4.6 Soldabilidad de los aceros inoxidables ferríticos AISI 430 | 8 |
| 1.4.7 Análisis de soldadura por elementos finitos | 8 |
| 1.4.8 Análisis térmico | 9 |
| 1.4.9 Análisis estructural | 10 |
| 1.4.10 Modelo matemático de la fuente de calor | 11 |
| 2. METODOLOGÍA | 13 |
| 2.1. Caracterización del material base | 13 |
| 2.1.1 Ensayo de espectrometría | 13 |
| 2.2. Soldadura GTAW | 14 |
| 2.3. Variables del proceso de soldadura para el acero AISI 430 | 15 |
| 2.3.1 Intensidad de corriente | 15 |
| 2.3.2 Velocidad de avance | 15 |
| 2.3.3 Densidad de potencia | 16 |
| 2.3.4 Temperatura de precalentamiento | 16 |
| 2.3.5 Material de aporte | 16 |
| 2.3.6 Gas de protección | 17 |
| 2.4. Especificación del procedimiento de soldadura (WPS) | 17 |

| | |
|---|----|
| 2.5. Ejecución de los cordones de soldadura y obtención de datos experimentales | 17 |
| 2.5.1 Obtención de probetas para soldadura | 18 |
| 2.5.2 Ejecución del cordón de soldadura | 19 |
| 2.5.3 Obtención de datos experimentales | 20 |
| 2.6 Ensayos normalizados | 23 |
| 2.6.1 Inspección visual | 23 |
| 2.6.2 Ensayo de rotura de filete | 23 |
| 2.6.3 Ensayo de metalografía | 25 |
| 2.7 Simulación | 26 |
| 2.7.1 Simulación térmica mediante ANSYS | 26 |
| 2.7.2 Simulación estructural mediante ANSYS | 32 |
| 3. RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 34 |
| 3.1. Resultados | 34 |
| 3.1.2 Resultado del ensayo de rotura de filete | 35 |
| 3.1.3 Resultado del ensayo de Macrografía | 35 |
| 3.1.4 Resultados del ensayo de espectrometría | 36 |
| 3.1.4 Resultados de la simulación térmica | 37 |
| 3.1.4 Resultados de la simulación estructural | 39 |
| 3.2. Conclusiones | 43 |
| 3.3. Recomendaciones | 43 |
| 4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 45 |
| 5. ANEXOS | 47 |

RESUMEN

El presente proyecto tuvo como objetivo caracterizar juntas en T soldadas bajo proceso GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) en placas planas de 3mm de espesor de acero inoxidable AISI 430, mediante un análisis de elementos finitos. El proyecto se llevó a cabo en dos partes enlazadas, la primera parte fue la experimental que se fundamentó en la norma AWS D1.6, por lo cual se preparó y soldó las placas según los parámetros establecidos por la norma para juntas en T; una vez obtenida la junta está fue sometida a evaluación bajo los criterios de aceptación de la norma a través de un ensayo de rotura de filete y macrografía; se realizó a demás la toma de datos experimentales de temperatura en la inmediaciones del cordón durante su soldadura y datos de deformación una vez enfriada la junta. La segunda parte del proyecto se basó en la teoría de simulación de procesos de soldadura de Goldak; por lo que se llevó a cabo un análisis de elementos finitos térmico y estructural con ayuda del software ANSYS 2020. Finalmente, los resultados obtenidos en los análisis de elementos finitos fueron validados mediante la comparación realizada con los datos experimentales generados en la primera parte del proyecto.

PALABRAS CLAVE: Soldadura, AISI 430, elementos finitos, Goldak

ABSTRACT

The objective of this project was to characterize T-joints welded under the GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) process in 3 mm thick flat plates of AISI 430 stainless steel, through finite element analysis. The project was carried out in two linked parts, the first part was the experimental one based on the AWS D1.6 standard, for which the plates were prepared and welded according to the parameters established by the standard for T-joints; Once the joint is obtained, it is subject to evaluation under the acceptance criteria of the standard through a fillet breakage test and macrography; In addition, experimental temperature data were taken in the cord mediations during welding and deformation data once the joint had cooled. The second part of the project was based on Goldak's welding process simulation theory; Therefore, an analysis of thermal and structural finite elements was carried out with the help of ANSYS 2020 software. Finally, the results obtained in the finite element analyzes were validated by comparing them with the experimental data generated in the first part of the project.

KEYWORDS: Welding, AISI 430, finite elements, Goldak.

1. DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

En el presente proyecto se muestra el desarrollo tanto de la parte teórica como práctica del proyecto de integración curricular. Se inicia realizando una recopilación bibliográfica de las propiedades, características y soldabilidad del material, así como de la teoría de simulación de soldadura y modelado de la fuente calor. Luego se describen los procedimientos y métodos utilizados para la ejecución del proceso de soldadura, realización de ensayos normalizados, obtención de datos experimentales y análisis de elementos finitos térmico y estructural. Posteriormente, se muestran los resultados obtenidos en los análisis de elementos finitos y se efectúa su comparativa con los resultados obtenidos experimentalmente, se muestran por último los resultados obtenidos en los ensayos normalizados.

1.1 Objetivo general

Caracterizar juntas en T soldadas bajo proceso GTAW en placas planas de 3 mm de espesor, de acero inoxidable AISI 430, mediante un análisis de elementos finitos.

1.2 Objetivos específicos

1. Elaborar probetas normalizadas de juntas tipo T soldadas del material en cuestión y evaluar sus propiedades mediante el uso de ensayos destructivos y metalográficos bajo la norma AWS D1.6.
2. Simular el comportamiento de juntas soldadas tipo T en placas planas mediante el análisis de elementos finitos térmico y estructural de la junta empleando el software ANSYS.
3. Validar el método de elementos finitos al realizar la comparación y cálculo de error respecto a datos experimentales.

1.3 Alcance

El presente proyecto busca caracterizar el comportamiento de juntas en T de 3 mm de espesor de acero inoxidable ferrítico AISI 430 soldadas bajo proceso de soldadura GTAW (Gas Tungsten Arc Welding), por medio de un análisis de elementos finitos. La soldadura y calificación de desempeño de la junta se realizará acorde a los requerimientos de la norma AWS D1.6. El análisis de elementos finitos se desarrollará acorde a la teoría de simulación de soldadura de Goldak empleando software ANSYS en su versión 2020 y su validación se efectuará mediante la comparación de datos obtenidos experimentalmente.

1.4 Marco teórico

En este apartado se describe las propiedades de los aceros inoxidable en función de sus elementos aleantes, su clasificación respecto a su microestructura, se realiza un análisis del diagrama de fase hierro – cromo, se repasa además las propiedades físicas, mecánicas, químicas y aplicaciones del acero AISI 430; adicionalmente se explican los problemas que presenta su soldadura. Se describe la simulación por elementos finitos del proceso de soldadura desglosando el análisis térmico y estructural. Por último, se describe el modelo matemático de fuente de calor a usar en la simulación.

1.4.1 Aceros Inoxidables

Se conocen como aceros inoxidable a aquellas aleaciones de hierro-carbono en cuya composición química se encuentra presente al menos un 10.5% de cromo en peso. La presencia de este elemento lo hace resistente a la corrosión en cualquier tipo de ambiente, ya que este reacciona con el oxígeno del aire circundante y genera una capa pasiva de óxido de cromo que protege al acero, dicha capa es extremadamente fina e invisible, pero se adhiere completamente al metal y en caso de que esta sufra daño se regenera automáticamente. [1] y [2]. Por su alta resistencia a la corrosión, ductilidad y elevada resistencia mecánica los aceros inoxidable son empleados para la fabricación de tuberías, insumos médicos, generación de energía eléctrica, tanques petroleros, etc.

Mientras mayor contenido de cromo esté presente en el acero mayor será la resistencia de este a la corrosión, aunque se tiene como techo máximo un contenido del 30% en peso, además de agregar cromo para aumentar la resistencia del material se puede optar por agregar otros elementos aleantes como el níquel, manganeso, silicio o molibdeno [2]. Cada uno de estos elementos adicionales proporcionará al material propiedades específicas.

1.4.2 Principales elementos aleantes

Como se mencionó anteriormente se pueden añadir más elementos a la aleación de acero inoxidable, estos se añaden con el objetivo de mejorar cualidades específicas del material como su maquinabilidad, dureza, ductilidad o aumentar la

propia resistencia a la corrosión proporcionada por el cromo. A continuación, se realiza un compendio de los principales elementos aleantes que se agregan y su efecto sobre el comportamiento del material:

El cromo es el responsable directo de la formación de la película protectora de óxido de cromo que genera la resistencia del acero a la corrosión, su presencia además promueve la formación de ferrita. En una aleación de tipo ferrítica permite estabilizar la microestructura y un alto contenido provoca una baja tenacidad y ductilidad porque promueve la creación de carburos.

La presencia de níquel en la aleación mejora principalmente las propiedades mecánicas del material, puesto que permite aumentar la dureza y la resistencia a la fatiga [2]. Este elemento además promueve la formación de austenita y en una proporción idónea permite obtener austenita a temperaturas ambiente, aumenta la resistencia a la corrosión en líquidos no oxidantes.

La incorporación de molibdeno en la aleación permite mejorar la resistencia a la corrosión del material al ser sometido a altas temperaturas y a medios no oxidantes además de aumentar la resistencia a la corrosión por picadura. Su presencia fomenta la formación de ferrita lo cual en aceros martensíticos puede provocar una reducción de la ductilidad y dureza del material. [1]

La adición de manganeso como elemento aleante no tiene efecto sobre las propiedades mecánicas del material [2]. Su función principal es la de actuar como estabilizador en la formación de martensita a bajas temperaturas mientras que a elevadas temperaturas actúa como un estabilizador de ferrita.

El silicio se encuentra presente en todas las aleaciones su principal función es la de desoxidar durante la fusión. Su presencia en porcentajes en peso de entre 4% y 5% mejora la resistencia a la corrosión, pero puede formar silicatos de hierro y de cromo los cuales son compuestos intermetálicos que causan fragilidad en el material.

1.4.3 Clasificación de los aceros inoxidables

Según su composición química los aceros inoxidables pueden generar hasta 130 combinaciones diferentes de aleaciones las cuales de acuerdo a su microestructura

pueden clasificarse en cinco grandes grupos: ferríticos, martensíticos, austeníticos, dúplex y endurecidos por precipitación.

Los aceros inoxidable ferríticos son conocidos como aceros inoxidable de cromo directo y pertenecen a la serie 400 AISI (American Iron & Steel Institute). Se caracterizan principalmente por poseer una estructura ferrítica inalterable en todo el rango térmico porque no presentan ningún cambio de fase durante el calentamiento o enfriamiento, esta característica se debe a su bajo contenido de carbono lo que a su vez limita su capacidad de ser templado [2].

Poseen una gran resistencia al pitting (picadura) y a la corrosión provocada por cloruros. No se recomienda su uso en ambientes con temperaturas criogénicas por su baja resistencia al impacto. Se los usa en la fabricación de tubos de intercambiadores de calor, tubos de escape, tanques de radiadores, etc.

Los aceros inoxidable martensíticos son los primeros aceros inoxidable desarrollados y al igual que los aceros ferríticos, pertenecen a la serie 400 AISI (American Iron & Steel Institute), pero a diferencia de estos se caracterizan por su alto contenido en carbono lo cual les permite ser sometidos a endurecimiento por tratamiento térmico de temple.

Se caracterizan por tener una excelente resistencia mecánica y una menor resistencia a la corrosión que sus pares austeníticos y ferríticos, por su bajo costo y buenas propiedades mecánicas son utilizados comúnmente en la fabricación de cuchillería, instrumentos quirúrgicos, aspas de turbinas, etc. [3]

Los aceros inoxidable austeníticos se caracterizan por poseer al menos un 8% de peso de níquel por lo que se los conoce como aceros inoxidable cromo níquel y pertenecen a la serie 200 y 300 AISI (American Iron & Steel Institute). El níquel es agregado a la aleación con el fin de evitar la transformación de la austenita y hacer la estructura estable, incluso a temperaturas menores a la temperatura ambiente provocando que al igual que su par ferrítico posean una inalterable estructura en todo el rango térmico lo que no les permite ser endurecidos por tratamiento térmico. [1] y [3]

Poseen una excelente ductilidad y una elevada resistencia a la corrosión excepto en ambiente con presencia de cloruros, presentan mayor grado de soldabilidad que

sus pares ferríticos y austeníticos, su excelente desempeño a bajas temperaturas lo hace ideal para la construcción de equipos criogénicos, gracias a su buena ductilidad son utilizados en la fabricación de acabados arquitectónicos.

Los aceros inoxidable tipo dúplex se caracterizan por poseer un balance entre ferrita y austenita lo que les permite combinar sinérgicamente las propiedades de ambos tipos de aceros; para lograr que la austenita y ferrita se estabilicen es necesario añadir níquel, nitrógeno y molibdeno a la aleación; la presencia de la ferrita le permite resistir medios acuosos mientras que la austenita le confiere ductilidad, su microestructura se mantiene en todo el rango térmico por lo que no pueden ser endurecidos [2].

Las excelentes propiedades mecánicas y resistencia a la corrosión de los aceros dúplex, en presencia de cloruros los convierten en el acero inoxidable con las mejores características; son empleados en la industria marina para la fabricación de plataformas petroleras marítimas [3]. Se los utiliza también, en la construcción de intercambiadores de calor, cuerpos de válvulas de agua de mar, etc.

Los aceros inoxidable endurecidos por precipitación, presentan alta resistencia mecánica, su composición principal tiene como base cromo y níquel a estos se añaden elementos capaces de provocar un endurecimiento por precipitación tales como el molibdeno, titanio, nitrógeno, cobre, boro, etc.; su buena resistencia a la indentación y rayadura se da por envejecimiento, debido a su microestructura pueden ser de tipo austeníticos, martensíticos y semiausteníticos [3]. Su alta resistencia, buena resistencia a la corrosión y su buena soldabilidad los hace perfectos para la construcción de tanques de combustibles, componentes aeroespaciales, tubos de sobrecalentamiento de calderas, entre otros.

1.4.4 Diagrama de fases Hierro – Cromo

Este diagrama permite determinar las fases presentes en una aleación respecto a la temperatura y a la cantidad de elemento aleante presente, se debe considerar que estos diagramas se encuentran a presión atmosférica, por tanto, constante. La Fig. 1.1 muestra el diagrama de fases hierro – cromo, el cual por medio del porcentaje de cromo permite identificar todas las familias de aceros inoxidable.

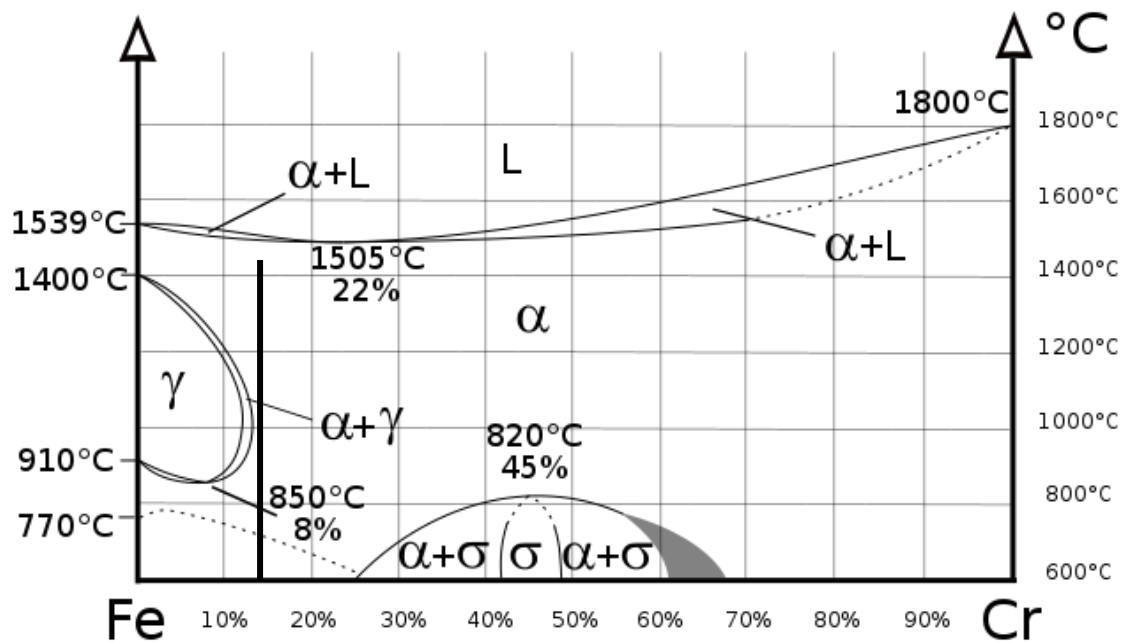


Fig. 1.1 Diagrama de fase hierro-cromo. [4]

Todas las aleaciones con un contenido mayor al 13% de cromo tienen una microestructura ferrítica (α), en todo rango térmico hasta el punto de fusión, estas aleaciones, no experimentan un cambio de fase de ferrita (α) a austenita (γ) y por ende no se pueden templar, ya que no se podrá obtener una microestructura martensítica. Es por ello que estas aleaciones toman el nombre de aceros inoxidable ferríticos [4].

El diagrama permite observar que la microestructura austenítica o fase gamma existe únicamente en aleaciones cuyo contenido de cromo es menor a 13% y en un rango de temperaturas entre 910 °C y 1400 °C. Esta fase se ve influenciada directamente con el contenido de carbono de la aleación porque este es un elemento austenizante y puede provocar un aumento de la misma. Las aleaciones cuyo contenido de cromo son menores al 12% tendrán una única fase gamma, lo que les permite transformar la microestructura austenítica en martensítica por temple.

Las aleaciones cuya composición de cromo varía entre el 12% y 13% presentan una microestructura bifásica de austenita y ferrita, estas coexisten a elevadas temperaturas lo cual permite que puedan ser endurecidos por medio de un tratamiento térmico de temple. Su característica microestructura bifásica es la raíz de su denominación de aceros inoxidable dúplex.

El diagrama permite además identificar una zona sigma (σ), que se presenta en aleaciones cuyo contenido de cromo se encuentra entre un 25% y 68%; dentro de un rango de temperaturas de 600 °C a 820 °C, esta fase corresponde a un compuesto intermetálico que

posee una estructura tetragonal la cual se caracteriza por su alta dureza y fragilidad; la fase sigma (σ) coexiste junto a la ferrita (α) en aleaciones cuyo contenido de cromo se encuentre entre 25% y 42 % o en aleaciones cuyo contenido de cromo varié entre 48% y 68%. Aleaciones con un contenido de cromo de entre 42% y 48% presentan una única fase sigma.

1.4.5 Propiedades y aplicaciones AISI 430

De acuerdo a su microestructura el acero AISI 430, pertenece al grupo de aceros inoxidables ferríticos y su microestructura es inalterable en todo el rango térmico por lo que no son susceptibles de endurecimiento. Dentro de su composición química destaca su alto contenido de cromo lo que le brinda excelentes propiedades anticorrosivas [1]. En la Tabla 1.1 se detallan su composición química, propiedades físicas y propiedades mecánicas.

Tabla 1.1 Propiedades acero AISI 430 [5]

| Composición Química | | | | |
|-------------------------------|------------------------------|----------------|-----------------------------------|-------------|
| Carbono [C] | Cromo [Cr] | Manganeso [Mn] | Silicio [Si] | Fosforo [P] |
| ≤ 0.12% | 16 - 18% | ≤ 1 % | ≤ 1% | ≤ 0.04% |
| Propiedades Mecánicas | | | | |
| Dureza [HRB] | Límite de fluencia [Mpa] | | Resistencia última tracción [Mpa] | |
| 89 | 205 | | 450 | |
| Propiedades Físicas | | | | |
| Densidad [Kg/m ³] | Conductividad Térmica [W/mK] | | Punto de fusión [°C] | |
| 7800 | 26.1 | | 1510 | |

Gracias a su buena ductilidad respecto de sus pares de estructura martensítica, alta resistencia a la corrosión, oxidación a elevadas temperaturas resistencia a picaduras y resistencia a la corrosión en medios acuosos inmersos en cloruros. Industrias como la química, construcción, automotriz y alimenticia usan frecuentemente el acero ferrítico AISI 430 en la fabricación de revestimientos, techos, mostradores, piletas, molduras automotrices, equipos para procesos con ácido nítrico, electrodomésticos, etc. [3]

Posee varias presentaciones comerciales entre las que destacan láminas, tiras para conformado y tuberías.

1.4.6 Soldabilidad de los aceros inoxidable ferríticos AISI 430

La soldabilidad de los aceros inoxidable ferríticos es buena en comparación con los de tipo martensítico y de menor grado que su par austenítico [1]. El proceso de soldadura se puede ver comprometido por varios fenómenos que pueden provocar pérdida de ductilidad y tenacidad, entre los que destacan: crecimiento de grano y fisuración inducida por hidrógeno (HIC).

El crecimiento de grano es el problema más frecuente al soldar este tipo de aceros y se da por la ausencia de cambio de fase de la microestructura ya que no existe recristalización de ferrita a austenita, de esta manera no se produce refinamiento de grano lo que provoca pérdida de ductilidad y tenacidad [6]. Este fenómeno ocurre en un rango de temperaturas de entre 850° y 900 °C; y suele presentarse en la zona afectada por el calor (ZAC).

La fisuración inducida por hidrógeno se origina una vez que el metal de soldadura se enfría porque hidrógeno molecular queda atrapado en su interior; provocando enormes presiones que se traducen en fisuras transgranulares. Este fenómeno genera que el modo de fractura cambie de dúctil a frágil [7].

Para neutralizar el efecto de estos fenómenos, en el caso del excesivo crecimiento de grano se requiere llevar procesos de precalentamiento, tratamiento térmico post soldadura (recocido total) y seleccionar un metal de aporte adecuado; para el caso de la fisuración inducida por hidrógeno se debe seleccionar un proceso de soldadura que limite la presencia de hidrógeno en el cordón, por lo que los procesos de soldadura recomendados para la soldadura de aceros inoxidable son los procesos GTAW y GMAW [8].

1.4.7 Análisis de soldadura por elementos finitos

El análisis por elementos finitos se basa en la discretización espacial de un dominio (Ω) por medio de una malla de n elementos y tiene como objetivo resolver problemas no lineales por medio de integración numérica; el análisis de soldadura por elementos finitos, se ha desarrollado y perfeccionado a pasos agigantados durante este siglo XXI, gracias a los avances tecnológicos de microprocesadores que ofrecen mayores prestaciones computacionales, demostrando que puede brindar soluciones precisas a situaciones complejas; que por medio de análisis matemáticos tradicionales y experimentales serían imposibles de abordar [9].

Simular el proceso de soldadura de una junta no es sencillo, ya que el proceso es complejo y depende de un sin número de variables como: propiedades termodependientes del

material base y electrodo, tipo de fuente de calor y su movimiento, depósito del material, número de pasadas, etc. Es por ello que la simulación de acuerdo a la teoría de simulación de soldadura de Goldak se lleva a cabo en dos etapas diferentes, pero dependientes una de la otra; cada etapa conlleva tres fases que son: preprocesamiento, solución y post-procesamiento.

En primer lugar, se realiza el análisis térmico que tiene como variable de entrada el calor generado por el arco eléctrico, de este análisis se obtiene como salida las temperaturas nodales en función del tiempo discretizado hasta llegar a la temperatura ambiente; en segundo lugar, se realiza el análisis estructural que tiene como entrada el histograma de temperaturas obtenidas en el primer análisis y se obtiene como salida los desplazamientos residuales generados [9].

1.4.8 Análisis térmico

El análisis térmico por elementos finitos se basa en la ecuación 1 de transferencia de calor y se contempla el flujo de calor generado por el arco eléctrico, las pérdidas de calor por radiación y convección.

$$\rho(T)c(T)\frac{\partial T}{\partial t} = q + \frac{\partial}{\partial x}\left[K_x(T)\frac{\partial T}{\partial x}\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[K_y(T)\frac{\partial T}{\partial y}\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[K_z(T)\frac{\partial T}{\partial z}\right]$$

Ecuación 1.1 Ecuación de difusión de calor [10]

Donde:

$\rho(T)$: Densidad del material [kg/m^3]

$c(T)$: Calor específico [$\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$]

q : Calor generado por unidad de volumen [W/m^3]

$K_x(T), K_y(T), K_z(T)$: Coeficientes de conductividad térmica [$\text{K}\cdot\text{m}/\text{W}$]

T : Temperatura [K]

Las pérdidas de calor con el medio circundante se caracterizan por las ecuaciones 2 y 3.

$$q_c = h * A(T_s - T_\infty)$$

Ecuación 1.2. Ecuación de transferencia de calor por convección [10]

$$q_r = A\varepsilon\sigma(T_s^4 - T_\infty^4)$$

Ecuación 1.3. Ecuación de transferencia de calor por radiación [10]

Donde:

q_c : Calor perdido por convección [W]
 h : coeficiente de convección [$W/m^2 \cdot K$]
 T_s : Temperatura de la superficie [K]
 T_∞ : Temperatura de los alrededores [K]
 q_r : Calor perdido por radiación [W]
 ε : Emisividad de la superficie
 σ : Constante de Stefan – Boltzman [$W/m^2 K^4$]
 A : Area de transferencia de calor [m^2]

1.4.9 Análisis estructural

El análisis estructural por elementos finitos es más complejo que su parte térmica. Se centra en calcular la deformación total que sufre el material como producto del cambio brusco de temperatura generado por el proceso de soldadura; esta deformación total es la sumatoria de la deformación térmica (ε_{term}), plástica (ε_p) y elástica (ε_e) y se expresa por la ecuación 1.4.

$$\varepsilon_{Total} = \varepsilon_{term} + \varepsilon_e + \varepsilon_p \text{ [mm]}$$

Ecuación 1.4. Deformación total. [11]

La deformación térmica (ε_{term}) expresada en la ecuación 1.5, contempla la deformación provocada por el calor del arco eléctrico y es calculada por medio de la relación física de dilatación térmica, la cual depende del coeficiente de dilatación del material y de la diferencia de temperaturas generadas durante el proceso.

$$\varepsilon_{term} = \alpha (\nabla T)$$

Ecuación 1.5. Deformación térmica. [11]

Donde:

α : Coeficiente de dilatación [$1/^\circ C$]

(∇T) : Diferencia de temperaturas [$^\circ C$]

El cálculo de la deformación plástica (ε_p) y elástica (ε_e) van de la mano; la parte elástica se obtiene por medio de la Ley de Hooke empleando el módulo de elasticidad el cual es dependiente de la temperatura.

1.4.10 Modelo matemático de la fuente de calor

Existen varios modelos matemáticos capaces de modelar fuentes de calor, pero el más utilizado por su versatilidad y precisión es el modelo de doble elipsoide de Goldak; el cual gracias a su configuración de doble fuente puede ser empleado en la simulación de diferentes procesos de soldadura como arco eléctrico, láser, haz de electrones, etc. Este modelo se basa en un sistema de puntos cartesiano dividido en un sistema delantero y trasero el cual permite considerar el cálculo de la densidad de calor presente en cada punto que se encuentre dentro del volumen de la fuente representando en la Fig. 1.2. Este modelo se basa en una distribución Gaussiana y tiene como valor pico de potencia térmica el centro del doble elipsoide y cualquier punto que se encuentre por fuera de la frontera de los elipsoides tiene un valor de potencia térmica de cero [9].

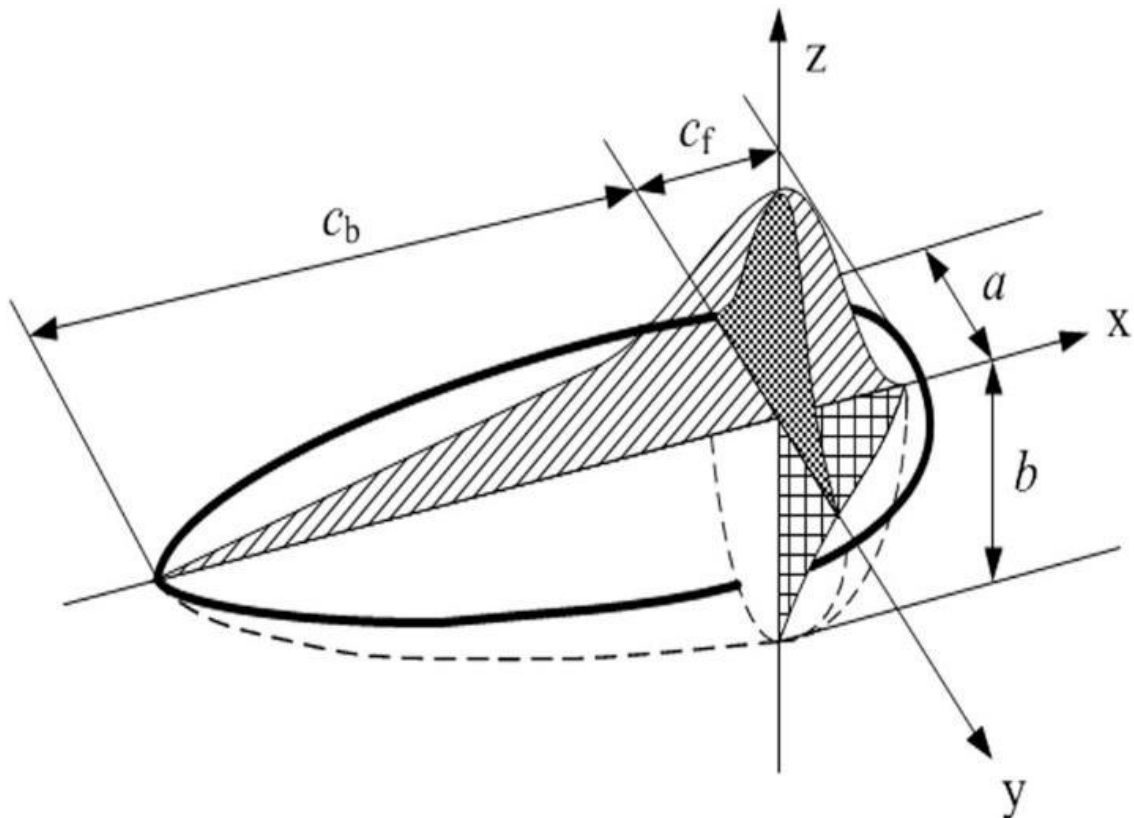


Fig. 1.2 Modelo fuente de calor Goldak doble elipsoide 3D. [13]

Para los puntos que pertenecen a la zona delantera de fuente, es decir todos aquellos cuya coordenada X es positiva; la ecuación de densidad de calor o potencia térmica es la siguiente:

$$q(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3} \cdot r_f \cdot Q}{a \cdot b \cdot c_f \cdot \pi \cdot \sqrt{\pi}} \cdot e^{-\left(\frac{3x^2}{a^2} + \frac{3y^2}{b^2} + \frac{3z^2}{c_f^2}\right)} [W/m^3]$$

Ecuación 1.6. Densidad de calor para X positivo. [9]

Para los puntos que no pertenecen a la zona delantera de fuente, es decir todos aquellos cuya coordenada X es negativa; la ecuación de densidad de calor o potencia térmica es la siguiente:

$$q(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3} \cdot r_b \cdot Q}{a \cdot b \cdot c_b \cdot \pi \cdot \sqrt{\pi}} \cdot e^{-\left(\frac{3x^2}{a^2} + \frac{3y^2}{b^2} + \frac{3z^2}{c_b^2}\right)} [W/m^3]$$

Ecuación 1.7. Densidad de calor para X negativo. [9]

Los parámetros a, b, c_f y c_b presentes en las ecuaciones 1.6 y 1.7 son dimensionales y dependen de la configuración elegida. Los parámetros x, y, z representan las coordenadas en cada eje de cada punto del elipsoide respecto al punto de intersección de los planos X, Y, Z. Los coeficientes r_f y r_b son adimensionales y representan la proporción de aporte de calor de la fuente en la parte delantera y trasera; estudios previos como el de [12] han demostrado que la suma de estos valores debe ser igual a dos (r_f + r_b = 2), el cálculo del valor de estos coeficientes se detalla en las ecuaciones 1.8 y 1.9 respectivamente.

$$r_f = \frac{2c_f}{(c_f + c_b)}$$

Ecuación 1.8. Ecuación de cálculo del coeficiente r_f. [9]

$$r_b = \frac{2c_b}{(c_f + c_b)}$$

Ecuación 1.9. Ecuación de cálculo del coeficiente r_b. [9]

Por último, el parámetro Q, pertenece a la potencia efectiva del arco la cual es calculada por medio de la ecuación 1.10 basándose en a la eficiencia térmica de la fuente (η), voltaje del arco (V) y amperaje (I). Se puede optar también por utilizar el parámetro de densidad de potencia (PD) de soldadura dependiendo de la complejidad del problema o de la disponibilidad de datos.

$$Q = \eta \cdot V \cdot I [W]$$

Ecuación 1.10. Potencia efectiva del arco [9]

2. METODOLOGÍA

En esta sección se describen los procedimientos y métodos utilizados para la ejecución del proceso de soldadura, realización de ensayos normalizados, obtención de datos experimentales y simulación. Se inicia con la caracterización del material base, luego se realiza un compendio de las variables del proceso de soldadura GTAW, se repasa los parámetros considerados para la realización del WPS. Se explican los procedimientos para la obtención de probetas y cordón de soldadura, se describen los métodos, esquemas y herramientas empleadas para la toma de datos experimentales, se repasa los métodos de ensayos normalizados utilizados para la validación del cordón de soldadura, por último, se explica los parámetros geométricos, físicos y computacionales considerados para los análisis de elementos finitos térmico y estructural, así como sus fases, relaciones de entrada y salida, método de solución y criterios de convergencia.

2.1 Caracterización del material base

La caracterización del material base se hace por medio de un ensayo de espectrometría de emisión atómica por chispa, el ensayo tiene como objetivo determinar la cantidad presente de cada elemento atómico presente en la aleación; es decir permite conocer la composición química exacta del material analizado. Los resultados de este ensayo permitirán determinar el material de aporte a utilizar en el proceso de soldadura, dado que la composición química de este debe ser igual o similar al material base.

2.1.1. Ensayo de espectrometría

El ensayo de espectrometría de emisión atómica por chispa consiste en mover un arco o chispa eléctrica de una longitud de onda conocida sobre la superficie del material. El arco generado calienta la superficie del material hasta excitar a los electrones de los átomos, los cuales excitados emiten luz en longitudes de onda características de cada elemento, los haces de luz emitidos son dispersados e identificados por medio de su longitud de onda e intensidad con ayuda de un monocromador. La intensidad de luz emitida es proporcional al número de átomos de cada elemento presente lo que permite obtener los valores de composición química del material [14].

El ensayo se llevó a cabo bajo norma ASTM E415 –17, se utilizó una muestra del material base de dimensiones 75 mm X 75 mm X 3 mm; el equipo utilizado fue un espectrómetro BRUKER Q2 ION cuyas especificaciones técnicas se muestran en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Especificaciones técnicas equipo de espectrometría [15]

| | | |
|--------------------------|---|----------|
| Alimentación | 100 V - 240 V | 50/60 HZ |
| Fuente Generadora | Descarga de arco desde 0.01 ms a 2 ms por chispa | |
| | Frecuencia de 50 a 100 Hz | |
| Sistema óptico | Purga de argón con mejora de proyección | |
| | Compensación ambiente activa entre 10 y 45 °C | |
| | Tecnología de espectro claro | |
| Software | Paquete de solución analítica (PSA) | |
| | Calibración de matrices personalizadas disponible | |
| Imagen |  | |

2.2 Soldadura GTAW

En esta sección se realiza una breve revisión de las generalidades del proceso de soldadura GTAW, así como de sus ventajas y desventajas. El proceso GTAW (Gas Metal Arc Welding) conocido también como soldadura TIG, por sus siglas en inglés de Gas Inert Tungsten; es definido como “un proceso de soldadura por arco eléctrico que utiliza un electrodo no consumible de tungsteno, mientras un gas inerte protege al baño de fusión sin aplicación de presión” [8]. El arco eléctrico es generado entre el electrodo y la pieza de trabajo y produce suficiente calor para fundir el material; el metal de aporte adicional es opcional. El gas protector tiene como objetivo generar una atmosfera protectora sobre el charco de soldadura que impide su contacto con el oxígeno del aire circundante, este gas puede ser helio o argón siendo este el más usado por su bajo costo. El proceso puede llevarse a cabo bajo corriente alterna AC o corriente directa DC en cualquiera de sus polaridades y dependerá del metal a soldarse.

Este proceso de soldadura es considerado uno de los más versátiles porque permite controlar las variables del proceso de manera precisa; produciendo soldaduras de alta

calidad libres de defectos en casi cualquier metal sin importar la posición o espesor, inclusive en metales disímiles [8]. Es además un proceso limpio, ya que no produce escoria ni salpicaduras. Su eficiencia térmica ronda valores entre 60% y 80%. Este proceso tiene como desventajas el alto costo del gas inerte, baja tasa de deposición respecto a procesos con electrodo consumible, no puede llevarse a cabo en lugares abiertos que presenten corrientes de aire fuerte porque la protección del gas se ve disminuida, requiere de mayor experiencia y habilidad del soldador. La selección del proceso GTAW se dio acorde a la recomendación del punto 1.4.6 y al estudio previo de [16] el cual demostró que el proceso GTAW permite obtener cordones de buena calidad en el acero AISI 430.

2.3 Variables del proceso de soldadura para el acero AISI 430

En esta sección se realiza un compendio de las variables consideradas para la soldadura y simulación del proceso de soldadura del acero inoxidable ferrítico AISI 430; entre las cuales se tienen: intensidad de corriente, velocidad de avance, densidad calorífica, temperatura de precalentamiento, material de aporte, composición y caudal del gas de protección.

2.3.1 Intensidad de corriente

La intensidad de corriente es una de las variables más influyentes del proceso de soldadura; está ligada directamente a la penetración y tasa de aportación. Su cantidad es determinada por el diámetro del electrodo, el tipo y espesor del material. El proceso GTAW puede usar todas las configuraciones de corriente y polaridad; cada configuración tiene características propias y para el caso del acero inoxidable ferrítico según [7] se recomienda usar corriente directa y electrodo negativo; ya que esta configuración es propicia para brindar una buena penetración y velocidad de soldadura; según el diámetro del electrodo de tungsteno (3/32") se recomienda una intensidad de corriente de entre 90 y 200 amperios [7].

2.3.2 Velocidad de avance

La velocidad de avance es un parámetro que afecta directamente en la cantidad de calor suministrada a la pieza lo que significa que influye en la calidad de la soldadura, ya que una velocidad alta provoca discontinuidades y falta de penetración mientras que una velocidad baja provoca un cordón ancho. Este parámetro se controla por medio a la intensidad de corriente.

2.3.3 Densidad de potencia

Esta variable indica la cantidad de calor que aporta realmente el arco a la soldadura por unidad de área; está ligada directamente al tiempo de soldadura dado que es un indicador del tiempo necesario para fundir el material base y el metal de aporte, es decir a bajas densidades de potencia se requiere un mayor tiempo para la fusión [9]. La densidad de potencia se calcula según la ecuación 2.1.

$$PD = \frac{Q}{A}$$

Ecuación 2.1. Densidad de potencia. [9]

Donde:

Q: Potencia efectiva [W]

A: Area superficial por la que entra la energía [mm²]

2.3.4 Temperatura de precalentamiento

En el caso del acero ferrítico AISI 430, por su particularidad de no presentar cambio de fase en todo el rango térmico (Fig. 1.1) se debe controlar el aporte calórico del proceso de soldadura por medio de un precalentamiento; con el objetivo de evitar la pérdida de ductilidad de la junta por el excesivo crecimiento de grano. La temperatura de precalentamiento es determinada basándose en recomendaciones de manuales de soldadura como [1], [7] y [17] los cuales sugieren un rango de temperaturas de entre 149°C y 232°C es por ello que se eligió una temperatura intermedia de 180° C.

2.3.5 Material de aporte

Para el proceso GTAW el material de aporte tiene dos presentaciones comerciales comunes que son en forma de varilla o alambre. La selección del material de aporte se lo hace según la norma AWS A5.9 la cual contiene las especificaciones de electrodos para soldadura de aceros inoxidable. El criterio de selección del material de aporte se lo hace acorde a la composición química; es decir el electrodo o varilla debe tener una composición química lo más semejante posible al material base, también se toma en cuenta la disponibilidad del mercado. Es por ello que se elige la varilla de denominación 308L del proveedor indura; cuyas características se presentan en la tabla 2.2.

Tabla 2.2 Características del electrodo E-308L [18]

| | | | | |
|-----------------------------------|------------|------------------|-------------------------------|-------------|
| Denominación Comercial: | | Diámetro: | Posición de soldadura: | |
| 308L | | 3/32" (2.4 mm) | Todas las posiciones | |
| Composición Química | | | | |
| Carbono [C] | Cromo [Cr] | Manganeso [Mn] | Silicio [Si] | Níquel [Ni] |
| 0.04 | 18.7 | 0.63 | 0.76 | 10 |
| Propiedades Mecánicas | | | | |
| Esfuerzo máximo de tracción [Mpa] | | | Elongación (L= 4d) % | |
| 560 | | | 41 | |
| Intensidad de corriente | | | 110 – 160 [A] | |

2.3.6 Gas de protección

Existen varias opciones de gas de protección que pueden ser usadas en el proceso de soldadura GTAW, estas son argón (Ar), hidrogeno (H), nitrógeno (N), Helio (He) o una mezcla de dos o más de estos gases [8]. El argón y helio por su naturaleza de gases nobles inertes no se combinan químicamente con ningún material por lo que son los más empleados. Para el caso del acero AISI 430 se elige argón como gas de protección por la alta protección que brinda en la soldadura de ranuras profundas y su facilidad de ionización lo que permite arcos largos con voltajes bajos; estas características hacen que su uso sea propicio en casos de soldadura manual con metales de aportación añadidos. El caudal de gas de protección es determinado basándose en recomendaciones de manuales de soldadura como [7] y [8] los cuales sugieren un caudal de 20 lt/min.

2.4 Especificación del procedimiento de soldadura (WPS)

El WPS (Welding Procedure Specification) se realizó basándose en los formatos suministrados por la norma AWS D1.6. Para su elaboración se tomaron como parámetros principales: dimensiones, tipo de junta, temperatura de precalentamiento, velocidad de soldadura, características eléctricas, material de aporte, gas de protección y caudal. Adicionalmente, se colocaron parámetros secundarios como: posición y técnica de soldadura. El WPS elaborado se muestra en el ANEXO I.

2.5 Ejecución de los cordones de soldadura y obtención de datos experimentales

En este apartado se muestra los procedimientos bajo los cuales se obtuvieron las placas y cordones de soldadura; se muestran además los métodos utilizados para la obtención de datos experimentales necesarios para la validación de los modelos térmicos y estructural.

2.5.1 Obtención de probetas para soldadura

Las dimensiones y el número de probetas fueron determinadas acordes a la norma AWS D1.6. Las dimensiones de las placas para soldadura se indican en la Fig. 2.1; según la norma estas deben tener una dimensión de 202 mm x 102 mm.

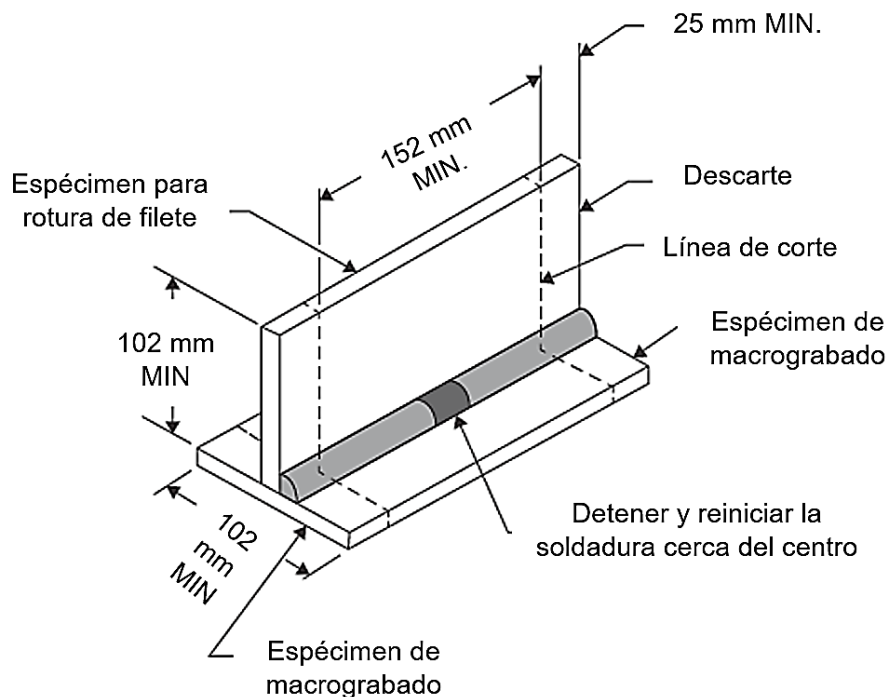


Fig. 2.1 Geometría de la probeta. [19]

Las placas de soldadura fueron extraídas de una plancha de acero AISI 430 de 1.20 m x 0.80 m, para su corte se empleó una máquina láser modelo GS-3015 de la marca DonGuan Glorystar Tech cuyas características técnicas se detallan en la tabla 2.3.

Tabla 2.3 Características Técnicas Cortadora Láser GS-3015. [20]

| | |
|------------------------------|---------------------------|
| Potencia de láser | 500W- 4000W |
| Max. Recorrido del eje X/Y/Z | 1510 mm / 3030 mm / 80 mm |
| Precisión geométrica | 0.03 mm |
| Consumo de energía | 12KW< 30KW |
| Tamaño de la máquina | 4800 X 2300 X 2000 mm |

En la Fig. 2.2 se muestra el montaje de la plancha sobre la máquina y el cabezal móvil de corte, para la extracción de placas se requirió un modelo CAD con las dimensiones de la plancha y las probetas.

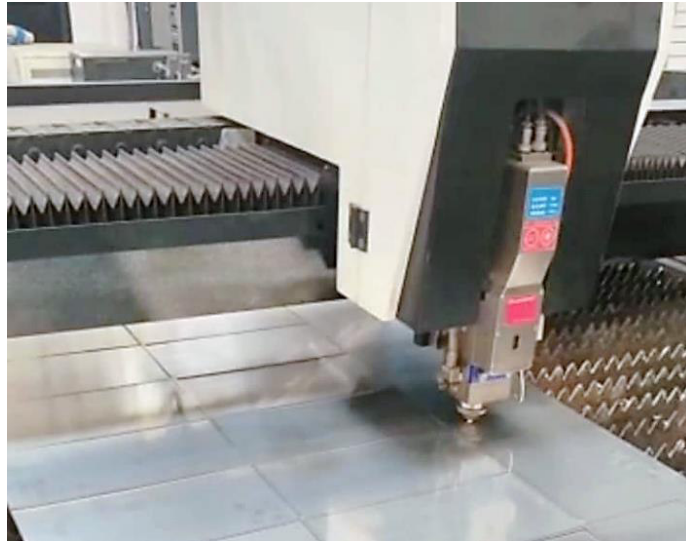


Fig. 2.2 Extracción de placas por corte láser.

2.5.2 Ejecución del cordón de soldadura

La obtención del cordón de soldadura se llevó a cabo bajo los parámetros establecidos en el WPS del ANEXO I, se utilizó un electrodo no consumible de tungsteno con un contenido de 2% de torio, el cual fue afilado previamente en forma de punta acorde a las recomendaciones de [7] para la soldadura de aceros inoxidable, para el precalentamiento de las placas se utilizó el equipo de oxicorte y para la medición de la temperatura se utilizó un pirómetro infrarrojo; la temperatura de la junta excedió por 20 °C la especificada por el WPS para compensar la pérdida de calor producida hasta iniciar la soldadura. Se empleó un equipo de la marca Lincoln Electric cuyas especificaciones técnicas se detallan en la tabla 2.4.

Tabla 2.4. Especificaciones técnicas del equipo de soldadura. [21]

| | | |
|--|-----------------------------|------------------------------------|
| | Marca: | Lincoln Electric |
| | Modelo: | Invertec V350 PRO |
| | Voltaje de entrada: | 5 - 425 [V] / 50 - 60 [Hz] |
| | Amperaje de salida: | 5 - 425 [A] Máx. 80 [V] |
| | Ciclo de trabajo: | 60% |
| | Procesos Admisibles: | MIG, TIG, InnerShield, OuterShield |

Una vez terminado el cordón, se procedió a su limpieza con ayuda de un cepillo metálico. La junta soldada obtenida se muestra en la Fig. 2.3.




Fig. 2.3 Junta en T obtenida con proceso GTAW.

2.5.3 Obtención de datos experimentales

La obtención de los datos experimentales es necesaria para la validación de los resultados de los modelos computacionales térmico y estructural; para la validación del modelo térmico se tomaron datos de temperatura durante el proceso de soldadura con la ayuda de tres termocuplas tipo K, un cronómetro digital y un pirómetro infrarrojo cuyas especificaciones técnicas se presentan en la tabla 2.5, los datos fueron registrados según su tiempo y distancia; se tomó como dato adicional el tiempo total de soldadura con el fin de conocer la velocidad de avance.

Tabla 2.5. Especificaciones técnicas pirómetro. [22]

| | | |
|--------------------------|----------------|---|
| Marca | ETEKCITY |  |
| Modelo | DT-02570634 | |
| Rango | - 50 a 1200 °C | |
| Emisividad: | 0.10 a 1.0 | |
| Tiempo respuesta: | 150 mS | |

Los instrumentos para la toma de datos de temperatura fueron ubicados sobre la superficie de las placas de soldadura como se indica en la Fig. 2.4.

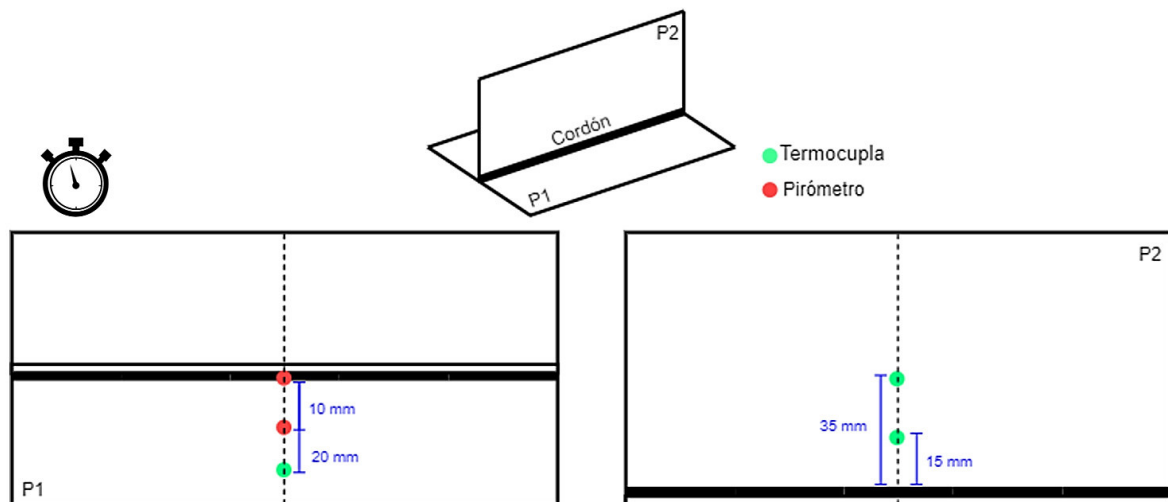


Fig. 2.4 Ubicación de instrumentos para toma de temperatura.

En la Fig. 2.5 se muestra la toma y registro de datos durante el proceso de soldadura.



Fig. 2.5 Obtención y registro de datos de temperaturas.

Para la validación del modelo estructural, se cuantificaron las deformaciones longitudinales y transversales sufridas por las placas, para ello previo al proceso de soldadura, con un marcador indeleble se marcaron puntos sobre las superficies superiores de las placas tomando en cuenta las dimensiones del cordón y se midieron sus distancias; los puntos se colocaron como se muestra en la Fig. 2.6.

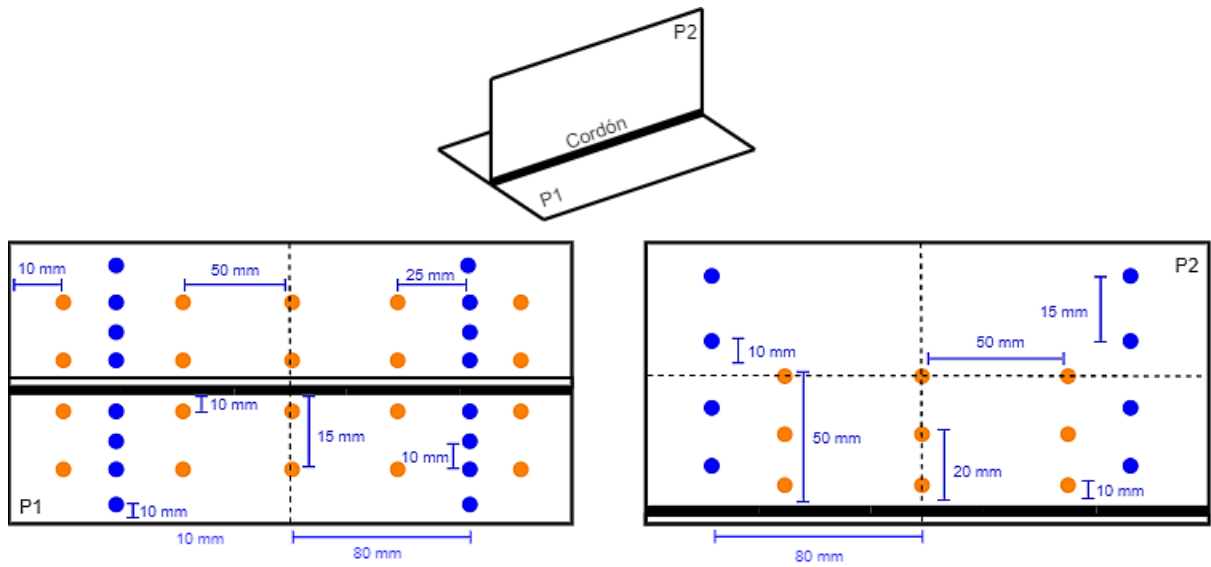


Fig. 2.6 Ubicación de puntos para cuantificación de deformaciones.

Luego de realizado el cordón y una vez enfriada la junta. Se midieron nuevamente las distancias entre los puntos previamente marcados con ayuda de un calibrador digital y una hoja de papel milimetrado, luego se obtuvo la diferencia de distancia entre los valores previos y posteriores al proceso de soldadura; determinando así las deformaciones sufridas por la junta. Para la cuantificación de las deformaciones longitudinales se emplearon las diferencias entre los puntos de color azul y para las deformaciones transversales aquellos puntos de color naranja.

En la Fig. 2.7 se muestra el registro fotográfico de las juntas antes y después del proceso de soldadura con los puntos de medición de deformación marcados.

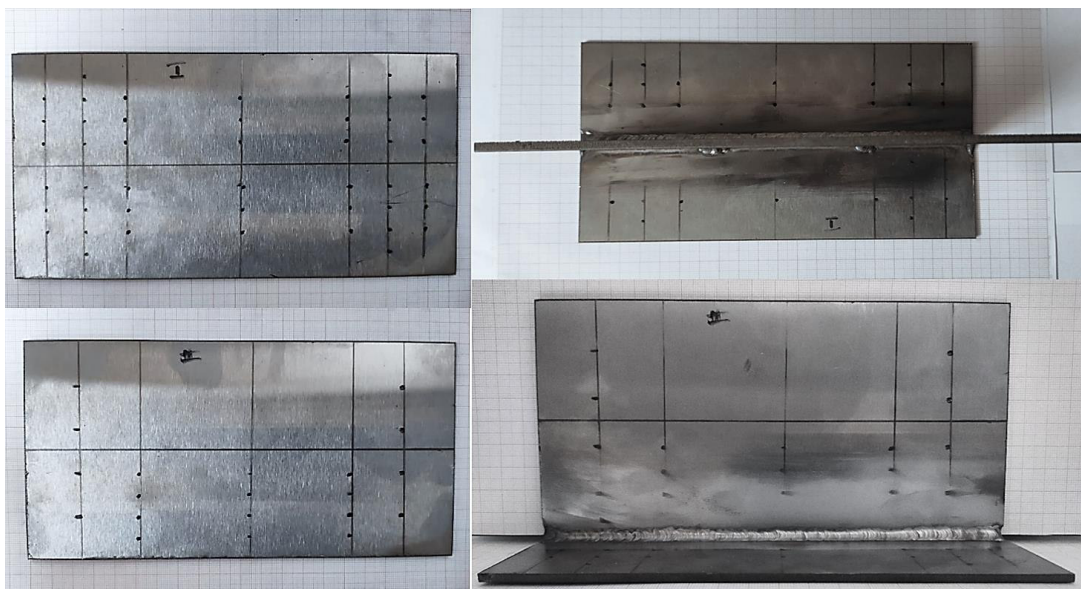


Fig. 2.7 Registro fotográfico para cuantificación de deformaciones.

2.6 Ensayos normalizados

Para garantizar la calidad del cordón de soldadura, es necesario basarse en los ensayos de calificación de desempeño de soldadura de filete en juntas tipo T especificados por la norma AWS D1.6; la cual establece que se requiere llevar a cabo una inspección visual, un ensayo de rotura de filete y una macrografía; estos ensayos se realizaron bajo los criterios de aceptación de la norma AWS D1.6 y en caso de los ensayos de rotura de filete y macrografía apoyados en las normas AWS B4.0 Y ASTM E3 respectivamente. En este apartado se muestran los métodos y procedimientos bajo los cuales fueron llevados a cabo los ensayos.

2.6.1 Inspección visual

El ensayo de inspección visual tiene como objetivo identificar imperfecciones y defectos superficiales presentes en el cordón de soldadura. Se lo realiza previo a cualquier otro ensayo de inspección y una correcta ejecución reduce la necesidad de ensayos no destructivos complementarios, el ensayo consiste visualizar, identificar, medir e interpretar los resultados observados en el cordón de soldadura; el ensayo puede realizarse de manera directa y remota usando como apoyo herramientas ópticas, de medida e iluminación; la interpretación de los resultados del ensayo se lo realiza apoyado en los criterios de aceptación dictados por la norma o código de soldadura vigente.

El ensayo se ejecutó de acuerdo a los criterios de aceptación de la norma AWS D1.6, los cuales establecen que para la aceptación de soldadura de filete en el cordón no deben existir grietas ni solapes, todas las mordeduras deben estar llenas en la sección transversal de la soldadura, el tamaño y perfil del cordón deberán cumplir los mínimos y máximos según corresponda y el valor máximo de socavamiento no debe exceder 3 mm [1/8 pulg]. Para el ensayo se empleó luz natural una regla, una galga para soldadura, y una hoja de papel milimetrado como referencia de longitud.

2.6.2 Ensayo de rotura de filete

Este ensayo tiene como objetivo cuantificar la resistencia del cordón de soldadura y verificar que se presenta fusión completa con el material base. El ensayo consiste en aplicar una fuerza de ruptura (F) perpendicular al cordón de soldadura (Fig. 2.8) de manera que la raíz de la soldadura es sometida a tensión; la fuerza aplicada aumenta en función del tiempo hasta que la probeta se dobla en un plano sobre sí misma o sufre una fractura.

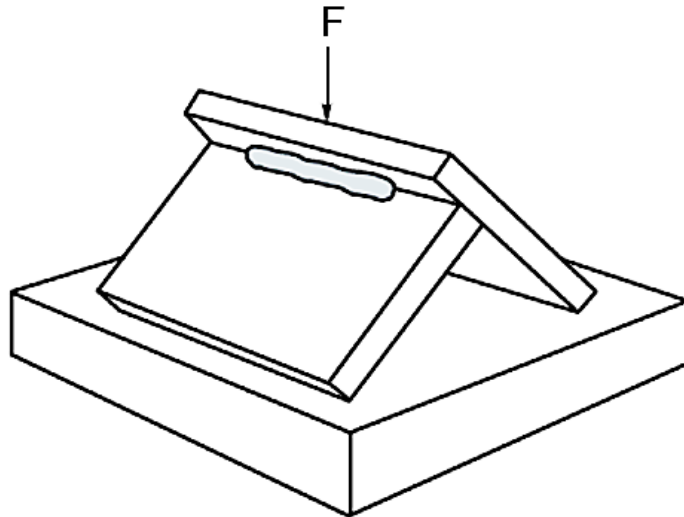


Fig. 2.8 Método de prueba de rotura de filete.

Según a la norma AWS D1.6, para el ensayo de rotura de filete de juntas en T se requiere una probeta extraída de una junta soldada la cual haya aprobado previamente el ensayo de inspección visual, acorde a esto, la probeta fue extraída después del ensayo antes mencionado según las dimensiones de la Fig. 2.1 por medio de un corte de chorro de agua (Fig. 2.9), ya que este método no afecta a las propiedades del material base ni del cordón, el modelo del equipo utilizado para el corte de la probeta fue MACH 3 de la marca Flow Shape Technologies Group.



Fig. 2.9 Extracción de probeta por chorro de agua.

En la tabla 2.6 se muestran las especificaciones técnicas de la máquina de corte empleada para la extracción de las probetas.

Tabla 2.6 Especificaciones técnicas cortadora de chorro de agua Mach 3

| | | | |
|------------------|----------|--------------------|-----------|
| Precisión lineal | 0.04 mm | Velocidad de corte | 7.6 m/min |
| Repetibilidad | 0.05 mm | Tamaño | 1.3mx1.3m |
| Software | FlowNest | Presión máxima | 6500 bar |

El ensayo se ejecutó bajo las indicaciones y criterios de aceptación de la norma AWS D1.6, la cual establece que para el ensayo la raíz de la soldadura deberá someterse a tensión y para su aceptación la probeta deberá doblarse en un plano sobre sí misma; en el caso de fracturarse durante el ensayo deberá existir fusión completa hasta la raíz de la junta sin inclusión alguna o porosidad superior a 2.5 mm [3/32 pulg] o la suma de porosidades e inclusiones no deberá sobrepasar 10 mm [3/8 pulg] a lo largo del cordón. Para el ensayo se empleó una máquina universal de ensayos cuyas especificaciones técnicas se muestran en la tabla 2.7.

Tabla 2.7 Especificaciones técnicas maquina universal de ensayos.

| Especificaciones | |
|----------------------------|--------------|
| Modelo | Super L 120 |
| Marca | Tinius Olsen |
| Capacidad de carga | 132000 lb |
| Aplicación de carga | Hidráulica |
| Software | NAVIGATOR |
| Apreciación | 0.1 Lbf |



2.6.3 Ensayo de metalografía

Este ensayo tiene como objetivo analizar la sección transversal del área soldada y los cambios que está pudo sufrir durante el proceso; por medio del ensayo se determina la geometría y características generales de la soldadura, además de inclusiones y defectos

en el cordón; todas estas características están ligadas directamente con las propiedades químicas y mecánicas de la zona analizada. El ensayo puede ser realizado por medio de las técnicas de macrografía, micrografía o ambas; la técnica a utilizar depende del objetivo del estudio. Acorde a la norma AWS D1.6 para la calificación del desempeño de la soldadura de filete de juntas en T se requiere un análisis de macrografía el cual permita observar y analizar la geometría de la soldadura, la profundidad y penetración del cordón, las imperfecciones superficiales, internas e inclusiones.

Para el ensayo se usó una probeta acorde a las dimensiones establecidas por la norma (Fig. 2.1), la cual se extrajo con el mismo método de corte del punto 2.6.1. El ensayo se llevó a cabo de acuerdo a los criterios de aceptación de la norma AWS D1.6 los cuales establecen que para la aceptación de soldadura de filete se debe tener fusión completa hasta la raíz de la junta, el tamaño mínimo de pierna debe concordar con el tamaño de soldadura de filete especificado, no deben existir grietas, debe existir fusión completa entre capas adyacentes de metal de soldadura y entre el metal de soldadura y el metal base, la mordedura no deben exceder 1 mm [1/32 pulg].

2.7 Simulación

En este apartado se muestran por separado las tres fases de desarrollo de las simulaciones térmica y estructural. La fase de preprocesamiento de los modelos consistió en establecer las condiciones geométricas y físicas del problema; establecer el mallado y sus puntos críticos de análisis. La fase de solución se centró en la ejecución de los cálculos por medio del modelo elegido, para lo cual se establecieron las condiciones de convergencia y borde, pasos de tiempo, variables de entrada y salida. La fase de post-procesamiento se basó en visualizar los resultados por medio de gráficos o imágenes interpretativas de la solución.

2.7.1 Simulación térmica mediante ANSYS

La simulación térmica de soldadura, tiene como objetivo modelar la fuente de calor del proceso GTAW y obtener el historial térmico generado durante el proceso de soldadura y consta de tres fases enlazadas; la primera fase es la fase de preprocesamiento y tuvo como punto de partida la obtención de la geometría de la junta y el cordón de soldadura, para ello se empleó el software de modelado CAD Autodesk Inventor, se inició modelando las placas acordes a las dimensiones establecidas en 2.5.1; para la generación de la junta se empleó el módulo de ensamble; en el cual por medio de relaciones de movimiento se colocaron las placas en posición T; para la modelación del cordón de soldadura se

emplearon los datos obtenidos en la macrografía y la herramienta Convert to Weldment la cual tiene como parámetros de ingreso, el tipo de cordón, elección de las superficies de contacto de la soldadura y las dimensiones del cordón que en este caso correspondieron a la longitud de pierna (Fig. 2.10).

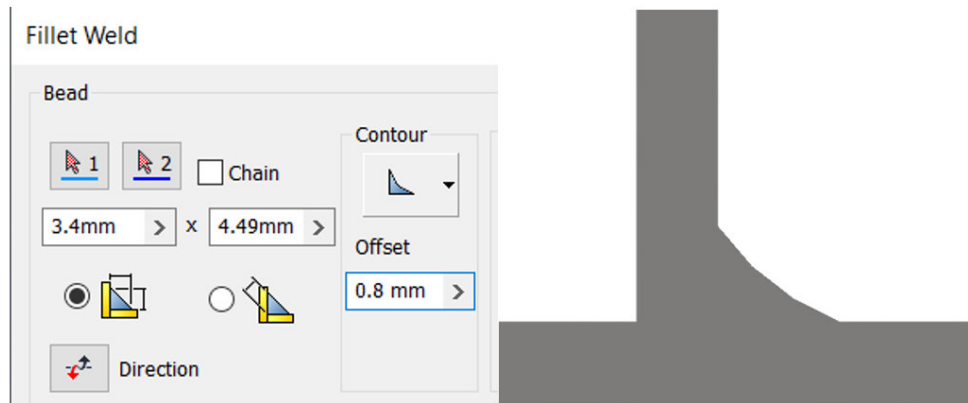


Fig. 2.10 Dimensionamiento del cordón de soldadura y vista lateral ampliada del cordón obtenido.

Finalmente, la geometría es exportada al formato STEP, y se genera la modelación del cordón de soldadura como se muestra en la Fig. 2.11.

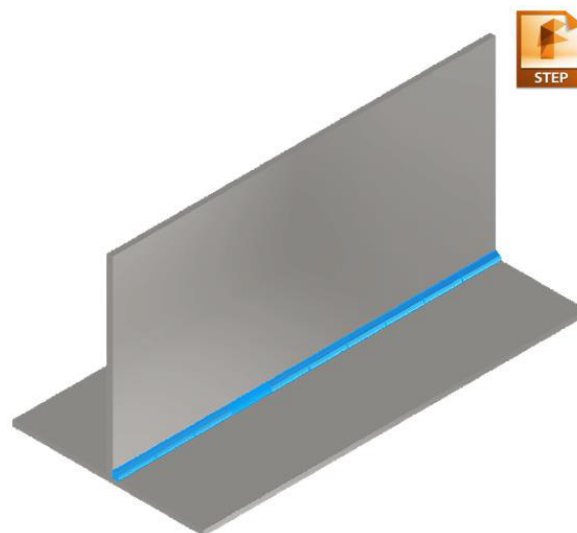


Fig. 2.11 Geometría de junta T y cordón de soldadura obtenido.

El siguiente paso de la fase de preprocesamiento fue elegir el modelo analítico a usar, en este caso se eligió el modelo térmico transitorio porque permite modelar una fuente de calor móvil; luego se procedió a definir las propiedades mecánicas y físicas del material base y cordón de soldadura las cuales se muestran en la tabla 2.8; esto se lo realizó creando un nuevo material en la base de datos del software ANSYS.

Tabla 2.8 Propiedades definidas para el material AISI 430 [25]

| | | | | | |
|--|--------------|-----------------------------|-----------|------------------------------------|----------------|
| Densidad | 7800 [kg /m] | Punto de fusión | 1510 [°C] | Calor específico | 460 [J/kgK] |
| Límite de fluencia | 205 [Mpa] | Resistencia ultima tracción | 450 [Mpa] | Coefficiente de dilatación térmica | 10.5 E-6 [1/K] |
| Conductividad térmica a diferentes temperaturas [W / mK] | | | | | |
| 20 °C | 100 °C | 200 °C | 300 °C | 400 °C | 500 °C |
| 25 | 28.5 | 31 | 32 | 33 | 34 |

Una vez definido el modelo analítico y las propiedades del material, se importó la geometría creada y se ejecutó un mallado rápido (Fig. 2.12); luego se procedió a determinar zonas de dimensionamiento (sizing), las cuales permiten definir el número de elementos respecto a una arista de la geometría, estas zonas fueron tomadas a lo largo y ancho de las placas y el cordón de soldadura con el objetivo de generar una malla completamente estructurada y uniforme.

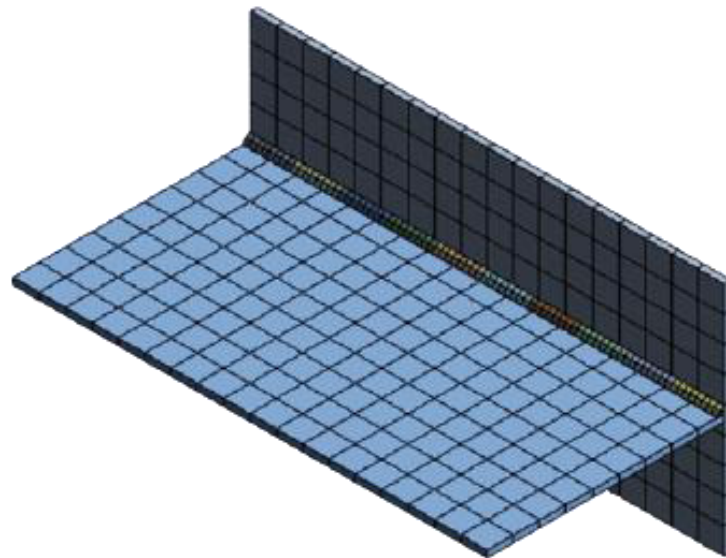


Fig. 2.12 Geometría importada y mallado rápido ejecutado.

Para finalizar el mallado se realizó un refinamiento hacia las inmediaciones del cordón de soldadura con la implementación de un factor de sesgo (Bias Factor), el cual permite agrupar un conjunto de celdas de acuerdo al factor definido, el mallado obtenido estructurado y la zona del cordón refinada se muestran en la Fig. 2.13.

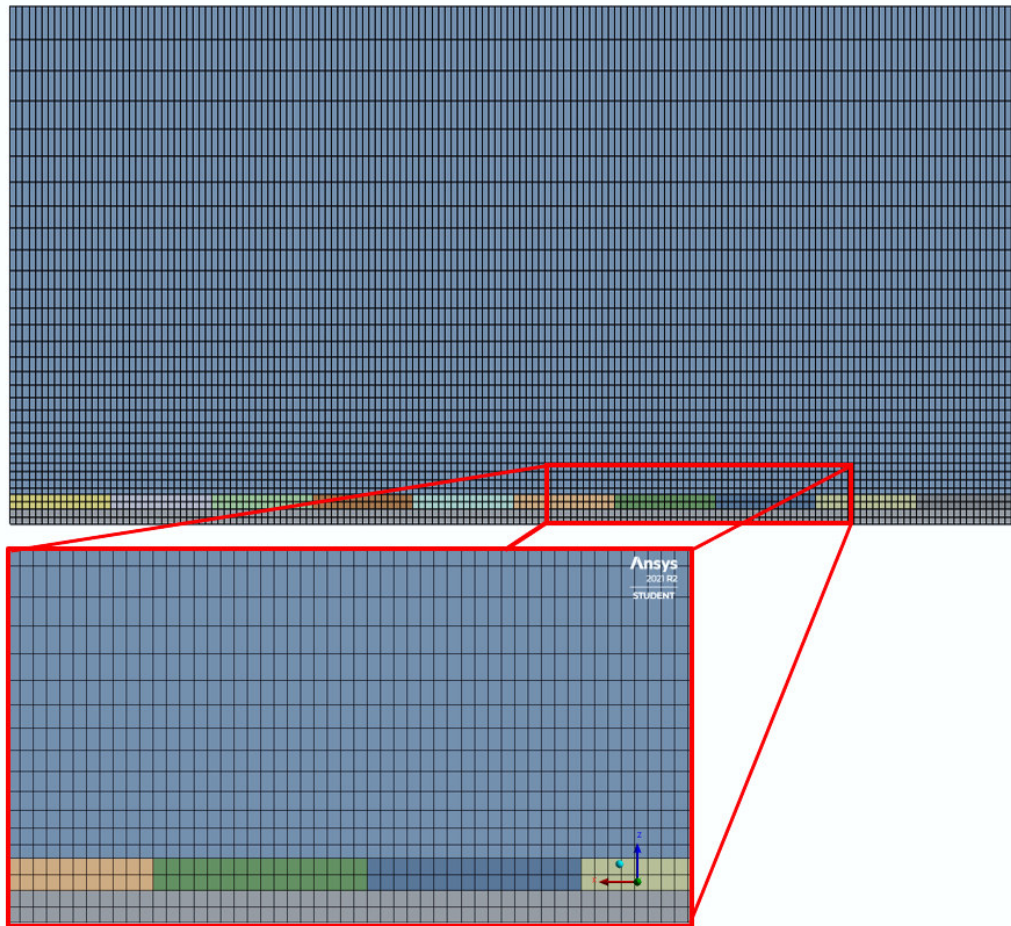


Fig. 2.13 Mallado estructurado y zona de refinamiento ampliada. (Vista frontal)

La información de la malla generada se muestra en la tabla 2.9; donde el factor omega (Ω) es la relación adimensional entre el número de elementos sobre número de nodos y es un indicador del poder computacional requerido para la simulación; valores cercanos a uno representan un menor requerimiento computacional, el factor beta (β) representa el coeficiente de aspecto (Aspect Ratio) y es un indicador adimensional de calidad de la malla el cual relaciona el lado más largo y más pequeño de los elementos de la malla; valores mayores a uno representan menor calidad de malla. [26]

Tabla 2.9 Parámetros de mallado.

| | |
|---|-----------------------------|
| Tipo de mallado | Mallado sólido estructurado |
| Número de nodos | 60900 |
| Número de elementos | 70369 |
| Factor omega (Ω) | 1.15 |
| Coficiente de aspecto (β) | 1.32 |

Con la creación e importación de la geometría, elección del modelo analítico, definición de las propiedades del material y la generación del mallado se finalizó la fase de preprocesamiento del modelo térmico; esta fase fue compartida con el modelo estructural.

La fase de solución, se dio inicio estableciendo las condiciones de borde o frontera; en primer lugar, se consideró que todas las superficies de la probeta se sometieron a convección y radiación (Fig. 2.13).

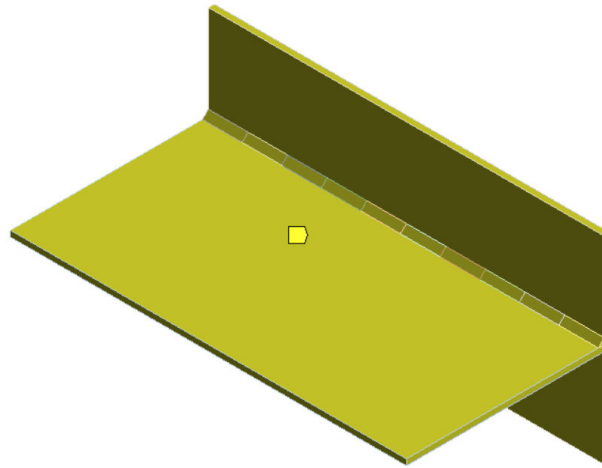


Fig. 2.13 Selección de superficies sometidas a convección y radiación.

Para establecer el coeficiente de convección se tomó en cuenta que éste varía únicamente con la temperatura es por ello que se eligió el modelo simplificado de aire estancado (Fig. 2.14), para el coeficiente de radiación se consideró una emisividad de la superficie de 0.35 acorde a [10].

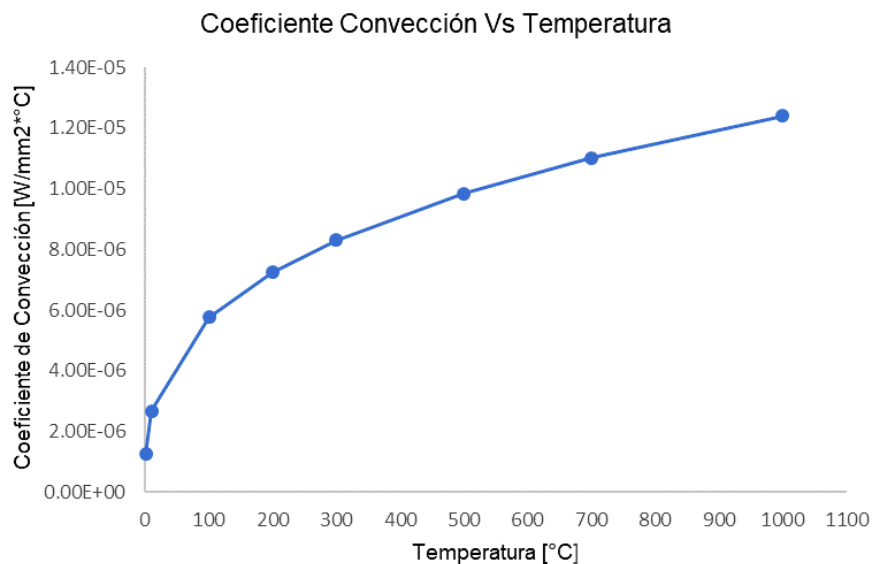


Fig. 2.14. Valores de coeficiente de convección modelo de aire estancado.

Para el modelado de la fuente de calor detallada en el punto 1.4.10, se empleó el kit de herramientas de personalización ACT (ANSYS Customization Toolkit), el cual es un entorno de programación que permite crear extensiones de código abierto ejecutables con el fin de personalizar o acelerar procesos de mallado o solución de fenómenos físicos particulares [27]; varias de estas extensiones son creadas por el propio desarrollador y ofrecen cierto nivel de personalización dependiendo del caso; se usó el modelo de fuente de calor móvil (Moving Heat Flux) propio del desarrollador el cual está basado en el modelo matemático de Goldak.

Para la personalización de la fuente se utilizó los parámetros presentados en la tabla 2.10 donde los parámetros dimensionales (Cb, Cf) fueron tomados acorde al trabajo previo de [28] ya que no existen datos experimentales del tamaño real de la fuente de calor y los datos a, b se extrajeron con ayuda de los resultados de la macrografía; los parámetros de voltaje, corriente y velocidad de avance se establecieron con ayuda del WPS del anexo I, el cálculo de la densidad de potencia se realizó con la ecuación 2.1.

Tabla 2.10 Parámetros de personalización de la fuente de calor

| Parámetros de soldadura | | | |
|--------------------------|------------|-------------------------|------------------|
| Voltaje | Intensidad | Densidad de potencia | Velocidad Avance |
| 8 [V] | 110[A] | 15 [W/mm ²] | 1.43 mm/s |
| Parámetros Dimensionales | | | |
| Cb | Cf | a | b |
| 6.5 mm | 3.25 mm | 3.4 mm | 4.4 mm |

Como parámetro adicional de entrada de la extensión se estableció la trayectoria y dirección de la fuente calor (electrodo); seleccionando la arista entre las dos placas como trayectoria y un punto de partida que dicta la dirección de inicio de la fuente, además de las superficies de contacto entre cordón y placas (Fig. 2.15). Como parámetro final de configuración se establece el tiempo total de soldadura y enfriamiento acorde a los datos experimentales el cual fue de 1800 s.

Para el método de solución del modelo se empleó el método estándar del paquete ANSYS que corresponde al método iterativo de ecuaciones no lineales “Full Newton Raphson”. Para el criterio de convergencia acorde a trabajos previos de Bezerra y Domínguez se establece un valor de 0.1 °C lo que significa que la solución converge cuando la diferencia entre la temperatura de la interacción (i) respecto a la iteración anterior (i-1) es menor al valor indicado. Como último paso de la fase de solución se ejecutó el comando SOLVE y se guardó los resultados con el historial térmico.

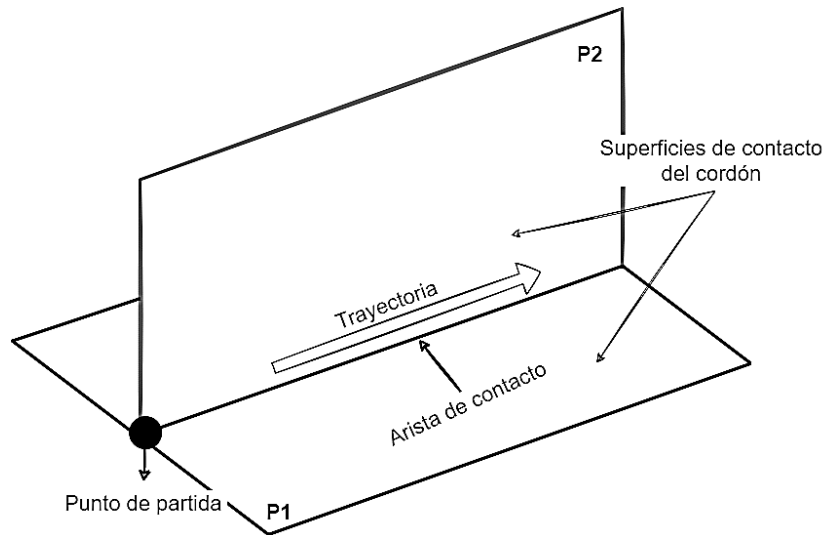


Fig. 2.15 Parámetros de configuración de trayectoria de la fuente de calor

La etapa de post-procesamiento se llevó a cabo obteniendo las gráficas del historial térmico a cada paso de tiempo en los puntos de análisis del esquema de la Fig. 2.1; los datos fueron extraídos con la ayuda de la herramienta PROBE y luego fueron exportados a Excel para posteriormente ser comparados con las temperaturas experimentales obtenidas.

2.7.2 Simulación estructural mediante ANSYS

La simulación estructural tiene como objetivo cuantificar la deformación total que sufre la junta como producto del cambio brusco de temperatura generado por el proceso de soldadura y consta de tres fases enlazadas; la primera fase se dio inicio al elegir el modelo analítico a usar; en este caso se eligió el modelo estructural estático el cual se enlazó con el modelo térmico transitorio previamente desarrollado, ya que ambos modelos comparten geometría, mallado y propiedades físicas del material (Fig. 2.16).

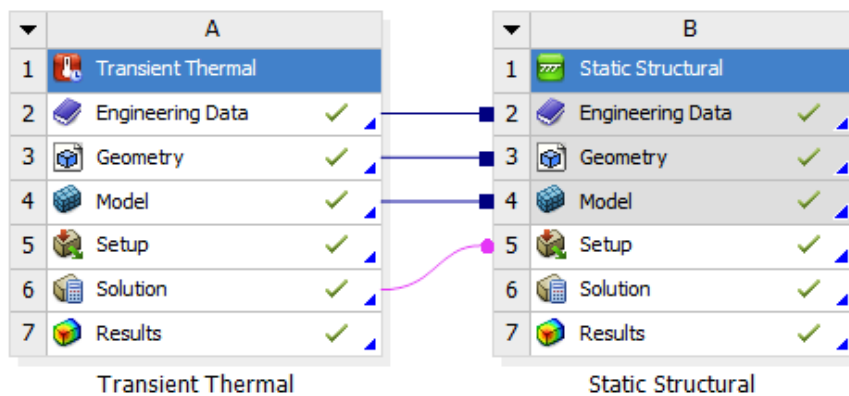


Fig. 2.16 Enlace de modelo térmico transitorio y estático estructural.

Con la relación establecida entre ambos modelos se dio inicio a la fase de solución para ello se tomó como primer parámetro de entrada el historial térmico previamente obtenido como solución del modelo térmico transitorio, es decir cada temperatura es aplicada como una carga nodal de manera que cada análisis estructural parte del estado final de análisis del modelo anterior. Para las condiciones de frontera del modelo estructural se tomó en cuenta que la deformación de la junta es libre de fricción superficial por lo que no se define ninguna superficie de contacto y se define como único punto de anclaje las caras exteriores de las juntas. Para el método de solución del modelo se empleó el método estándar del paquete ANSYS que corresponde al método iterativo de ecuaciones no lineales, Full Newton Raphson. Para el criterio de convergencia se establece un valor de 0.1 mm. Para el análisis estructural no fue necesario considerar cambios de fase porque el material no posee dichas características. Como último paso de la fase de solución se ejecutó el comando SOLVE y se guardó los resultados con el historial de desplazamientos y deformaciones.

La etapa de post-procesamiento se llevó a cabo obteniendo las deformaciones totales de la junta respecto a cada eje coordenado en cada punto de análisis del esquema de la Fig. 2.6 para posteriormente compararlas con las deformaciones experimentales obtenidas.

3. RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES


3.1. Resultados

En esta sección se muestran los resultados de los ensayos de inspección visual, macrografía, rotura de filete y espectrometría realizados al material base y a la junta soldada; y, los resultados generados en las simulaciones térmica y estructural.

3.1.1 Resultado de inspección visual

De acuerdo a la metodología del punto 2.6.1 para la inspección se utilizó luz natural, una galga y una hoja de papel milimetrado como referencia de longitud y una vez ejecutado el ensayo, sus resultados se muestran en la tabla 3.1.


Tabla 3.1 Resultados de la inspección visual.

| | | | | | |
|--|----------|-------------|---|--------------------|----------|
| Identificación: | Junta T1 | WPS: | 1 | Bajo Norma: | AWS D1.6 |
|  | | | | | |
| Observaciones | | | | | |
| El cordón presenta uniformidad en toda su longitud. No se observan fisuras, poros o socavamientos. Se observa un quemón al inicio del cordón de 5 mm de diámetro. Se observa deformación angular por convexidad en ángulo descendente. | | | | | |
| Conclusión | | Aprueba | | | |

3.1.2 Resultado del ensayo de rotura de filete

De acuerdo a la metodología del punto 2.6.2 el cordón de soldadura fue sometido a tensión por medio de la máquina universal de ensayos y una vez realizado el ensayo sus resultados se muestran en la tabla 3.2.

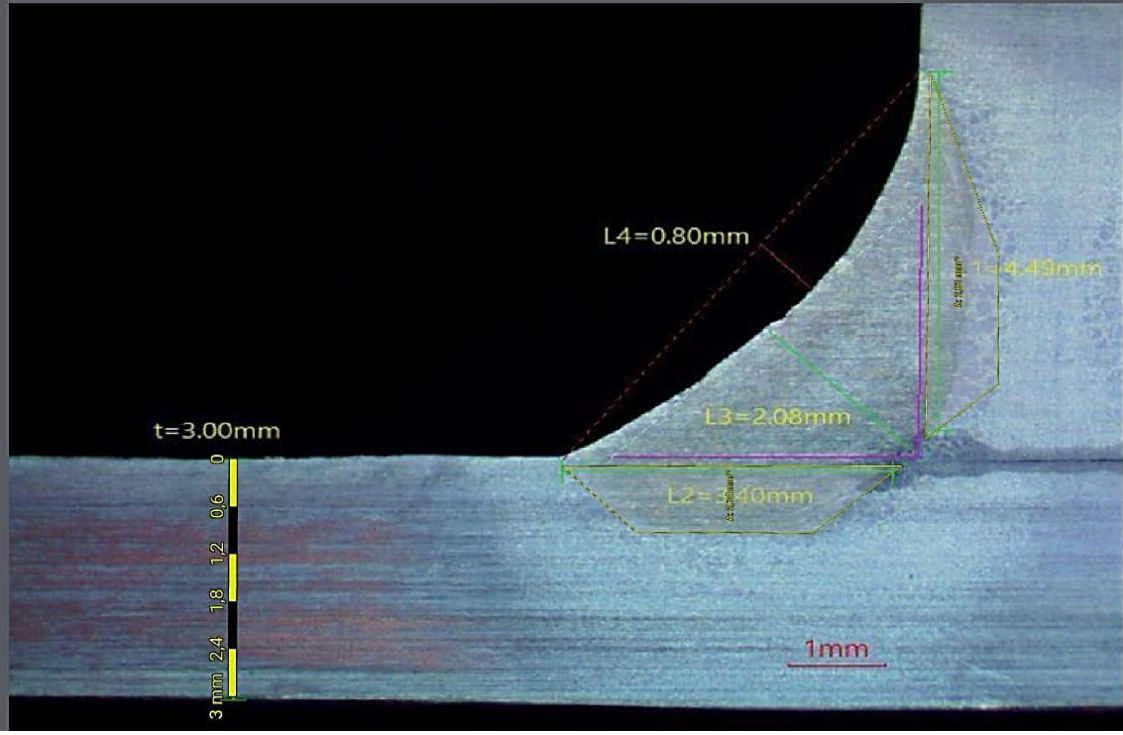
Tabla 3.2 Resultados de la rotura de filete.

| Identificación: | Junta T-1 | WPS: | 001 | Bajo Norma: | AWS D1.6 |
|---|-----------|------|---------|-------------|----------|
|  | | | | | |
| Observaciones | | | | | |
| Se observa total dobléz sobre su propio plano. | | | | | |
| Conclusión | | | Aprueba | | |

3.1.3 Resultado del ensayo de Macrografía

En la tabla 3.3, se muestran los resultados de la macrografía realizada a la sección transversal del cordón de soldadura con un aumento de 10X; donde se aprecia a detalle la geometría y dimensiones del cordón y la zona afectada por el calor (ZAC)

Tabla 3.3 Resultados de la macrografía.

| | | | | | |
|---|-----------|------|---------|--------|----------|
| Identificación: | Junta T-1 | WPS: | 001 | Norma: | AWS D1.6 |
|  | | | | | |
| Observaciones | | | | | |
| <p>Se observa una longitud de pierna L1 de 4.49 mm y L2 de 3.40 mm. El cordón presenta ligera convexidad. Se observa fusión completa en la raíz. Se observa fusión entre capas adyacentes. Se observa fusión entre material base y soldadura. No se observan mordeduras, grietas, poros ni inclusiones.</p> | | | | | |
| Conclusión | | | Aprueba | | |

3.1.4 Resultados del ensayo de espectrometría

A continuación, en la tabla 3.4 se presentan a detalle los resultados del ensayo de espectrometría; en la tabla se puede apreciar que la composición química del material se encuentra dentro de los parámetros esperados para el acero inoxidable AISI 430 dado que su contenido de cromo está entre el 16% y 18%; además su contenido de carbono, silicio, níquel y fósforo no supera los valores determinados por la ASTM.

Tabla 3.4 Resultados obtenidos del ensayo de espectrometría.

| Elemento | Medias [%] | Desviación Estándar [%] | Intervalo de confianza (95%) |
|----------------|--------------|-------------------------|------------------------------|
| Carbono [C] | 0.062 | 0.032 | 0,062 ± 0,0367 |
| Silicio [Si] | 0.281 | 0.044 | 0,281 ± 0,0504 |
| Manganeso [Mn] | 0.301 | 0.0038 | 0,301 ± 0,0044 |
| Fósforo [P] | 0.021 | 0.0010 | 0,021 ± 0,0011 |
| Cromo [Cr] | 16.22 | 0.055 | 0,22 ± 0,0630 |
| Níquel [Ni] | 0.130 | 0.147 | 0,130 ± 0,1685 |
| Cobalto [Co] | 0.025 | 0.015 | 0,025 ± 0,0172 |
| Vanadio [V] | 0.048 | 0.019 | 0,048 ± 0,0218 |
| Hierro [Fe] | 82.89 | 0.232 | 82,89 ± 0,2659 |
| TOTAL | 99.98 | | |

3.1.4 Resultados de la simulación térmica

En la Fig. 3.1, se muestra el campo térmico generado por la fuente a los 22 segundos de iniciada la simulación, con el fin de ilustrar la forma de la fuente y su movimiento; la imagen corresponde a una perspectiva isométrica, la animación completa del movimiento de la fuente vista desde diferentes perspectivas se muestra en el video del siguiente link: https://youtu.be/3-I_e3vX8LA

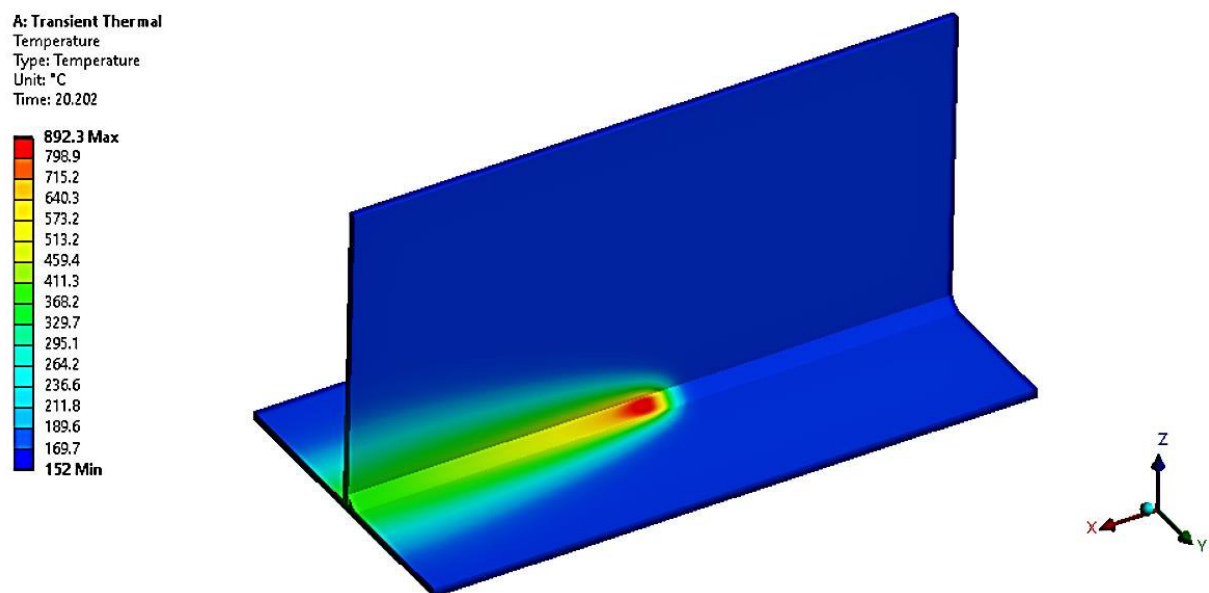


Fig. 3.1 Campo térmico de la fuente a los 22 segundos.

En la Fig. 3.2 y Fig. 3.3, en línea continua se muestran los perfiles de temperatura respecto al tiempo obtenidos de la simulación térmica del proceso de soldadura y del enfriamiento de las placas a diferentes distancias respecto al eje de soldadura, en línea entre cortada y marcadores se muestran los datos experimentales. Acorde al esquema de la Fig. 2.2 los resultados de la Fig. 3.2 corresponden a la placa 1 y la Fig. 3.3 a la placa 2.

En la Fig. 3.2, el paso del tiempo se presenta a escala logarítmica. Se evidencia que los datos experimentales y simulados para la placa 1 tienen la misma tendencia. Se observa que previo al paso de la fuente de calor la temperatura en cada punto es constante debido al precalentamiento de la junta; se muestra además que los picos máximos de temperatura alcanzados en cada punto se desplazan hacia la derecha debido al tiempo que tarda la fuente en calentarlos, la gráfica permite además observar que alrededor de los 200 s el enfriamiento es uniforme en todos los puntos.

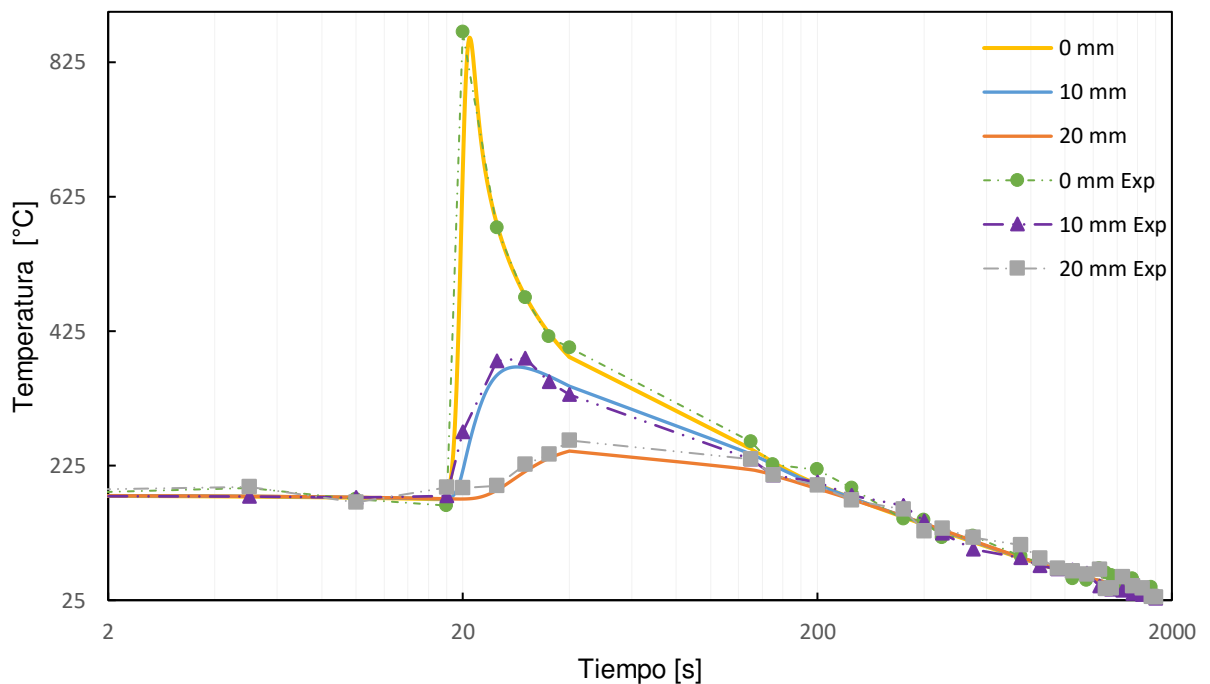


Fig. 3.2 Perfil de temperatura placa 1.

En la Fig. 3.3, el paso del tiempo se presenta a escala logarítmica, las gráficas permiten observar que los datos experimentales y simulados para la placa 2 tienen la misma tendencia, se evidencia además que a 35 mm de distancia del eje de soldadura el efecto de la fuente de calor es imperceptible porque no existe aumento de temperatura alguno.

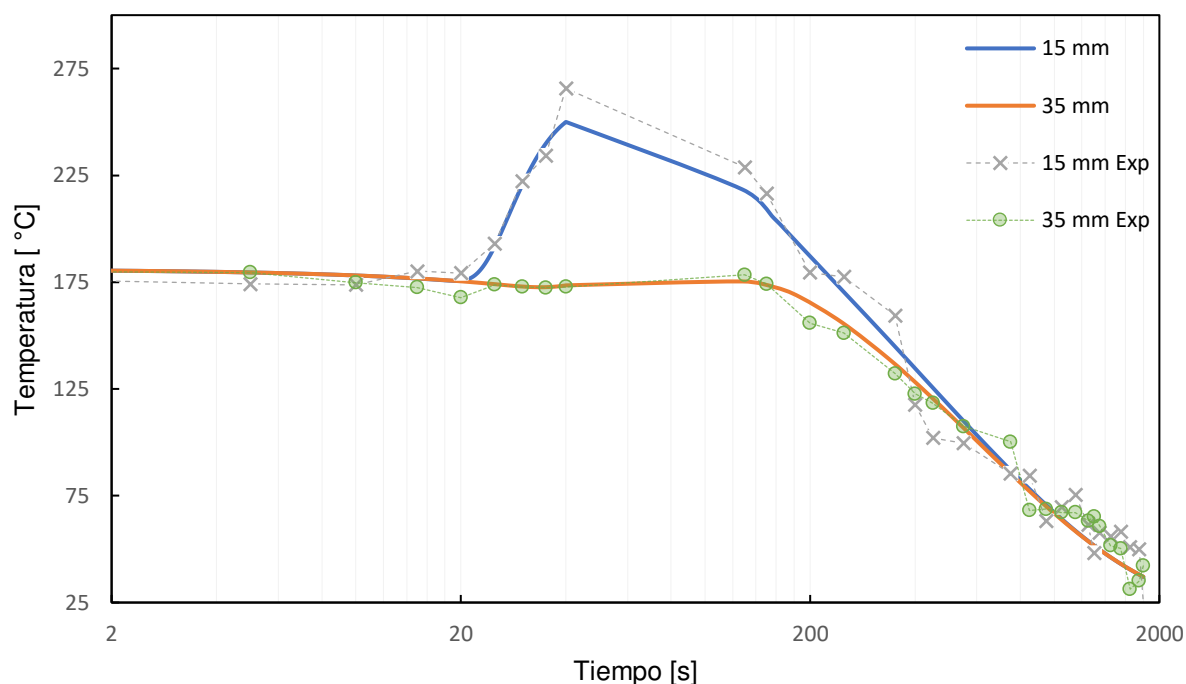


Fig. 3.3 Perfil de temperatura- tiempo placa 2.

En la tabla 3.5, se muestra el porcentaje de error promedio calculado para cada placa entre los datos obtenidos de la simulación y los datos experimentales respecto a la distancia del eje de soldadura; luego se muestra el error promedio de la simulación térmica; la tabla evidencia que el error para todos puntos de análisis es menor al 10 %. Los valores de error para cada punto y paso de tiempo se muestran en las tablas del Anexo II y III.

Tabla 3.5 Error promedio de la simulación térmica.

| | 0mm | 10mm | 15 mm | 20mm | 35mm | Promedio |
|-----------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|
| Error Placa 1 | 7.82 % | 8.49 % | --- | 9.10 % | --- | 8.47 % |
| Error Placa 2 | --- | --- | 6.45 % | --- | 5.57 % | 6.01 % |
| Error promedio simulación térmica | | | | | | 7.24 % |

3.1.4 Resultados de la simulación estructural

En la Fig. 3.4, se muestra los perfiles de deformación totales obtenidos con el fin de ilustrar la dirección y amplitud de deformación de la junta; la imagen corresponde a una perspectiva superior, la animación completa de la deformación de la junta vista desde diferentes perspectivas se muestra en el video del punto anterior.

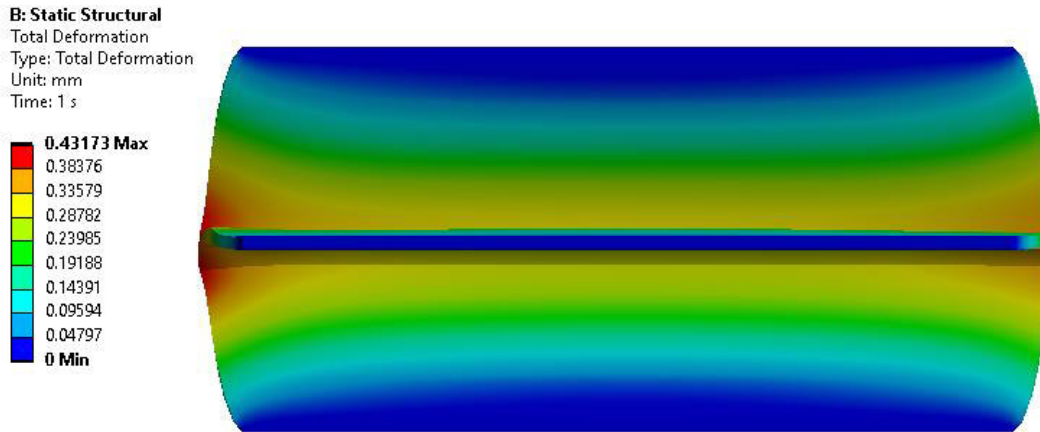


Fig. 3.4 Perfil de deformación de la junta.

En la Fig. 3.4, se muestran los valores totales de deformación longitudinal para la placa 1 obtenidos de la simulación estructural y de los datos experimentales. La figura evidencia que la mayor contracción de la placa se da en la zona del cordón de soldadura.

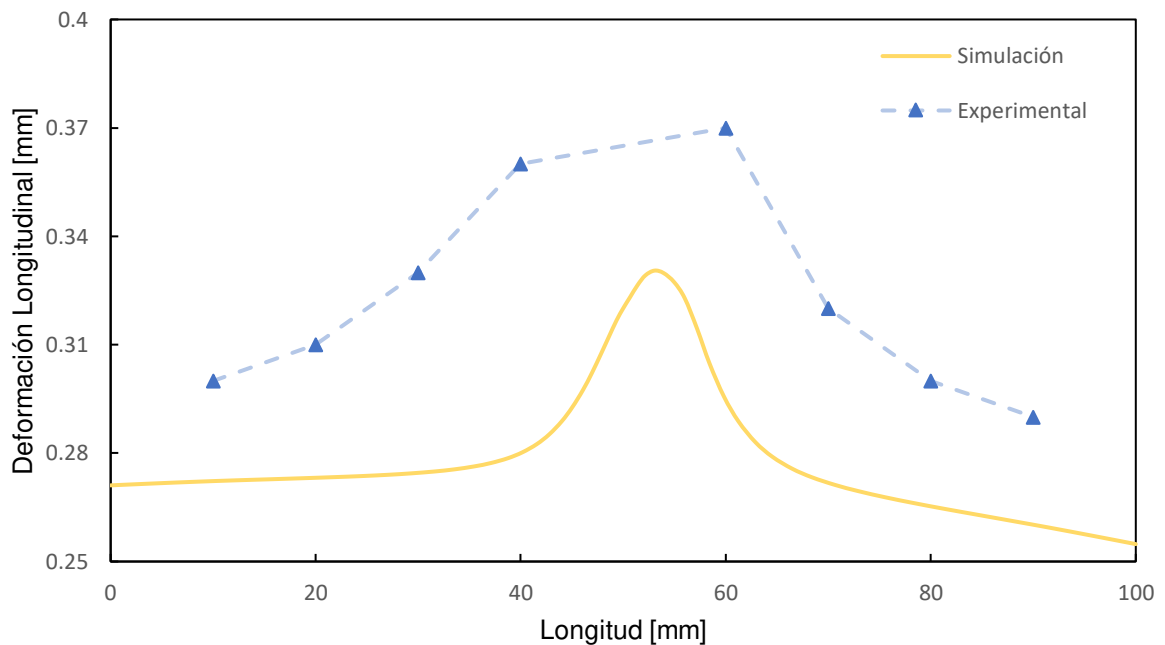


Fig. 3.4 Perfil de deformaciones longitudinal placa 1.

En la Fig. 3.5, se muestran los valores totales de deformación transversal para la placa 1, obtenidos de la simulación estructural y de los datos experimentales. La figura permite observar que la mayor contracción de la placa se da en las zonas de inicio y final del cordón de soldadura.

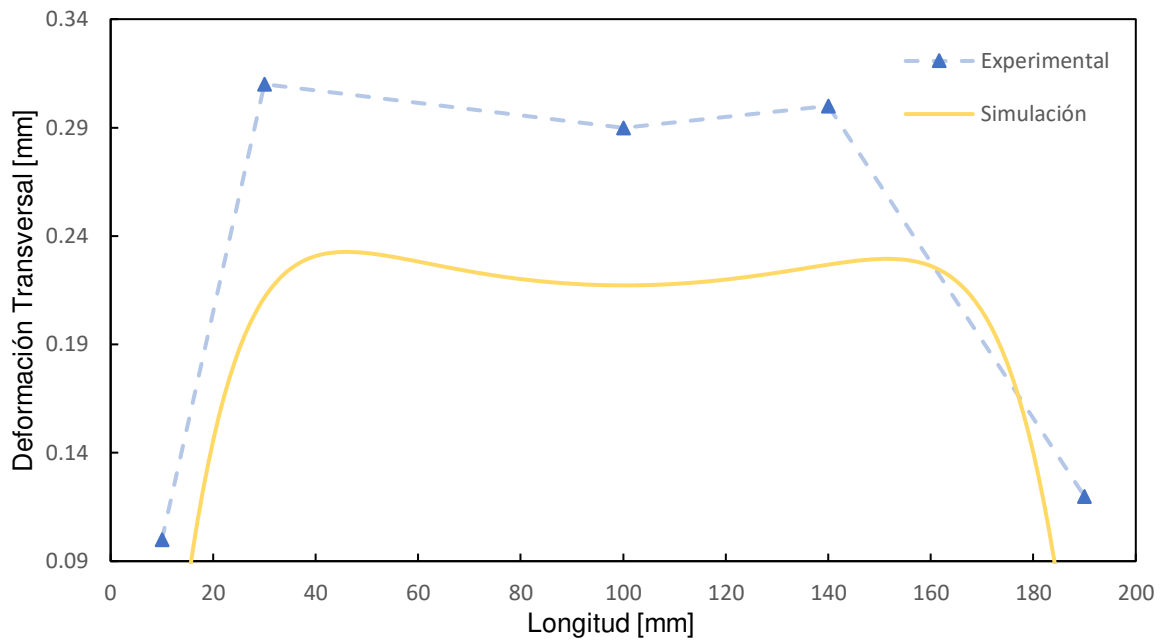


Fig. 3.5 Perfil de deformaciones transversales placa 1.

En la Fig. 3.6, se muestran los valores totales de deformación longitudinal para la placa 2, obtenidos de la simulación estructural y de los datos experimentales. La figura permite observar que la mayor contracción de la placa se da en la zona de inicio del cordón de soldadura.

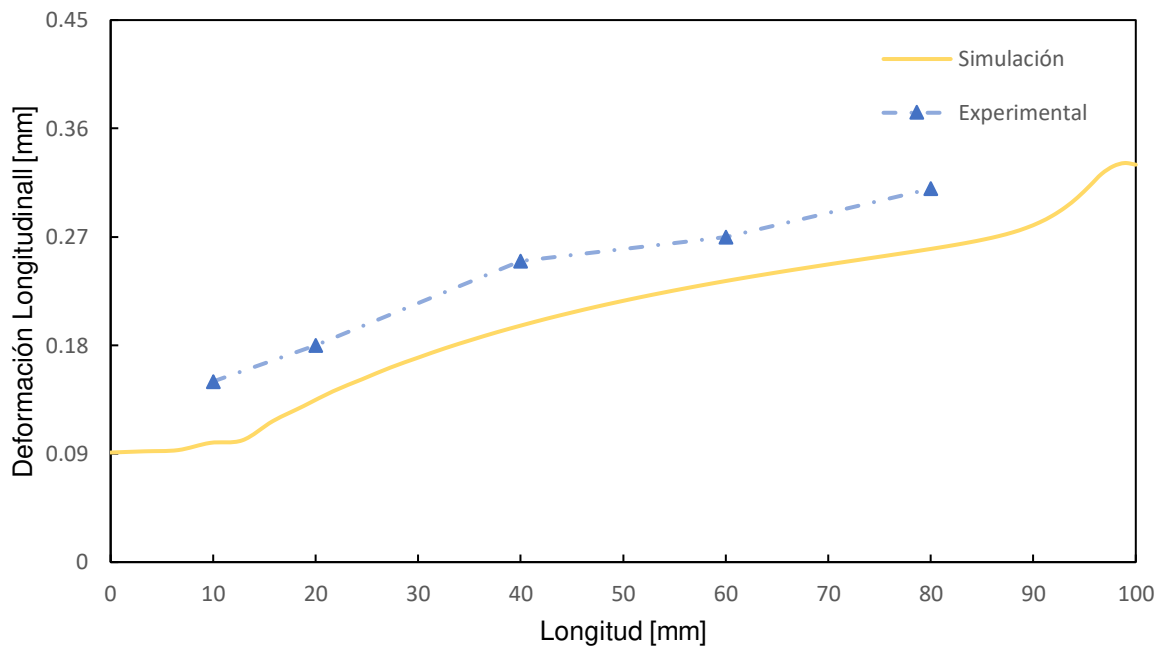


Fig. 3.6 Perfil de deformaciones longitudinal placa 2.

En la Fig. 3.7, se muestran los valores totales de deformación transversal para la placa 2, obtenidos de la simulación estructural y de los datos experimentales. La figura permite observar que la mayor contracción de la placa se da en la zona central de la placa.

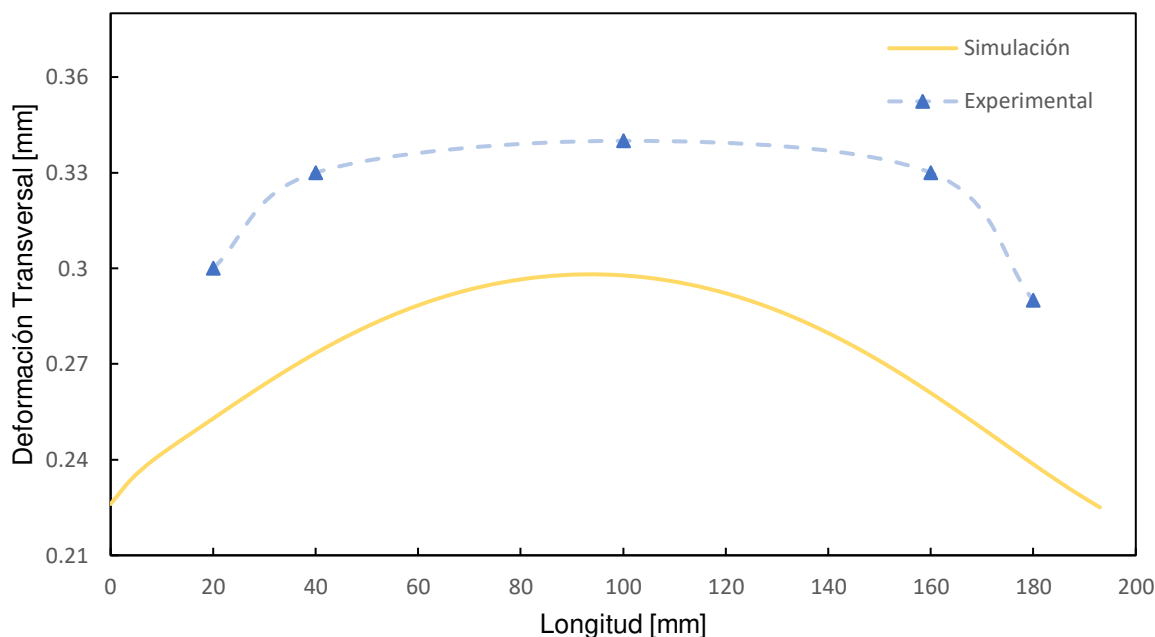


Fig. 3.7 Perfil de deformaciones transversal placa 2.

En la tabla 3.6 se muestra el porcentaje de error promedio calculado para cada placa entre los datos obtenidos de la simulación y los datos experimentales, la tabla evidencia que el error de la simulación estructural es mayor que el de la simulación térmica.

Tabla 3.6 Error promedio de la simulación estructural.

| Placa 1 | | Placa2 | |
|--|--------|--------------------------|--------|
| Deformación longitudinal | | Deformación longitudinal | |
| Error | 16.87% | Error | 17.43% |
| Deformación Transversal | | Deformación Transversal | |
| Error | 17.77% | Error | 18.44% |
| Error promedio simulación estructural | | 17.6% | |

3.2. Conclusiones

El objetivo general planteado en este proyecto fue alcanzado, ya que se obtuvieron los resultados previstos experimentalmente en las simulaciones térmica y estructural realizadas mediante ANSYS.

La elaboración de juntas soldadas tipo T fue satisfactoria, puesto que se obtuvo un cordón que al ser evaluado bajo la norma AWS D1.6 logro cumplir todos los criterios de aceptación establecidos por la misma.

La simulación del comportamiento de juntas soldadas tipo T mediante ANSYS se llevó con éxito, dado que la simulación de la fuente de calor, enfriamiento y deformación de la junta fue óptimo, obteniendo como resultado un perfil de temperaturas y deformaciones con la misma tendencia que los obtenidos de manera experimental.

Se cumplió con la validación de los métodos de elementos finitos térmico y estructural considerando que la comparativa de datos simulados y experimentales evidencia una misma tendencia en ambos casos y su error es del 7.24% y 17.6% respectivamente, lo que permite dar como válida la simulación.

1.3. Recomendaciones

Para reducir el error del análisis estructural se necesita emplear propiedades mecánicas del material termodependientes; en vista que en la literatura revisada no existen estos datos, se recomienda desarrollar un trabajo que permita disponer de ellos.

Se recomienda complementar el trabajo con una parametrización de las dimensiones de la junta y cordón de soldadura, propiedades y tipo de material, temperaturas de precalentamiento y mallado con el fin de disminuir el tiempo de desarrollo y aumentar el número de casos de analizados.

Se recomienda realizar una simulación a detalle del proceso de soldadura en el cordón y sus proximidades con el fin de analizar y predecir cambios de microestructura y dimensiones de la zona afectada por el calor.

Se recomienda complementar el ensayo de inspección visual con ensayos no destructivos como tintas penetrantes o radiografía con el objetivo de descartar presencia de defectos subsuperficiales.

4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS



- [1] Ibarra Echeverría, M., & Núñez Solís, E. Huerta Ibáñez JM Manual ACEROS INOXIDABLES. *Santiago de Chile: INDURA, 63.*
- [2] Steels, A. (2013). Atlas steels technical handbook of stainless steels. *Stainless Steel, 630, 17-4PH.*
- [3] Folkhard, E. (2012). *Welding metallurgy of stainless steels.* Springer Science & Business Media.
- [4] Alam, M. K., Urbanic, J., Saqib, S. M., & Edrisy, A. (2015, October). Effect of process parameters on the microstructural evolutions of laser clad 420 martensitic stainless steel. In *Materials science and technology conference proceedings (MS&T15), October* (pp. 4-8).
- [5] Shandong Guanyu Metal Technology Co.,LTD, “420 Stainless Steel Sheet,” *Gy-ss.com*, Dec. 08, 2021.]
- [6] Arrieta Estrella, E. A., & Pacheco Castellar, F. A. (2004). Soldabilidad de aceros inoxidable y tipos de juntas
- [8] Jeffus, L. (2008). *Manual de soldadura GTAW (TIG).* Editorial Paraninfo.
- [9] Jeffus, L. (2009). *Soldadura. Principios y aplicaciones* (Vol. 5). Editorial Paraninfo.
- [10] Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (1999). *Fundamentos de transferencia de calor.* Pearson Educación.
- [11] Gordo, A. G., & Piris, N. M. (2012). *Ciencia de materiales para ingenieros.* Pearson Educación.
- [12] Sun, J. (2005). *Modeling and finite element analysis of welding distortions and residual stresses in large and complex structures.* The Pennsylvania State University.
- [13] He, M., Qi, J., Zheng, Z., Shi, F., & Lei, Y. (2020). Numerical simulation of nickel-based alloys' welding transient stress using various cooling techniques. *High Temperature Materials and Processes, 39*(1), 633-644.
- [14] Faraldos, M., & Goberna, C. (2021). Técnicas de análisis y caracterización de materiales. *Técnicas de análisis y caracterización de materiales, 1-1052.*
- [15] “Q2 ION,” *Bruker.com*, 2022. <https://www.bruker.com/es/products-and-solutions/elemental-analyzers/optical-emission-spectrometers/q2-ion.html> (accessed Feb. 10, 2022).
- [16] Gallo Chacón, J. E., & Mero Mendoza, V. A. (2017). *Estudio experimental de la soldabilidad en el acero inoxidable ferrítico AISI 430 con material de aporte austenítico mediante el proceso de soldadura GTAW* (Bachelor's thesis, Quito, 2017.).
- [17] “Manual de soldadura Westarco”.[Internet]. Disponible en <https://www.westarco.com/westarco/sp/support/documentation/upload/manual-de-soldadura-2015v2.pdf>
- [18] “Catalogo De Varillas Y Electrodo Para Aceros Inoxidables”. *INDURA,2021.*
- [19] Norma AWS D1.6: Structural Welding Code – Stainless Steel, Miami (EE. UU.): American Welding Society, 124

- [20] User Guide “Glorystar Ipg 1000W GS-3015”, 2021
- [21] Guide, F. M. S. (2012). Welding & Cutting Product Catalog Lincoln Electric. *Montana*.
- [22] Pirómetro infrarrojo DT – Información Técnica - ETEKCITY,” 2020
- [23] Norma AWS B4. 0-98: Standard Methods for Mechanical Testing of Welds. Miami (EE. UU.): American Welding Society, 59
- [24] Catálogo de productos Flow Shape, 2021
- [25] Amuda, M. O. H., Lawal, F. T., Onitiri, M. A., Akinlabi, E. T., & Mridha, S. (2018). Microstructure and Mechanical Properties of Metal Powder Treated AISI-430 FSS Welds. *International Journal of Manufacturing, Materials, and Mechanical Engineering (IJMMME)*, 8(4), 63-83.
- [26] Onate, E., & Zárata, F. (2001). Introducción al método de los elementos finitos. *Curso de Máster en Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería. Apuntes de la asignatura. ix*, 13, 15-16.
- [27] Thompson, M. K., & Thompson, J. M. (2017). *ANSYS mechanical APDL for finite element analysis*. Butterworth-Heinemann.
- [28] Pozo-Morejón, J. A., Quintero-Acosta, P. E., Cruz-Crespo, A., & Díaz-Cedré, E. (2011). Gtaw welding thermal analysis on aisi 316l steel plate using the finite elements method. *Soldagem & Inspeção*, 16(3), 256-264.

5. ANEXOS

ANEXO I

ESPECIFICACIÓN DEL PROCESO DE SOLDADURA (WPS)

| | | | | | |
|--|-----------------|---|---|---|--|
|  | | ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL DEPARTAMENTO DE MATERIALES LABORATORIO DE SOLDADURA | |  | |
| Nombre Compañía: Escuela Politécnica Nacional PQR N°.001 Según Norma: AWS D1.6 | | | N°. Identificación: EPN:001 Fecha 10/01/2022 Realizado por: Moreno Hugo | | |
| Artículo I. Junta Utilizada | | Artículo II. Técnica de soldadura | | | |
| Tipo de junta: | Unión en T | Proceso de soldadura: | GTAW (TIG) | | |
| Abertura de raíz: | --- | Manual: | Manual | | |
| Talón: | No [X] Si [] | Tipo de soldadura: | Un lado | | |
| Angulo de ranura: | No [X] Si [] | Soldadura a: | No | | |
| Placa de respaldo: | No [X] Si [] | Cordón de respaldo: | ----- | | |
| Preparación bisel: | ----- | Limpieza: | ----- | | |
| Método: | ----- | Antes: | Cepillo Metálico | | |
| | | Después: | | | |
| Artículo III. Metal base | | Artículo V. Posición de soldadura | | | |
| Especificación: | AISI 430 | Posición de soldadura: | 2F | | |
| Espesor: | 3 mm | Progresión: | Derecha a izq. | | |
| Longitud: | 202 mm | Técnica: | Un pase oscilado | | |
| Ancho: | 102 mm | | | | |
| Artículo IV. Material de Aporte | | Artículo VI. Electrodo | | | |
| Denominación AWS | ER-308L | Tipo: | EWTh- 2 | | |
| Diámetro: | 2.38 mm (3/32") | Tamaño: | 2.38 mm (3/321") | | |
| Casa Comercial | INDURA | | | | |
| Denominación Comercial: | 308L | | | | |
| Artículo VII. Protección del Arco | | Artículo VIII. Pre calentamiento | | | |
| Tipo de gas: | Ar 100% | Temperatura Min: | 180 °C | | |
| Flujo: | 20 lt/min | Temperatura entre pases: | ----- | | |
| DETALLE DE JUNTA | | | | | |
|  | | | | | |

Artículo IX. Cuadro de las variables de operación

| Numero de Pases | Metal de aporte | | Corriente | | Tensión De trabajo (V) | Velocidad de avance (mm/min) | Técnica de soldadura | |
|-----------------|-----------------|----------|------------------|----------------|------------------------|------------------------------|----------------------|-------|
| | Clase | Diámetro | Tipo y Polaridad | Intensidad (A) | | | Oscilado | Recto |
| 1 | ER-308L | 3.2 mm | DC (-) | 100 | 8 | 86 | X | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |

ANEXO II

Tabla de valores de error para cada punto y paso de tiempo para placa 1

| DATOS DE LA SIMULACIÓN | | | | DATOS EXPERIMENTALES | | | % ERROR | | |
|------------------------|--------|---------|---------|----------------------|----------|----------|----------|---------|---------|
| | D=0 mm | D= 10mm | D= 20mm | D = 0mm | D = 10mm | D = 20mm | D = 0 mm | D =10mm | D =20mm |
| T [s] | T [°C] | T [°C] | T [°C] | T [°C] | T [°C] | T [°C] | %ERROR | %ERROR | %ERROR |
| 0.19 | 180.49 | 180.9 | 178.12 | 171.19 | 180.5 | 181.84 | 5.43 | 0.22 | 2.83 |
| 5 | 178.89 | 179.2 | 179.26 | 191.96 | 179.3 | 193.49 | 6.81 | 0.06 | 7.09 |
| 10 | 177.19 | 179.59 | 177.85 | 175.04 | 177.65 | 170.36 | 1.23 | 1.09 | 3.66 |
| 15 | 175.55 | 176.07 | 176.43 | 165.43 | 180.17 | 192.39 | 6.12 | 2.28 | 5.65 |
| 20 | 861.49 | 259.48 | 175.89 | 869.29 | 275.38 | 191.58 | 0.90 | 5.77 | 2.90 |
| 25 | 580.84 | 366.07 | 193.57 | 578.34 | 380.45 | 195.07 | 0.43 | 3.78 | 7.84 |
| 30 | 468.64 | 369.07 | 184.73 | 475.06 | 385 | 227.09 | 1.35 | 4.14 | 0.14 |
| 35 | 415.56 | 355.74 | 238.3 | 416.76 | 350 | 241.80 | 0.29 | 1.64 | 21.33 |
| 40 | 386.57 | 343.24 | 246.8 | 400.16 | 330.58 | 262.60 | 3.40 | 3.83 | 4.23 |
| 130 | 251.84 | 243.71 | 219.56 | 260.70 | 234.45 | 234.98 | 3.40 | 3.95 | 0.41 |
| 150 | 223.96 | 220.43 | 207.43 | 226.72 | 210.78 | 210.85 | 1.22 | 4.58 | 2.32 |
| 200 | 204.18 | 202.85 | 179.56 | 218.98 | 200.74 | 196.04 | 6.76 | 1.05 | 0.65 |
| 250 | 177.57 | 177.93 | 175.56 | 191.69 | 180.56 | 173.94 | 7.37 | 1.46 | 1.18 |
| 350 | 151.92 | 152.98 | 152.9 | 145.33 | 165.58 | 160.30 | 4.53 | 7.61 | 1.14 |
| 400 | 132.69 | 133.85 | 140.17 | 143.82 | 142.63 | 127.48 | 7.74 | 6.16 | 2.45 |
| 450 | 117.4 | 118.44 | 107.49 | 118.05 | 124.73 | 131.49 | 0.55 | 5.04 | 0.78 |
| 550 | 104.8 | 94.901 | 106.39 | 120.32 | 100.47 | 118.33 | 12.90 | 5.54 | 4.37 |
| 750 | 94.197 | 85.726 | 90.512 | 90.17 | 87.74 | 107.21 | 4.47 | 2.30 | 4.81 |
| 850 | 85.167 | 77.848 | 77.48 | 80.88 | 76.47 | 87.15 | 5.30 | 1.80 | 4.99 |
| 950 | 77.408 | 71.046 | 72.496 | 71.03 | 71.63 | 71.90 | 8.99 | 0.82 | 11.97 |
| 1050 | 70.701 | 65.148 | 71.362 | 57.00 | 70.14 | 68.48 | 24.03 | 7.12 | 9.58 |
| 1150 | 64.878 | 60.015 | 69.33 | 54.63 | 65.31 | 63.38 | 18.76 | 8.11 | 10.41 |
| 1250 | 59.803 | 55.535 | 60.214 | 71.65 | 45.78 | 70.40 | 16.53 | 21.31 | 26.70 |
| 1300 | 55.369 | 51.616 | 53.74 | 65.68 | 41.73 | 41.72 | 15.70 | 23.69 | 8.16 |
| 1350 | 51.485 | 48.179 | 51.742 | 61.19 | 40.95 | 42.96 | 15.86 | 17.65 | 25.81 |
| 1450 | 48.075 | 45.16 | 48.28 | 47.97 | 39.69 | 59.18 | 0.22 | 13.78 | 1.16 |
| 1550 | 45.078 | 42.503 | 45.241 | 56.32 | 35.15 | 46.04 | 19.96 | 20.92 | 19.70 |
| 1650 | 42.439 | 40.163 | 42.569 | 41.05 | 32.96 | 42.89 | 3.37 | 21.85 | 11.48 |
| 1750 | 40.112 | 38.099 | 40.217 | 44.31 | 30.80 | 30.48 | 9.47 | 23.69 | 35.39 |
| 1800 | 38.058 | 36.884 | 38.143 | 31.32 | 27.63 | 28.96 | 21.51 | 33.49 | 33.98 |

ANEXO III

Tabla de valores de error para cada punto y paso de tiempo para placa 2

| DATOS DE LA SIMULACIÓN | | | DATOS EXPERIMENTALES | | % ERROR | |
|------------------------|---------|---------|----------------------|-----------|---------|---------|
| | D= 15mm | D= 35mm | D = 15mm | D = 35 mm | D =15mm | D =35mm |
| T [s] | T [°C] | T [°C] | T [°C] | T [°C] | % ERROR | % ERROR |
| 0.199 | 180.9 | 180.9 | 178.80 | 180.74 | 1.17 | 0.09 |
| 5 | 179.37 | 180.84 | 174.14 | 180.00 | 3.00 | 0.47 |
| 10 | 177.91 | 180.78 | 173.78 | 178.54 | 2.38 | 1.25 |
| 15 | 176.44 | 180.72 | 180.15 | 176.14 | 2.06 | 2.60 |
| 20 | 176.08 | 180.66 | 179.31 | 174.29 | 1.80 | 3.65 |
| 25 | 193.34 | 180.61 | 193.13 | 173.83 | 0.11 | 3.90 |
| 30 | 222.72 | 180.55 | 222.33 | 172.77 | 0.18 | 4.50 |
| 35 | 241.52 | 180.5 | 234.15 | 172.37 | 3.15 | 4.72 |
| 40 | 249.99 | 180.44 | 265.71 | 172.75 | 5.91 | 4.45 |
| 130 | 218.38 | 175.33 | 228.80 | 178.41 | 4.55 | 1.73 |
| 150 | 205.05 | 172.75 | 216.56 | 174.10 | 5.32 | 0.78 |
| 200 | 192.29 | 168.09 | 179.55 | 166.52 | 7.09 | 0.94 |
| 250 | 170.98 | 155.9 | 177.56 | 155.12 | 3.71 | 0.50 |
| 350 | 148.03 | 139.12 | 159.42 | 139.00 | 7.14 | 0.09 |
| 400 | 125.05 | 124.37 | 117.54 | 122.65 | 6.39 | 1.40 |
| 450 | 115.51 | 111.67 | 102.07 | 112.27 | 13.16 | 0.53 |
| 550 | 103.43 | 100.75 | 99.66 | 104.47 | 3.79 | 3.56 |
| 750 | 93.231 | 91.332 | 85.33 | 95.74 | 9.25 | 4.60 |
| 850 | 84.506 | 74.14 | 84.50 | 68.19 | 0.00 | 8.73 |
| 950 | 76.981 | 73.52 | 68.74 | 68.78 | 11.99 | 6.89 |
| 1050 | 70.451 | 69.792 | 69.60 | 67.20 | 1.23 | 3.85 |
| 1150 | 69.85 | 64.315 | 75.35 | 65.78 | 7.30 | 2.23 |
| 1250 | 59.781 | 59.495 | 61.53 | 65.00 | 2.85 | 8.47 |
| 1300 | 53.47 | 55.245 | 48.22 | 63.14 | 10.89 | 12.50 |
| 1350 | 51.577 | 51.492 | 57.73 | 60.79 | 10.66 | 15.30 |
| 1450 | 48.199 | 48.175 | 55.93 | 51.69 | 13.83 | 6.79 |
| 1550 | 45.22 | 45.239 | 58.17 | 50.31 | 22.27 | 10.08 |
| 1650 | 42.591 | 40.69 | 50.95 | 31.29 | 16.40 | 30.05 |
| 1750 | 40.268 | 39.74 | 43.65 | 35.13 | 7.75 | 13.12 |
| 1800 | 38.213 | 38.293 | 35.30 | 35.00 | 8.25 | 9.41 |

ANEXO IV



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

DEPARTAMENTO DE MATERIALES

LABORATORIO DE FUNDICIÓN



INFORME TÉCNICO

Solicitado por: Ing. Willan Monar Msc

Tipo de Trabajo: Espectrometría por chispa

Fecha: 22 de noviembre del 2021

Realizado por: Ing. Oscar Sotomayor/Ing. Luis G. Huilca

Descripción: Muestra de material metálico


1. ANTECEDENTES.

Se recibe en el Laboratorio de Fundición de la Escuela Politécnica Nacional una probeta de material metálico.

Se solicita realizar la prueba de espectroscopía por chispa con la finalidad de determinar los componentes presentes en la muestra entregada.

2. IDENTIFICACIÓN DE LA PROBETA.

La probeta para el análisis correspondiente es identificada como se muestra a continuación:

| Nombre | Identificación de la probeta | Identificación Gráfica |
|--------------------|------------------------------|--|
| MUESTRAS METÁLICAS | M1 |  |

3. ANTECEDENTES TÉCNICOS

3.1. Limpieza Superficial: Según norma ASTM E415 – 17 Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry

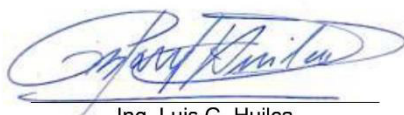
3.2. Métodos utilizado:

Fe 130 Cr/Ni Steels

4. VALORES OBTENIDOS

El análisis de espectrometría por chispa se realiza empleando el espectrómetro marca BRUKER modelo Q2 ION. Para el análisis se tomaron 3 mediciones en un punto del espécimen y finalmente se promediaron los valores.

| Elemento | M1 | | |
|----------------|--------------|-------------------------|------------------------------|
| | Medias [%] | Desviación Estándar [%] | Intervalo de confianza (95%) |
| Carbono [C] | 0,062 | 0,032 | 0,062 ± 0,0367 |
| Silicio [Si] | 0,281 | 0,044 | 0,281 ± 0,0504 |
| Manganeso [Mn] | 0,301 | 0,0038 | 0,301 ± 0,0044 |
| Fósforo [P] | 0,021 | 0,0010 | 0,021 ± 0,0011 |
| Cromo [Cr] | 16,22 | 0,055 | 16,22±0,0630 |
| Níquel [Ni] | 0,130 | 0,147 | 0,130 ± 0,1685 |
| Cobalto [Co] | 0,025 | 0,015 | 0,025 ± 0,0172 |
| Vanadio [V] | 0,048 | 0,019 | 0,048 ± 0,0218 |
| Hierro [Fe] | 82,89 | 0,232 | 82,89±0,2659 |
| TOTAL | 99,98 | | |



Ing. Luis G. Huilca

Técnico Responsable



Ing. Oscar Sotomayor

**Jefe del Laboratorio de
Fundición**



Con la finalidad de mejorar nuestros servicios, solicitamos de la manera más comedida se llene la encuesta mediante la captura del código QR adjunto, agradecemos su colaboración.

Bruker Analysis Report



Sample: M1

Analysis Time: 19.11.2021 09:46:14

Method: Fe130

| | | | | | |
|---|---------------|-------------------|---------------|-------------------|-------------------|
| | C [%] | Si [%] | Mn [%] | P [%] | S [%] |
| ∅ | 0,062 | 0,281 | 0,301 | 0,021 | <0,0030 |
| | Cr [%] | Mo [%] | Ni [%] | Cu [%] | Al [%] |
| ∅ | 16,22 | <0,0100 | 0,130 | <0,0050 | 0,0052 |
| | Co [%] | Nb [%] | Ti [%] | V [%] | Fe [%] |
| ∅ | 0,025 | <0,0100 | 0,0069 | 0,048 | 82,89 |

ANEXO V



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
MECÁNICA



LABORATORIO DE ANÁLISIS
DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES

F01-PE-LAEV-01 Rev.01

INFORME TÉCNICO

LAEV – M22.008

Quito, 31 de enero de 2022

Solicitado por: M.Sc. Willian Monar
Persona de contacto: Hugo Moreno
Teléfono: 0992654945
Correo: hugo.moreno@epn.edu.ec
Fecha de recepción: 24/01/2022
Fecha de ejecución: 28/01/2022

ORDEN DE TRABAJO N°: DM-OTI0013-2022

1. **MUESTRAS:** Una (1) probeta de junta soldada para ensayo de rotura de filete bajo norma AWS D1.6

2. GENERALIDADES E IDENTIFICACIÓN DE LAS MUESTRAS:

La siguiente descripción fue proporcionada por el cliente:

Título de la tesis: CARACTERIZACIÓN DE JUNTAS EN T SOLDADAS BAJO PROCESO GTAW (GAS TUNGSTEN ARC WELDING) EN PLACAS PLANAS DE 3MM DE ESPESOR, DE ACERO INOXIDABLE AISI 430.

En la tabla 1 se muestra la identificación de las muestras a ser ensayadas:

Tabla 1. Identificación de las muestras.

| Id. cliente | Id. LAEV |
|-------------|------------|
| T1 | M22.008.01 |

3. CONDICIONES AMBIENTALES:

Temperatura: $18,4 \pm 0,1$ °C

Humedad relativa: $64,1 \pm 0,4$ %



4. ENSAYO DE ROTURA DE FILETE

En la tabla 2 se presentan los resultados obtenidos en el ensayo de rotura de filete.

Tabla 2. Resultados del ensayo de doblado

| Identificación | Observaciones | Calificación |
|----------------|---|--------------|
| M22.008.01 | No existe rotura en la probeta a pesar de ser aplanada totalmente | Aprueba |

Nota.- Los resultados contenidos en el presente informe corresponden únicamente a las muestras ensayadas por el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones (LAEV). Además, los valores de fuerza que se emiten en el presente documento (y con los que se ha evaluado la conformidad) corresponden a valores corregidos en función del último certificado de calibración del equipo de fuerza y no se ha utilizado el valor de la incertidumbre


| | REVISADO POR: | APROBADO POR: |
|---|--|--|
| Firma: |  <p>Firmado digitalmente por: JONATHAN FERNANDO CASTRO REVELO</p> | <p>WILSON IVAN GUACHAMIN ACERO</p>  <p>Firmado digitalmente por: WILSON IVAN GUACHAMIN ACERO Fecha: 2022.01.31 11:06:08 -05'00'</p> |
| Nombre: | Ing. Jonathan Castro, M.Sc. | Ph.D. Wilson Guachamín |
| Cargo: | ESPECIALISTA DE LABRATORIO | JEFE |
| LABORATORIO DE ANALISIS DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES | | |

ANEXO VI

ILPM Ingeniería Líder en Proyectos Y Materiales



| | | |
|--|-------------|--|
| MACROGRAFIA | | ILPM Engineering Cía. Ltda. Emilio Estrada N54-139 Y Oruña Sector La Kennedy Quito-Ecuador Teléfono: 02 2812094 Fax: 02 2411714 http://www.ilpm-ec.com Email: ilpm@ilpm-ec.com |
| Informe # ILPM-2022-029 | | |
| DATOS DEL SOLICITANTE¹ ILPM TRABAJO SIMULADO Dirección: Emilio Estrada N54-139 y Oruña Teléfono: 2812094 | | |
| PARA CLIENTE FINAL: HUGO MORENO | | |
| Solicitado por: | HUGO MORENO | |
| Fecha de Recepción: | 21/1/2022 | |
| Fecha de Entrega: | 24/1/2022 | |

| ELABORADO | | REVISADO Y/O APROBADO | |
|-----------------------------------|--|--|---|
| WINTER PAUL CADENA ESPIN | Firmado digitalmente por WINTER PAUL CADENA ESPIN Fecha: 2022.01.24 15:40:56 -05'00' |  ILPM CIA. LTDA. FIRMA AUTORIZADA | Firmado digitalmente por IVAN PATRICIO ESTUPINAN PAZOS Fecha: 2022.01.24 15:55:26 -05'00' |

*ILPM se hace responsable por toda la información proporcionada en el presente informe, excepto aquella que es suministrada por el cliente.
 *Toda la información entregada a ILPM ENGINEERING por parte del cliente, su representante o cualquier parte interesada será considerada como CONFIDENCIAL antes, durante y después de la ejecución de las actividades.
 *Las muestras o probetas que no sean requeridas por el cliente serán desechadas de acuerdo al procedimiento interno ILPM-PC-14 "Recepción, manipulación, protección, almacenamiento, retención y disposición de muestras".
 *Los resultados presentados en el presente informe son válidos y aplicables únicamente para las muestras o probetas ensayadas o inspeccionadas y no deben ser utilizados para tomar conclusiones acerca de otras muestras, probetas, lotes, etc.
 *ILPM no es responsable del muestreo de la probeta o la muestra entregada por el cliente, por lo que los resultados entregados en el presente informe corresponden a la muestra o la probeta tal como se recibió.
 * Cuando el cliente ha solicitado una declaración de conformidad con una especificación o norma para el ensayo (por ejemplo, pasa/no pasa, dentro de tolerancia/fuera de tolerancia), se ha tomado en cuenta la incertidumbre de medición y la regla de decisión acordada con el cliente.
 *Se informa al cliente que puede comunicar a ILPM ENGINEERING, las quejas y apelaciones que estime oportunas de acuerdo al procedimiento ILPM-PC-05 "Servicio al Cliente", para la recepción, tratamiento e informe de quejas y apelaciones, disponible a través de nuestro correo electrónico ilpm@ilpm-ec.com o DESCARGÁNDOLO a través de la red Social LinkedIn. Buscar: ILPM Engineering. <https://www.linkedin.com/company/2575804/admin/>
 *Los alcances de acreditación de ILPM, los productos o materiales a ensayar o inspeccionar, la técnica y rangos de ensayo, el método de ensayo e inspección, así como la norma técnica, pueden ser consultados a detalle en la página web del SAE <https://www.acreditacion.gob.ec/>.
 2022. ILPM Engineering Cía. Ltda.
 Todos Los derechos reservados. Este informe o partes del mismo no deben ser reproducidos o transmitidos de forma parcial, salvo por autorización de ILPM, o en caso que haya sido comunicado durante la Orden de Compra.
¹ Solicitante es la empresa/persona "cliente" de ILPM la cual realizó la requisición del servicio y se compromete al pago por los servicios.

| | | | |
|-----------------------|----------------------------|---------------------------------|--------------------|
| Cliente: | HUGO MORENO | Fecha de Ensayo: | 24/1/2022 |
| Solicitante: | HUGO MORENO | Número de macros: | 1 |
| Temperatura: | 20±3°C | Humedad: | 60±20% |
| Fiscalización: | | Instrumento de medición: | INST-30 Micrómetro |
| Motivo: | ENSAYO DESTRUCTIVO GENERAL | | |

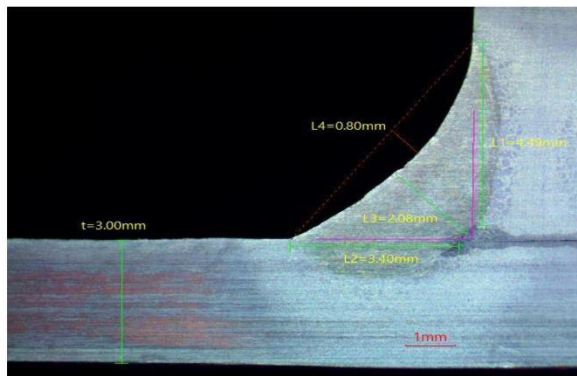
CONFORME NORMA AWS D1.6 (Structural Welding Code-Stainless Steel)

| | | | |
|-----------------|-------------------------|-------------------|------------|
| MACRO Nº | ESTAMPA SOLDADOR | ID PROBETA | WPS |
| 1 | NA | MCR | 1 |

RESULTADOS DE EVALUACIÓN

| DENOMINACIÓN | ESPECIFICADO | ENCONTRADO | A | R |
|--|---|---------------|---|---|
| L1 = Longitud de piernas | Debe conocerse el tamaño mínimo de pierna | 4.49 | X | |
| L2 = Longitud de piernas | Debe conocerse el tamaño mínimo de pierna | 3.40 | X | |
| L3 = Garganta | ----- | 2.08 | X | |
| L4 = Concavidad y Convexidad | Ligeramente Convexo o Cóncavo | 0.8 | X | |
| Fusión de la raíz | Debe existir fusión en la raíz pero no necesariamente mas allá de ella. | Se Observa | X | |
| Grietas | No se aceptan | No Se Observa | X | |
| Fusión entre capaz adyacentes | Debe existir fusión | Se Observa | X | |
| Fusión entre material base y soldadura | Debe existir fusión | Se Observa | X | |
| Mordeduras | ≤ 1 mm | No Se Observa | X | |

*NOTA: Los resultados presentados corresponden únicamente a las probetas extraídas y analizadas. ±U Representa la incertidumbre de medición del método de ensayo. Para la Aceptación (A)/Rechazo (R) se toma en cuenta la incertidumbre de medición (±U) del método de ensayo y la regla de decisión acordada.



RESULTADO:
APROBADO

COMENTARIO:
El análisis macrográfico es realizado bajo los criterios de aceptación establecidos en la norma AWS D1.6

| | | | |
|-----------------------------|----------------------|-----------------|-----------------------|
| Realizado Por: | Aprobado Por: | Cliente: | Fiscalización: |
| | | | |
| Paúl Cadena | Ing. Iván Estupiñán | | |
| Laboratorio ILPM Cía. Ltda. | CWI 09111401 | HUGO MORENO | |

***** Fin de Documento *****