

**MODELACIÓN COMPUTACIONAL DE LA  
DEFLEXIÓN EN JUNTAS SOLDADAS POR  
GTAW DE ACERO INOXIDABLE AISI 304,  
UTILIZANDO LA TÉCNICA DE ANÁLISIS DE  
ELEMENTOS FINITOS**



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

**DANIEL VALÉRY LANCHEROS MONTIEL  
MIGUEL ÁNGEL LANCHEROS MONTIEL**

**UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA MECÁNICA  
Montería, 2022**

**MODELACIÓN COMPUTACIONAL DE LA DEFLEXIÓN EN  
JUNTAS SOLDADAS POR GTAW DE ACERO INOXIDABLE AISI 304,  
UTILIZANDO LA TÉCNICA DE ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS**

**DANIEL VALERY LANCHEROS MONTIEL  
MIGUEL ÁNGEL LANCHEROS MONTIEL**

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:  
**MAGÍSTER EN INGENIERÍA MECÁNICA**

Director:

**VALÉRY JOSÉ LANCHEROS SUÁREZ, M.SC. INGENIERO  
MECÁNICO**

Codirector (a)

**WILMER SEGUNDO VELILLA PH.D. INGENIERO MECÁNICO**

Línea de Investigación:

**DISEÑO MECÁNICO**

Grupo de Investigación:

**GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA, CIENCIA Y  
TECNOLOGÍA**

**ICT, COL0078633 CLASIFICACIÓN A (833 de 2019)**

**UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA MECÁNICA**

**Montería, noviembre 2022**

NOTA DE ACEPTACIÓN

---

---

---

---

---

Firma del director

---

Firma del Codirector

---

Firma del Jurado 1

---

Firma del Jurado 2

(Dedicatoria o lema)

Este trabajo lo dedico principalmente a mi familia por el apoyo y comprensión frente al reto de realizar un posgrado, también a los docentes que impartieron cursos en la primera corte de la maestría en ingeniería mecánica de la Universidad de Córdoba, sus aportes fueron de mucha ayuda y guía para el desarrollo de este documento.

Miguel Lancheros

La dedicatoria de este trabajo va dirigida en primera medida a Dios, Emilia Lancheros y a Tania Muñoz que han sido el motor para concluir todos los retos, a mi familia la cual me ha acompañado en todo momento para afrontar este proceso, a los profesores que aportaron su conocimiento y tiempo para ayudar con el crecimiento profesional y personal durante todo el desarrollo de la Maestría.

Daniel Lancheros Montiel.

## Agradecimientos

Agradezco inicialmente a Dios por la vida, la salud y las condiciones para poder realizar este trabajo, por permitir lograr un escalón en la vida profesional, educativa e incluso social. A los ingenieros Wilmer Segundo Velilla Diaz codirector y mi papá Valéry José Lancheros Suárez director del trabajo, quién también ha sido un guía en mi vida profesional, educativa y social, ¡Eres el mejor! También le agradezco a mi hermano Daniel Lancheros compañero de estudio y de segunda tesis, espero seguir contando contigo para otros retos. A Yadira Montiel, mi mamá por tener esa visión y guía para hacernos comprender el porqué de las cosas. A Dolly, Valery y Miguelito mi esposa e hijos por su comprensión y amor.

Miguel Lancheros Montiel

Los agradecimientos en primera medida están dirigidos a Dios por la oportunidad de realizar la Maestría en ingeniería Mecánica. A mi papá Valéry Lancheros que siempre ha sido ejemplo de vida y superación, que ha inculcado el estudio como método de crecimiento y guía para la profesionalización en pregrado y postgrado, al ingeniero Wilmer Segundo Velilla que ha confiado sus ideas profesionales en nosotros. A mi hermano Miguel, apoyo personal, profesional y de retos de la vida. En definitiva, Dios no pudo darme una mejor persona como hermano. A mi hija Emilia que desde la panza me ha acompañado en todo momento, a mi mami Yady por siempre tener buenos consejos y apoyarme en todo momento, a mi pareja Tania Muñoz y su familia por su amor y comprensión en todos los retos que he emprendido durante su compañía. A COOTRASEC, en especial a Miguel Navarro y familia por permitirme el espacio para crecer laboral, profesional y personalmente. Y a todos los familiares que no he mencionado con nombre propio pero mil gracias por su apoyo.

## Tabla de contenido

<b>1. RESUMEN .....</b>	<b>5</b>
<b>2. ABSTRACT .....</b>	<b>7</b>
<b>3. Capítulo I. Descripción del trabajo de investigación .....</b>	<b>9</b>
3.1. Introducción.....	9
3.2. Objetivos.....	12
3.2.1. Objetivo general .....	12
3.2.2. Objetivos específicos.....	12
3.3. Estructura de la tesis .....	13
3.4. Revisión de literatura.....	14
3.5. Trabajos derivados.....	16
<b>4. Capítulo II. Objetivo Específico I .....</b>	<b>17</b>
4.1. Introducción.....	17
4.2. Materiales y métodos.....	17
4.3. Resultados.....	18
4.4. Conclusiones.....	21
<b>5. Capítulo III: OBJETIVO II. ....</b>	<b>22</b>
5.1. Introducción.....	22
5.2. Materiales y métodos.....	22
5.3. Resultados.....	26
5.4. Conclusiones.....	28
<b>6. Capítulo IV. OBJETIVO III. ....</b>	<b>29</b>
6.1. Introducción.....	29
6.2. Materiales y métodos.....	29
6.2.1. Condiciones de frontera.....	30
6.3. Resultados.....	32
6.4. Conclusiones.....	33
<b>7. Conclusiones Generales y futuros trabajos.....</b>	<b>34</b>
7.1. Conclusiones del objetivo general .....	34
7.2. Futuros trabajos .....	34

**8. Bibliografía.....35**  
**9. ANEXOS .....36**

Lista de tablas

*Tabla 1. Composición Química del Material base acero inoxidable AISI 304..... 18*

*Tabla 2. Composición Química del Material de aporte acero inoxidable AISI 308L ..... 18*

*Tabla 3. Propiedades Mecánicas y Térmicas de materiales base y aporte ..... 18*

*Tabla 4. Medición de la deflexión en placas soldadas ..... 26*

*Tabla 5 Propiedades Mecánicas y Térmicas de materiales base y aporte. .... 30*

*Tabla 6. Porcentaje de error en la deflexión real versus simulación ..... 32*

## Lista de figuras

<i>Figura 1. Estructuras de ornamentación, rejas, protectores, balcones, pasamanos .....</i>	<i>9</i>
<i>Figura 2. a) Diploma ponencia internacional Daniel Lancheros. b) Diploma ponencia internacional Miguel Lancheros .....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 3. Espesores de materiales para ensambles de estructuras ornamentales .....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 4. Dimensiones materiales de ensamble estructuras de ornamentación .....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 5. a) Láminas de 152.4 mm x 25,4 mm x 3.175 mm b) Láminas de 152.4 mm x 50,8 mm x 3.175 mm.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 6 Equipo de soldadura referencia MMA-200 .....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 7. a) Punto de soldadura al inicio del cordón b) Punto de soldadura al final del cordón .....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 8. a) Vista superior láminas soldadas b) Vista eje horizontal eje x .....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 9. Preparación de la muestra .....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 10. Productos químicos para atacar la muestra .....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 11. Estereoscopio SMZ 171 T .....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 12. Microscopio óptico Olympus PME3B .....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 13. a) Medición en el punto cero b) Medición en el extremo opuesto .....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 14. Marcación de zonas en muestras.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 15. Microestructura de la soldadura a 40 <math>\mu\text{m}</math>.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 16. Microestructura de la soldadura a 20 <math>\mu\text{m}</math>.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 17. Ejes coordenados en el ensamble .....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 18. Deflexión en las láminas soldadas .....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 19. Distribución de temperatura en el cordón .....</i>	<i>33</i>

# RESUMEN

---

En los últimos años las construcciones de vivienda y edificios en Córdoba más específicamente en el municipio de Montería “presenta una tasa de crecimiento constante del 1,6% anual del tejido de la ciudad”(Pretelt Blanco and Territorial, 2015), situación que se evidencia en el desarrollo de la región, nuevos barrios, nuevas edificaciones, actualización de fachadas y estructuras con nuevos materiales. Debido a esto la demanda de trabajos de ornamentación (rejas de protección, barandas en balcones, pasamanos en escaleras y otros) va en ascenso proporcionalmente a la tasa mencionada. El acero inoxidable AISI 304, se volvió uno de los materiales predilectos de los usuarios que requieren algún tipo de estas estructuras mencionadas para sus viviendas y/o edificaciones.

Una de las características de los diseños de este tipo de estructuras de ornamentación es que visiblemente presenten una apariencia lineal (rectos) en su longitud total y en cualquiera de los ejes de visualización o coordenado. Para la construcción de las estructuras metálicas con acero inoxidable AISI 304 se deben realizar las uniones permanentes con el método de soldadura TIG (Tungsten Inert Gas) identificado por la Sociedad Americana de soldadura (AWS, por sus siglas en inglés) como Gas Tungsten Arc Welding-GTAW, consiste en un proceso de unión permanente por arco eléctrico, este se genera entre el electrodo de material tungsteno y el metal base a soldar, el proceso ocurre bajo una atmósfera de gas inerte evitando la contaminación con oxígeno del baño de fusión y el electrodo, los cuales se encuentran a alta temperatura (Jeffus, 2008). En este punto los cambios de temperatura generan en el material tensiones y esfuerzos que causan deflexión en los elementos soldados.

El desarrollo tecnológico y avance en los software computacionales ha hecho que los procesos se simulen antes de realizar grandes inversiones en ensambles donde se realizan pruebas de ensayo y error para determinar si dicha estructura o proceso no va a fallar o presentar inconvenientes en el desempeño para el cual fue diseñado, se han creado software de dibujo asistido por computadora CAD, donde se pueden crear las piezas o elementos de máquinas, estos los han ido evolucionando de tal forma que hoy día se pueden crear ensambles de equipos complejos y no solo eso, también se pueden recrear condiciones y características propias del sistema e incluso del ambiente de tal manera que no es necesario fabricar para poder determinar posibles fallas o inconvenientes durante el uso, manipulación o funcionamiento.

Dichas condiciones especiales incluyen cargas, estáticas o dinámicas, restricciones en el movimiento, temperaturas, desplazamientos, esfuerzos, deformaciones, grietas, velocidades, entre otras.

La industria del análisis de elementos finitos inició con la matemática cerca de los años 50 con base en la matriz de rigidez, determinando desplazamientos en conjuntos de elementos, distribución

de esfuerzos, aplicando algebra lineal, sistemas de ecuaciones no lineales y de equilibrio para optimizar recursos, minimizando el peso, disminuyendo el costo de los materiales antes de que se decida realizar la manufactura del sistema.

Por lo tanto, se plantea un proyecto que permita evaluar la deflexión con un método de soldadura específico TIG.

Adicional a lo anterior se plantea realizar una simulación basada en el análisis de elementos finitos, con el objetivo de comparar los resultados del análisis de deflexión del experimento práctico, con los del software computacional de las juntas soldadas.

**Palabras clave:** Simulación, elementos finitos, deflexión, acero inoxidable.

# ABSTRACT

---

In recent years, housing and building construction in Cordoba, more specifically in the municipality of Monteria "presents a steady growth rate of 1.6% per year of the city's fabric" (Pretelt Blanco & Territorial, 2015), a situation that is evidenced by the development of the region, new neighborhoods, new buildings, updating of facades and structures with new materials. Due to this, the demand for ornamentation works (protection grids, balcony railings, handrails in stairs and others) is rising proportionally to the mentioned rate. The stainless steel AISI 304, became one of the favorite materials of the users that require some type of these mentioned structures for their houses and/or buildings.

One of the characteristics of the designs of this type of ornamental structures is that they visibly present a linear appearance (straight) in their total length and in any of the visualization or coordinate axes. For the construction of the metallic structures with AISI 304 stainless steel, the permanent joints must be made with the TIG (Tungsten Inert Gas) welding method identified by the American Welding Society (AWS) as Gas Tungsten Arc Welding-GTAW, consists of a permanent joining process by electric arc, this is generated between the tungsten electrode and the base metal to be welded, the process occurs under an inert gas atmosphere avoiding oxygen contamination of the weld pool and the electrode, which are at high temperature (Jeffus, 2008). At this point, temperature changes generate stresses and strains in the material that cause deflection in the welded elements.

Technological development and advances in computer software have made that the processes are simulated before making large investments in assemblies where trial and error tests are performed to determine whether the structure or process will not fail or present problems in the performance for which it was designed, CAD computer aided drawing software has been created, These have been evolving in such a way that today complex equipment assemblies can be created and not only that, but also conditions and characteristics of the system and even the environment can be recreated in such a way that it is not necessary to manufacture in order to determine possible failures or inconveniences during use, handling or operation.

Such special conditions include loads, static or dynamic, movement restrictions, temperatures, displacements, stresses, deformations, cracks, velocities, among others.

The finite element analysis industry began with mathematics in the 1950s based on the stiffness matrix, determining displacements in sets of elements, stress distribution, applying linear algebra, systems of nonlinear equations and equilibrium to optimize resources, minimizing weight, reducing the cost of materials before the decision is made to manufacture the system.

Therefore, a project is proposed to evaluate the deflection with a specific TIG welding method.

In addition to the above, a simulation based on finite element analysis is proposed, with the objective of comparing the results of the deflection analysis of the practical experiment with those of the computer software of the welded joints.

**Keywords:** Simulation, finite element, deflection, stainless steel.

# Capítulo I. Descripción del trabajo de investigación

---

## 3.1. Introducción

En la costa caribe de Colombia más específicamente en el departamento de Córdoba se suele usar en la construcción de edificaciones y viviendas elementos ornamentales como rejas exteriores para vivienda, barandas para escaleras y balcones como las que se evidencian en la figura 1. Para la construcción de las piezas de ornamentación se usan materiales como acero estructural, aluminio y acero inoxidable.



Figura 1. Estructuras de ornamentación, rejas, protectores, balcones, pasamanos

Para la unión de las piezas en la ornamentación se usa la soldadura entre las que se destacan CAW, SMAW y GAS TUNGSTEN ARC WELDING (GTAW) las cuales consisten en fundir material base y de aporte (en algunos casos) aplicando altas temperaturas; al realizar este proceso se generan tensiones residuales en la microestructura del material produciendo las denominadas deflexiones a lo largo de las dimensiones del material. En las estructuras de ornamentación la deflexión no es deseada, si se llega a presentar los clientes o usuarios de estos pueden rechazar la instalación del

proyecto generando en el proveedor pérdidas económicas debido a la compra de materiales que en su gran mayoría no pueden ser reutilizados, muchos de los proveedores son micro y pequeños emprendedores en el negocio de la ornamentación.

Dentro del desarrollo de la investigación se plantea encontrar un modelo para la simulación que permita predecir el comportamiento de la deflexión a la hora de ejecutar el proceso de soldadura en un software de acceso libre, para ayudar a los pequeños emprendedores o incluso empresas especializadas, apoyados desde la academia con estudiantes de ingeniería mecánica de la Universidad de Córdoba en condiciones de aprendices o asesores, mejorando la relación académica-industrial de la región.

Inicialmente, se busca información relacionada con el material seleccionado que es el acero inoxidable AISI 304, encontrando características particulares de la venta de este en el mercado local y regional. Además, de la composición química del material, características mecánicas, térmicas y el comportamiento particular ante la aplicación de temperatura durante el proceso de unión, determinar cuál es el tipo de soldadura aplicable.

Dentro de la caracterización del material se buscó el método de mayor uso entre los constructores de estructuras ornamentales en acero inoxidable. El método GTAW permite realizar las juntas soldadas en este tipo de materiales garantizando que no se pierdan las propiedades mecánicas. Sin embargo, al momento de crear la junta es necesario aplicar temperaturas que alcanzan el punto de fusión generando que en la microestructura del material se crean esfuerzos internos entre sus moléculas tanto a compresión como a tensión ocasionando deformidades en la macroestructura manifestándose en deflexiones y pandeos.

Según estudios mencionados en la revisión de la literatura es posible realizar simulaciones en softwares que utilizan técnicas de elementos finitos, donde se demuestra que usando los métodos correctos para establecer condiciones de fronteras, propiedades de los materiales, variables propias del proceso y simulando la aplicación de la temperatura producida por la soldadura, es posible tener una aproximación del comportamiento de la deflexión en la unión hecha en estructuras reales.

El objetivo principal de esta investigación es comparar el comportamiento de la deflexión generada por la soldadura en un software y una unión por soldadura real, recreando el ambiente en que se realizan las uniones permanentes en el ensamble de las estructuras de ornamentación, fabricadas para las edificaciones del departamento de Córdoba. Las deflexiones generadas en la simulación basada en la técnica de los elementos finitos de la soldadura tratando de mantener las mismas condiciones del proceso para la unión de dos láminas de acero inoxidable AISI 304 de dos medidas diferentes para obtener un perfil térmico y unos desplazamientos debido a los esfuerzos generados por el efecto térmico denominado deflexión, con el fin de demostrar que es posible predecir el comportamiento de este defecto en el material luego de aplicar el proceso de soldadura.

Luego de la investigación se descubrió que el proyecto cumple con su objetivo principal el cual se basa en el uso de un software computacional para determinar la deflexión del acero inoxidable AISI 304 luego de aplicar un proceso de soldadura en la construcción de piezas de ornamentación en las viviendas de la región teniendo en cuenta las condiciones ambientales y de la aplicación de la unión permanente de las piezas.

## **3.2. Objetivos**

Con el fin de lograr el desarrollo de la presente tesis, se muestra a continuación el objetivo general y los objetivos específicos que lo permiten.

### **3.2.1. Objetivo general**

Modelar la deflexión en juntas soldados por GTAW en acero inoxidable AISI 304, utilizando la técnica de análisis de elementos finitos en un software computacional.

### **3.2.2. Objetivos específicos**

**Objetivo específico I.** Definir los parámetros de los equipos y métodos a implementar teniendo en cuenta la teoría relacionada en la bibliografía y bases de datos de las propiedades del acero inoxidable AISI 304

**Objetivo específico II.** Evaluar los resultados de la deflexión en dos juntas de soldadura de láminas de acero inoxidable de 25,4 mm y 50,8 mm de ancho, para verificar el perfil de la temperatura sobre la unión, a partir de una prueba metalográfica de cada una de ellas.

**Objetivo específico III.** Modelar computacionalmente la deflexión de juntas soldadas en el acero inoxidable AISI 304, aplicando análisis de elementos finitos en el software ABAQUS para comparar con la teoría relacionada

### **3.3. Estructura de la tesis**

En el capítulo II se presenta el desarrollo del primer objetivo específico del cual se obtienen las características del material a evaluar y las condiciones de frontera para poder realizar la simulación, estas características se definen con base en estudios realizados por otros autores, la información de las fichas técnicas de los proveedores del material en la región y bibliografía de los cursos de posgrado y pregrado realizados por los estudiantes.

En el capítulo III se describen las actividades desarrolladas para cumplir el segundo objetivo específico, el cual es la realización práctica de la unión soldada utilizando el método seleccionado y las condiciones de frontera definidas en el capítulo anterior, la actividad se realiza con un contratista el cual se ajusta a las condiciones y parámetros definidos por los autores de este trabajo.

En el capítulo IV se desarrollan las actividades para dar cumplimiento al tercer objetivo específico, el cual es realizar la simulación en un software versión estudiantil, cargando los parámetros del material y condiciones de frontera del proceso de soldadura, luego de realizar la simulación se evalúan los resultados y se comparan con los mostrados en la práctica y se define si la simulación puede predecir el efecto de la deflexión debido al efecto de la temperatura en el proceso de soldadura GTAW.

### 3.4. Revisión de literatura

De acuerdo a los autores del libro (Kalpakjian and Schmid, 2008), los aceros inoxidable ganan su nombre por su resistencia a la corrosión en presencia de oxígeno, dado que se crea una película de protección a base de cromo, de estos aceros hay varios tipos entre los cuales se encuentra la serie 300 y siendo específicos el AISI 304 se destaca por ser austenítico compuesto en su gran mayoría por Cromo, Níquel y Manganeso en hierro.

Según (Jeffus, 2008), la sociedad americana de soldadura define la soldadura GTAW como *“un proceso de soldadura de arco que utiliza el arco eléctrico que salta entre un electrodo de tungsteno (no consumible), y la pieza a soldar, mientras un gas inerte protege el baño de fusión sin la aplicación de presión. El arco produce el calor necesario para fundir el material, el gas protector mantiene el oxígeno del aire apartado del baño de fusión y el tungsteno caliente. Durante el proceso se puede o no añadir el metal de aportación al baño de fusión”*. Además, indica que este tipo de soldadura se considera de los más versátiles por su variedad de materiales a los que se le puede aplicar y su facilidad de soldadura aún si la pared es delgada.

En el libro de transferencia de calor (Çengel and GHAJAR, 2011), se indica que la ingeniería frecuentemente se encuentra buscando contabilizar la cantidad, la velocidad y el tiempo que tiene un sistema para pasar de un estado equilibrio a otro. Los mecanismos básicos estudiados en esta ciencia es la conducción que consiste *“en el paso de partículas de energéticas de una sustancia adyacentes a otras menos energéticas en su interacción”*, la convección que trata de *“transferencia de calor entre una superficie sólida y el líquido o gas adyacente que están en movimiento, y comprende los efectos combinados de la conducción y del movimiento del fluido.”* y radiación que consiste en *“es la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas (o fotones), como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas.”*

Los autores del artículo (Li et al., 2022) exponen que los elementos de pared delgada son propensas a las deflexiones y a tensiones residuales cuando son sometidos a procesos de soldadura, dado por su baja rigidez, lo cual es perjudicial a la hora de realizar ensamblajes debido a su precisión dimensional. Lo que hace que sea de interés el estudio de la predicción del comportamiento del material ante el sometimiento de procesos de temperatura para que sea tenido en cuenta a la hora de realizar ensambles. Además, se tienen en cuenta las grietas internas por tensiones residuales que generan fatiga en las construcciones realizadas. Por lo que plantean un modelo en el software ABAQUS basado en los elementos finitos de la no linealidad, el cual predice en un alto porcentaje el comportamiento de la deformación en elementos de pared delgada cuando es sometido a soldadura.

En cuanto a los elementos finitos los autores (Abasolo et al., 2017) definen los elementos finitos como una de las herramientas que permite validar y optimizar los análisis y el diseño mecánico.

Evitando la realización de pruebas experimentales con resultados de información muy ajustada a la realidad.

De acuerdo con el desarrollo de un experimento los autores del artículo (Sepe et al., 2021) concluyeron que existe una excelente precisión entre los cálculos experimentales y los resultados de la simulación en cuanto a los parámetros térmicos y mecánicos evaluados en la prueba. La simulación se realizó basada en elementos finitos y se asumieron como constantes dependientes de la temperatura algunas propiedades del material como es la conductividad térmica y el calor específico.

(Arora et al., 2021a) se realiza una simulación utilizando un análisis de elementos finitos en 3D con el modelo de fuente de calor elipsoidal doble, considerado el más idóneo para la simulación de soldadura, concluyendo que las zonas de la soldadura y sus alrededores se identifican esfuerzos de tracción y las zonas por fuera de la zona de fusión son de compresión.

De acuerdo con la introducción del artículo de (Arora et al., 2021b) en las uniones soldadas se encuentran defectos secundarios como lo son las tensiones residuales y la deformación, aunque también gracias a estos defectos se puede mitigar la deflexión, se realizó una simulación de la soldadura en el campo de la temperatura, se modeló en el software SolidWorks, se analizó con el software MSC Marc y el proceso de mallado se realizó a través del software MSC Nastran-Patran. El resultado del estudio se puede utilizar para mejorar las condiciones de la soldadura y con ello aumentar la garantía de las estructuras ensambladas.

### 3.5. Trabajos derivados

A continuación, se presenta la figura 2 donde se evidencian los diplomas que hacen constar la participación en un evento internacional, uno de los requisitos para optar por el título de magister.



Figura 2. a) Diploma ponencia internacional Daniel Lancheros. b) Diploma ponencia internacional Miguel Lancheros



## Capítulo II. Objetivo Específico I

---

Definir los parámetros de los equipos y métodos a implementar teniendo en cuenta la teoría relacionada en la bibliografía y bases de datos de las propiedades del acero inoxidable AISI 304

### 4.1. Introducción

El contenido de este capítulo hace referencia a toda la información correspondiente a las características del acero inoxidable AISI 304, detalles que describen la composición química hasta propiedades mecánicas, físicas y térmicas de este. Adicionalmente, información del comportamiento del material cuando es afectado térmicamente. También, se encuentra información relevante sobre las técnicas y equipos más utilizados en la región para realizar la unión soldada de elementos de material acero inoxidable AISI 304.

Con la información relacionada se definen los tamaños de los modelos con los cuales se realizan las pruebas comparativas.

### 4.2. Materiales y métodos

Para iniciar el proceso de la modelación computacional de la deflexión en juntas soldadas en acero inoxidable AISI 304 utilizando análisis de elementos finitos que es el objetivo general de este trabajo, se requiere conocer las propiedades del material en estudio en especial los que se comercializan de manera local.

En primera medida se solicita a los proveedores de acero inoxidable en la ciudad de Montería las fichas técnicas donde se tienen las características del material, anexo 1, anexo 2 incluso las dimensiones estándar de uso comercial.

También se utilizará la bibliografía guía de los cursos de pregrado, como Diseño en ingeniería mecánica de Shigley's, manufactura, ingeniería y tecnología de S. Kalpakjian & S.R. Schmid, así mismo las bases de datos de artículos científicos descritos en la bibliografía y documentos consultados en el repositorio de la universidad.

### 4.3. Resultados

Con la información recolectada de la bibliografía consultada se definen los criterios con los cuales se debe aplicar la soldadura en las uniones permanentes del material en estudio, en la tabla 1 se relaciona la composición química del material base y en la tabla 2 la composición química del material de aporte y en la tabla 3 se encuentra las propiedades mecánicas y térmicas de los materiales base y de aporte en la soldadura.

**Tabla 1. Composición Química del Material base acero inoxidable AISI 304**

UNS Designation	Type	C	Mg	P	S	Si	Cr	Ni	N	Cu	Other
<b>Austenitic (Chromium-Nickel) (Chromium-Manganese-Nickel)</b>											
<b>S30400</b>	304	0,08	2,00	0.045	0.03	0.75	18.0-20.0	8.0 - 10.5	0.10	...	...

**Fuente: Equipo de investigación**

**Tabla 2. Composición Química del Material de aporte acero inoxidable AISI 308L**

UNS Designation	Type	C	Mo	P	S	Si	Cr	Ni	Mn	Cu	Other
<b>Austenitic (Chromium-Nickel) (Chromium-Manganese-Nickel)</b>											
<b>AWG308L</b>	308L	0,03	1,0 – 2,5	0,03	0,03	0,30 – 0,65	19,5 – 22,0	9,0 - 11,0	1,0 – 2,50	0,75	0,50

**Fuente: Equipo de investigación**

**Tabla 3. Propiedades Mecánicas y Térmicas de materiales base y aporte**

Propiedades	Material base	Material de aporte	Unidades
	Acero Inoxidable AISI 304	Acero Inoxidable AISI 308L	
<b>Esfuerzo fluencia</b>	205	230	MPa
<b>Resistencia a la tracción</b>	515	580	MPa
<b>Módulo de Young</b>	196	200	GPa
<b>Densidad</b>	0,00793	0,0078	g/mm <sup>3</sup>
<b>Coefficiente de Poisson</b>	0,29	0,28	
<b>Conductividad Térmica</b>	16,3	15	W/m °C
<b>Coefficiente de dilatación térmica</b>	0,000018	0,000018	°C <sup>-1</sup>
<b>Calor específico</b>	500	480	J/kg °C

**Fuente: Equipo de investigación**

En los catálogos del mercado local se encontraron dimensiones estándar de las platinas y tuberías en material acero inoxidable AISI 304. Con esto se determinó las piezas a unir para realizar la soldadura GTAW en condiciones normales de trabajo en la ciudad, teniendo en cuenta parámetros de temperatura ambiente, tipo de gas, equipo a utilizar entre otros.

En la figura 3 y figura 4 se presentan un par de mosaicos de fotos con algunas dimensiones estándar de material de ensamble de las estructuras de ornamentación, las cuales son de vital importancia en la selección de los criterios para la unión soldada y posterior simulación.



Figura 3. Espesores de materiales para ensambles de estructuras ornamentales



Figura 4. Dimensiones materiales de ensamble estructuras de ornamentación

Teniendo en cuenta los datos de investigaciones similares, donde los resultados fueron válidos y también se utilizó el análisis de elementos finitos, se determinan las dimensiones para evidenciar la deflexión a lo largo de sus aristas, láminas de 152.4 mm x 25,4 mm x 3.175 mm y 152.4 mm x 50,8 mm x 3.175 mm con un bisel en V de 60° y un espaciado de 2 mm sobre el perfil de mayor longitud, en la figura 5 se muestra el ensamble CAD de las parejas de platinas de las dos dimensiones, las cuales se tratan desde la adquisición del material, el corte, pulidas, preparación y unión a través de la soldadura, todo este procedimiento se contrata con una firma en un servicio a todo costo. El aporte que se utiliza para el proceso de soldadura se definió teniendo en cuenta el usado por los constructores de estructuras ornamentales para viviendas en la ciudad, siendo la varilla de aporte ER308L de 1,59 mm.

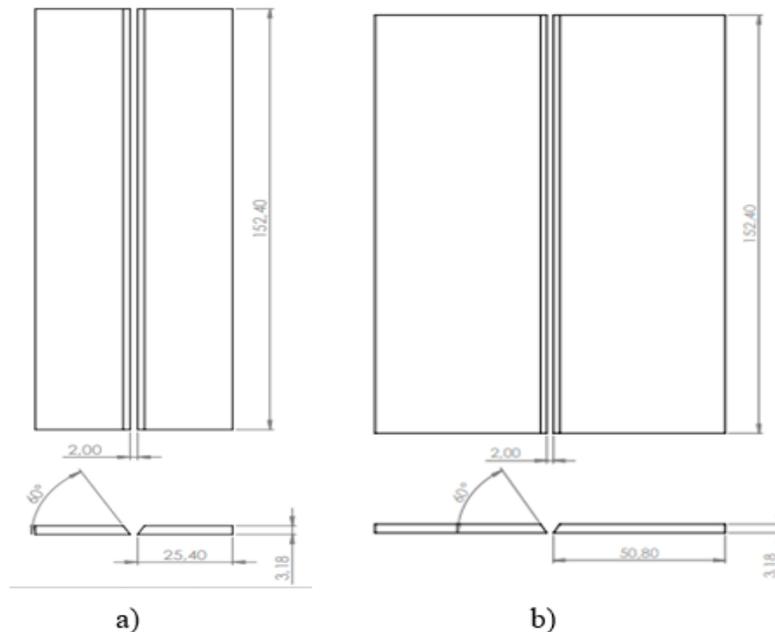


Figura 5. a) Láminas de 152.4 mm x 25,4 mm x 3.175 mm b) Láminas de 152.4 mm x 50,8 mm x 3.175 mm



De acuerdo con el reporte del IDEAM en su página web, la temperatura media de la ciudad de Montería es de 28.1 °C, con base en la literatura y otras investigaciones se definen el aporte de calor del cordón de soldadura, el cual es aproximadamente 1600 °C la velocidad de soldadura es de 80 mm/min, que son datos de condiciones de frontera en la simulación.

#### **4.4. Conclusiones**

Como conclusión se tiene que existe suficiente información relevante para definir las características mecánicas, físicas, químicas y térmicas del material de estudio, el acero inoxidable AISI 304, las características del proceso de soldadura, equipos, material de aporte y condiciones ambientales, adicionalmente, se encuentra evidencia de trabajos donde se aplican diferentes tipos de soldadura con resultados que son útiles para determinar o seleccionar parámetros del trabajo de investigación.

Finalmente se define el tipo de soldadura a aplicar, equipos y parámetros de este a implementar teniendo en cuenta la teoría relacionada en la bibliografía y bases de datos de las propiedades del acero inoxidable AISI 304.

## Capítulo III: OBJETIVO II.

Evaluar los resultados de la deflexión en dos juntas de soldadura de láminas de acero inoxidable de 25,4 mm y 50,8 mm de ancho, para verificar el perfil de la temperatura sobre la unión, a partir de una prueba metalográfica de cada una de ellas.

### 5.1. Introducción

En este capítulo se realiza la parte experimental del objetivo del proyecto donde se ejecuta la adquisición del material, corte, biselado, soldadura, medición de la deflexión, preparación de la muestra de metalográfica y observación de la microestructura del material y la zona afectada térmicamente.

### 5.2. Materiales y métodos

En el capítulo anterior se investigó el mercado del acero inoxidable y con esto se eligió un proveedor con el cual se adquirieron cinco (5) pares de láminas de acero inoxidable AISI 304 las láminas cortadas de dimensiones 152,4 mm x 25,4 mm x 3,175 mm y de 152,4 mm x 50,8 mm x 3,175 mm, luego siguiendo las recomendaciones de la Norma ASTM E3 de preparación de las muestras metalográficas se le solicito a la firma contratada para realizar los biseles a 60° con respecto al eje de referencia del plano X.

Una vez se obtuvo el material dispuesto para soldar, se procede a realizar las juntas permanentes con un equipo de soldadura de la referencia MMA-200 de marca ENA POWER como se evidencia en la figura 6, aplicando un punto de soldadura en donde se debe iniciar el cordón y otro donde debe finalizar como se muestra en la figura 7, esperando con esta en primera instancia que se mantengan la separación de los 2 mm y en segunda medida con el fin de establecer condiciones de frontera para el momento en que se realice la simulación de la soldadura.



Figura 6 Equipo de soldadura referencia MMA-200

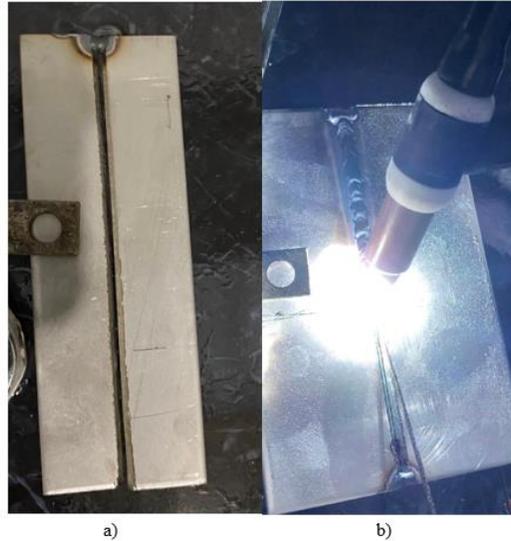


Figura 7. a) Punto de soldadura al inicio del cordón b) Punto de soldadura al final del cordón

La validación de los resultados obtenidos del proceso de soldadura GTAW en dos láminas de acero inoxidable AISI 304 con dimensiones de 152,4 mm x 25,4 mm x 3,175 mm y de 152,4 mm x 50,8 mm x 3,175 mm, en la figura 8 se evidencian las placas unidas luego del proceso de soldadura

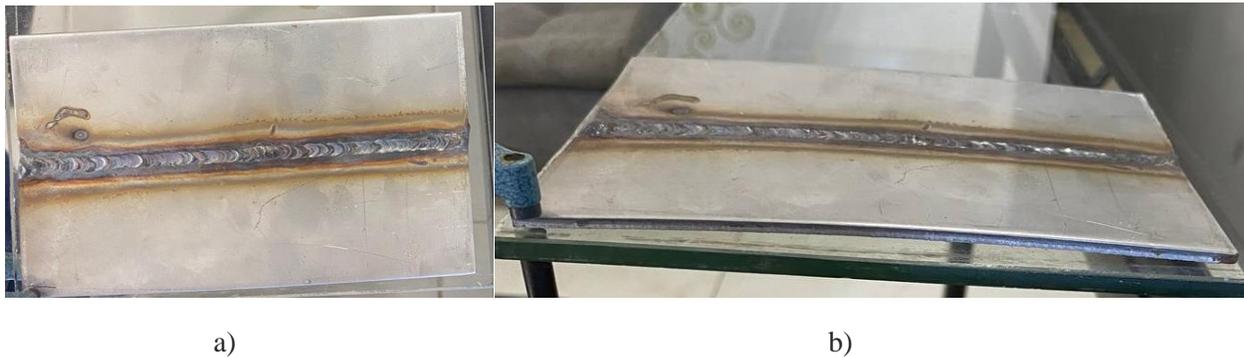


Figura 8. a) Vista superior láminas soldadas b) Vista eje horizontal eje x

Para verificar la microestructura del material en la junta soldada se realiza un ensayo metalográfico basado en la norma ASTM E3 para verificar el perfil de la temperatura formado en el material por el efecto de la aplicación de calor aplicado para las uniones permanentes.

Con el fin de observar la microestructura se debe dar a la muestra acabado espejo usando papeles de lija de SiC iniciando con el grano de 80 hasta 2000, como se evidencia en la figura 9.



Figura 9. Preparación de la muestra

Luego se realizó limpieza con etanol al 95% y para dar el acabado final con un paño de pulido y alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Una vez se tiene el acabado espejo se limpia nuevamente con etanol al 95% y se sumerge la muestra en una mezcla de compuesta de 5 ml de ácido clorhídrico ( $\text{HCl}$ ), 1 gr de ácido pícrico ( $\text{C}_6\text{H}_2\text{OH}(\text{NO}_2)_3$ ) y etanol ( $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$ ) al 95%, los productos químicos se evidencian en la figura 10, los cuales se mezclan para exponer los límites de grano según indica la norma ASTM E407 y con el uso de un microscopio óptico y un estereoscopio que se encuentran en el laboratorio de la universidad de Córdoba, utilizados para observar la microestructura.



Figura 10. Productos químicos para atacar la muestra

Posteriormente se realiza el montaje en el estereoscopio referencia SMZ 171 T, figura 11 y el microscopio óptico Olympus PME3B mostrado en la figura 12



Figura 11. Estereoscopio SMZ 171 T



Figura 12. Microscopio óptico Olympus PME3B

### 5.3. Resultados

En la figura 13 se presenta las mediciones realizadas en el laboratorio con un comparador de carátulas.



a)

b)

Figura 13. a) Medición en el punto cero b) Medición en el extremo opuesto

Ahora se relaciona en la tabla 4 las dimensiones de la deflexión

Tabla 4. Medición de la deflexión en placas soldadas

Dimensiones placa	Deflexión Máxima en la práctica	
	Medición	Media
152,4 mm x 50,8 mm x 3,175 mm	3,21	3,21 mm
	3,20	
	3,22	
	3,21	
	3,19	
152,4 mm x 50,8 mm x 3,175 mm	12,07	12,10
	12,15	
	12,13	
	12,06	
	12,10	

Fuente: Equipo de investigación

A continuación, se presentan las fotografías tomadas con los equipos de laboratorio sobre las muestras preparadas.

El comportamiento de la microestructura del material a evidenciar en las imágenes es:

- La zona afecta térmicamente ZAT
- La zona límite ZL
- La zona de metal base ZMB

Se inicia con un acercamiento de 10X como se muestra en la figura 14 que permite evidenciar hasta 200  $\mu\text{m}$ .

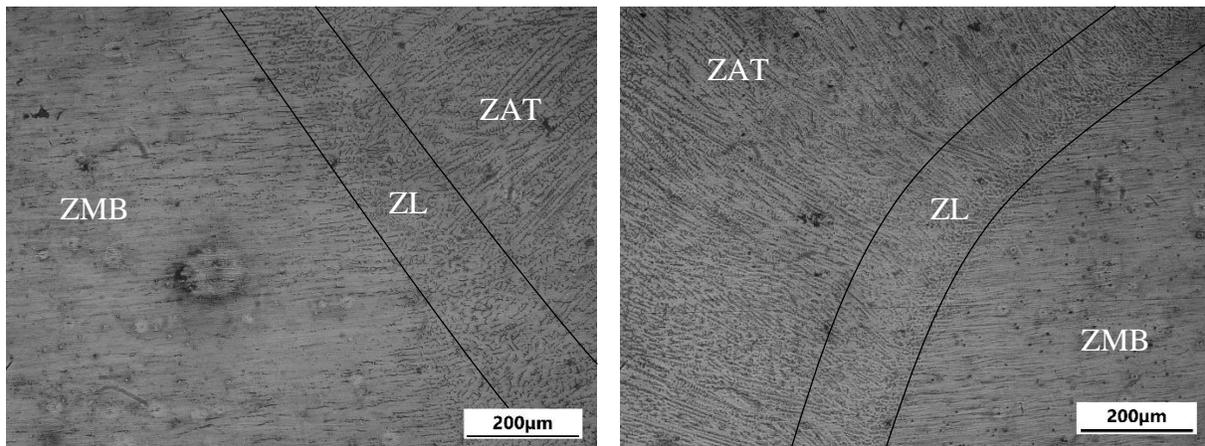


Figura 14. Marcación de zonas en muestras

Luego se realiza un acercamiento de 50X como se evidencia en la figura 15 que permite evidenciar hasta 40  $\mu\text{m}$ .

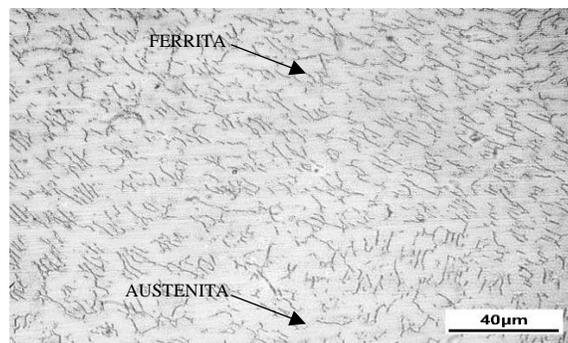


Figura 15. Microestructura de la soldadura a 40  $\mu\text{m}$

Y por último se le hace un acercamiento de 100X mostrado en la figura 16 que permite evidenciar hasta 20  $\mu\text{m}$ .

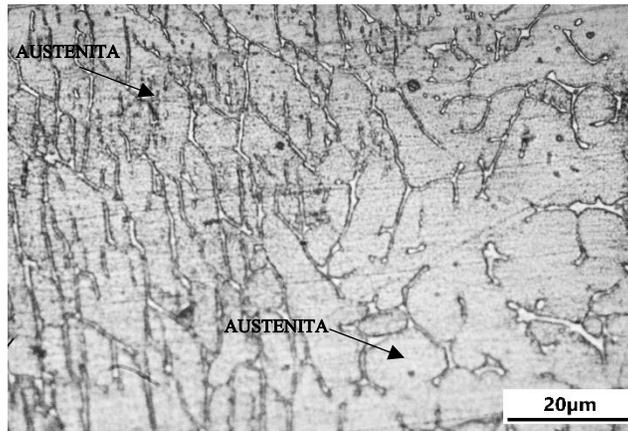


Figura 16. Microestructura de la soldadura a 20  $\mu\text{m}$

## 5.4. Conclusiones

Como conclusiones se tiene que:

Se realizaron las uniones soldadas en la placa evidenciando a simple vista una deflexión de los materiales base producto del efecto de la temperatura generada por el proceso de soldadura.

Se obtuvo un perfil térmico en la junta soldada gracias al ataque químico de la muestra el cual se evidencia en un estudio metalográfico donde se observa la zona afectada térmicamente y la que no.

El perfil térmico de la junta soldada en ambas muestras es similar en su configuración.

## Capítulo IV. OBJETIVO III.

---

Modelar computacionalmente la deflexión de juntas soldadas en el acero inoxidable AISI 304, aplicando análisis de elementos finitos en el software ABAQUS para comparar con la teoría relacionada y pruebas experimentales.

### 6.1. Introducción

En este capítulo se presenta la simulación de la soldadura ejecutada en el capítulo anterior en el software ABAQUS. Se inicia justificando la selección del software y la versión de este. Posteriormente se diseña el modelo CAD en 3D de las placas a soldar.

Se asignaron las propiedades térmicas y mecánicas de los respectivos materiales base y de aporte. Se tiene en cuenta las condiciones de frontera que se establecieron en capítulos anteriores como son la temperatura ambiente, condiciones de transferencia de calor (convección y conducción), fijación entre placas entre otras, cabe destacar que esta información se le suministro al software a través de un complemento para el estudio de la soldadura (plug-in AWI). Luego de ejecutar la simulación de la soldadura se obtuvieron unos parámetros de deformación en las placas en el análisis mecánico y para el caso del análisis térmico se obtuvieron perfiles de temperatura de la zona afectada térmicamente en las uniones de las placas. Los resultados obtenidos se compararon con los resultados obtenidos en el capítulo anterior mostrando como resultados medidos y perfiles acordes con los obtenidos experimentalmente.

### 6.2. Materiales y métodos

Luego de conocer la propiedades mecánicas y térmicas de los materiales base y de aporte desarrollados en el segundo capítulo se procede a crear los modelos en SolidWorks para luego importarlos a ABAQUS.

Con la información recolectada se definieron los criterios con los cuales se aplica la soldadura en las uniones permanentes y las condiciones de frontera.

Teniendo como base un estudio de una soldadura usando análisis de elementos finitos se determinaron las dimensiones de las láminas a soldar un par de placas son de 152,4 mm x 25,4 mm x 3,175 mm con un bisel en V de 60° y un espaciamento de 1,59 mm sobre el perfil de mayor longitud y la otras de 152,4 mm x 50,8 mm x 3,175 mm el mismo bisel y el espaciamento. En la ciudad de montería el IDEAM reporte un promedio de temperatura de 28,1 °C, para la simulación se define una temperatura para el proceso en el cordón de soldadura de aproximadamente 1310,0 J/cm<sup>2</sup>, igualmente se define una velocidad de soldadura es de 80 mm/min.

[29]

Se inicia la modelación utilizando la técnica de elementos finitos en el software ABAQUS CAE teniendo en cuenta las condiciones de frontera para evidenciar la deflexión causada por el efecto de la temperatura sobre el cordón de soldadura en la junta.

Se requieren las propiedades mecánicas y térmicas de los materiales que están involucrados en la soldadura, los cuales se muestran en la tabla 5.

<b>Tabla 5 Propiedades Mecánicas y Térmicas de materiales base y aporte.</b>			
<b>Propiedad</b>	<b>Acero Inoxidable AISI 304</b>	<b>Aporte AISI 308L</b>	<b>Unidades</b>
<b>Esfuerzo fluencia</b>	205	230	MPa
<b>Resistencia a la tracción</b>	515	580	MPa
<b>Módulo de Young</b>	196	200	GPa
<b>Densidad</b>	0,00793	0,0078	g/mm <sup>3</sup>
<b>Coefficiente de Poisson</b>	0,29	0,28	
<b>Conductividad Térmica</b>	16,3	15	W/m °C
<b>Coefficiente de dilatación térmica</b>	0,000018	0,000018	°C <sup>-1</sup>
<b>Calor específico</b>	500	480	J/kg °C

**Fuente: Fichas técnicas materiales base y aporte**

Teniendo los datos se inicia la simulación importando el ensamble realizado en SolidWorks, se configuran las propiedades de los materiales de aporte y base, el mallado y las condiciones de frontera, es de entender que este proceso se realiza dos veces una para la primera longitud de placas y la otra para la segunda dimensión de placa.

Se crean y configuran los tipos de análisis a evaluar con la simulación, uno mecánico que sirve para evidenciar la deflexión y uno térmico que muestra el perfil de temperatura en la junta soldada.

### **6.2.1. Condiciones de frontera**

Las condiciones de frontera se definieron así:

Condición de desplazamiento parcial: la condición del desplazamiento se define desde el capítulo anterior teniendo en cuenta que se realiza un punto de soldadura al inicio y al final de donde se realiza la unión soldada, de esta misma forma se define en el software, por lo que se hace una restricción parcial del desplazamiento en los ejes  $x$ ,  $z$  y el punto de inicio de la soldadura como se evidencia en la figura 17.

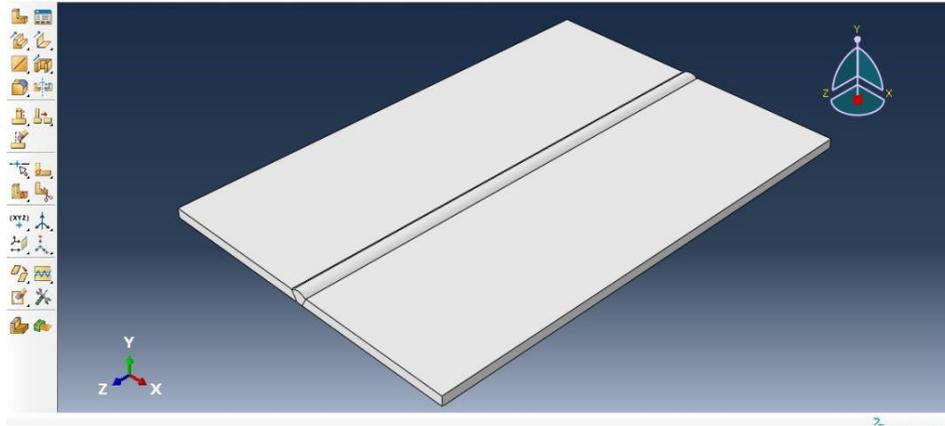


Figura 17. Ejes coordenados en el ensamble

Condición de frontera térmica: en primera medida se asume que todas las superficies estarán en contacto con el ambiente lo que indica que como condición de frontera existe transferencia de calor por convección entre la superficie y el ambiente. Adicionalmente, se considera despreciable la transferencia de calor por radiación hacia el entorno.

También, se definió el valor de la temperatura ambiente en Montería; coeficiente de transferencia de calor por convección, la temperatura máxima de la soldadura y de fusión de los materiales.

Teniendo en cuenta la información anterior se plantea las siguientes ecuaciones para un elemento de la malla y observar el comportamiento mecánico y térmico al cual estará sometido durante el proceso de soldadura. Cabe destacar que durante el proceso el elemento está sometido a calentamiento y enfriamiento. Inicialmente se desarrolla para el elemento de malla para el caso de aplicación de calor por transferencia convección y conducción.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q + h(T_s - T_s) = 0$$

Donde:

Q: Flujo de calor aportado por el equipo de soldadura en kW

h: Coeficiente de convección con el ambiente,  $W/m^2 \cdot ^\circ K$

Ts: Temperatura de la superficie del volumen de control,  $^\circ K$

Ta: Temperatura del ambiente,  $^\circ K$

Ahora para el mismo elemento de malla, pero el caso de NO aplicación de calor

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) + h(T_s - T_s) = \rho \cdot C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t}$$

Para la solución del elemento desde el criterio mecánico, se debe tener en cuenta que la deflexión se encuentra logada directamente con el concepto de deformación por ende para este caso, se evidenciara la deformación en cada uno de los ejes x, y z, desarrollando el modelo matemático tanto de calentamiento como de enfriamiento de las ecuaciones antes descritas.

$$\xi_{x,y,z} = \alpha \cdot \Delta T_{x,y,z}$$

### 6.3. Resultados

Dentro de los resultados obtenidos en la simulación de la soldadura de dos láminas de acero inoxidable con dos dimensiones diferentes, tenemos un análisis mecánico dentro del cual se evidencian las deformaciones de las láminas (deflexión) figura 18.

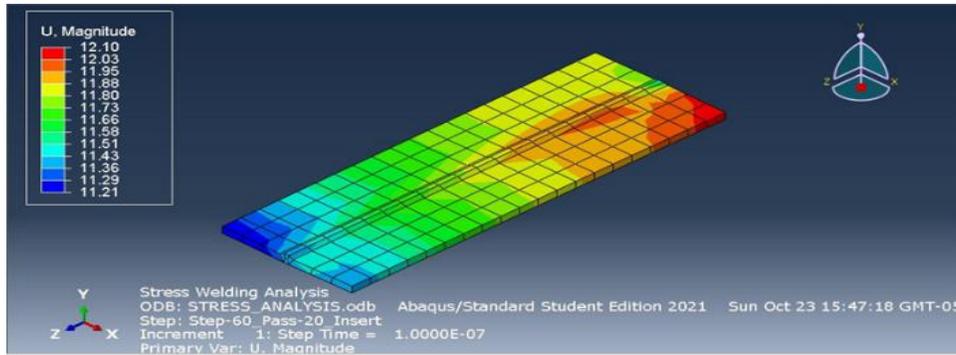


Figura 18. Deflexión en las láminas soldadas

En la tabla 6 se registran los valores de la deflexión máxima en la simulación y se compara con los resultados presentados en el capítulo anterior correspondientes a las medidas tomadas directamente sobre la soldadura de las láminas y calculando el error presente entre resultados.

Tabla 6. Porcentaje de error en la deflexión real versus simulación

Dimensiones placa	Deflexión Máxima en la práctica		Deflexión Máxima Simulación	Error %
	Medición	Media		
<b>152,4 mm x 50,8 mm x 3,175 mm</b>	3,21	3,21 mm	3,21 mm	11.21%
	3,20			
	3,22			
	3,21			
	3,19			
<b>152,4 mm x 50,8 mm x 3,175 mm</b>	12,07	12,10	10,91	9,83%
	12,15			
	12,13			
	12,06			
	12,10			

Fuente: Equipo de investigación

En el análisis térmico se observa el comportamiento de la temperatura en el cordón figura 19, teniendo en cuenta los resultados obtenidos, se evidencia similitud en los resultados comparado con otros estudios realizados en uniones soldadas con materiales diversos.

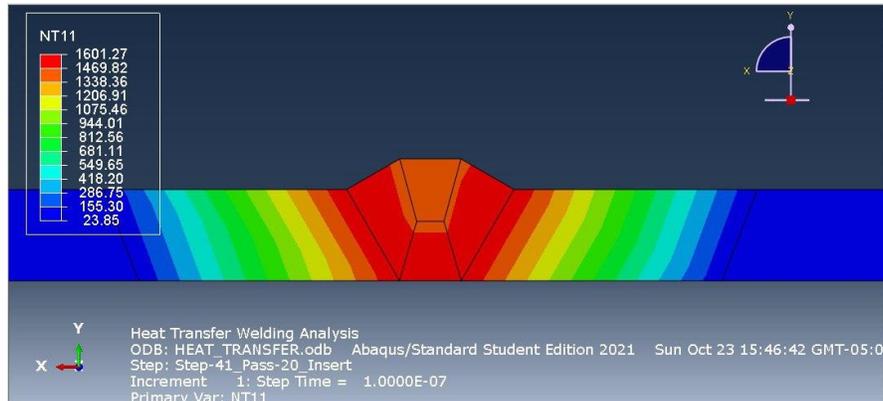


Figura 19. Distribución de temperatura en el cordón

## 6.4. Conclusiones

Para las deformaciones obtenidas a partir de la simulación se puede decir que se ajustan de forma similar con las deformaciones obtenidas en la medición de las placas soldadas en el laboratorio, sin embargo, se evidencia un error máximo de 11,21 % en la placa de dimensiones 152,4 mm x 50,8 mm x 3,175 mm y un error máximo de 9,83 en la placa de dimensiones 152,4 mm x 25,4 mm x 3,175 mm. Por tanto, se puede argumentar que es posible predecir la deflexión en las uniones soldadas de material acero inoxidable AISI 304 usando el método de elementos finitos en el software Abaqus CAE usando el Plug-in AWI, teniendo en cuenta el error antes mencionado.

## Conclusiones Generales y futuros trabajos

---

A continuación, se presentan las conclusiones generales del documento y trabajos futuros que se desarrollan de los resultados de la investigación.

### 7.1. Conclusiones del objetivo general

En conclusión, se puede decir que la deflexión que se presenta en juntas soldadas de acero inoxidable AISI 304, puede predecirse con un margen de error del 11 %, siendo un aporte en el desarrollo propio de las empresas que se dedican al montaje de estructuras ornamentales de dicho material.

El software usado para realizar la simulación ofrece resultados favorables en el análisis de elementos finitos versus los resultados experimentales.

La simulación puede ser replicable en otros ambientes o regiones teniendo en cuenta que deben analizarse bien las condiciones de frontera, tanto del proceso como de los equipos y variables propias del proceso.

### 7.2. Futuros trabajos

Para futuros trabajos se plantea enfocar el estudio a empresas que tengan la capacidad económica para invertir en software no estudiantil y ajustar las variables y condiciones de frontera para que el error sea menor.

Se puede realizar el análisis del comportamiento de la deflexión con la aplicación de soldadura con el proceso CAW, el cual utilizan un pequeño grupo de ornamentadores, por el costo minimizado, la cantidad de recursos que requiere e incluso la calidad de la unión.

Se propone usar estrategias de diseño CAD para aprovechar las simetrías y explotar mejor el recurso computacional.

## Bibliografía.

---

1. Abasolo, M., Aguirrebeitia, J., Coria, I., Heras, I., 2017. Guía práctica de Elementos Finitos en estática, Paraninfo.
2. Arora, H., Mahaboob Basha, K., Naga Abhishek, D., Devesh, B., 2021a. Welding simulation of circumferential weld joint using TIG welding process. Mater. Today Proc. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.06.315>
3. Arora, H., Sarfas, M., Dalavaye, R., Singh, J., Gupta, S., 2021b. Weld analysis of square butt joint using MSC Marc Mentat. Mater. Today Proc. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.06.155>
4. Çengel, Y.A., GHAJAR, A.J., 2011. TRANSFERENCIA DE CALOR Y MASA, 4th ed. Mexico D.F.
5. Jeffus, L., 2008. Manual De Soldadura GTAW (Tig).
6. Kalpakjian, S., Schmid, S., 2008. MANUFACTURA, INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA, 5 ed. ed. mexico.
7. Li, X., Hu, L., Deng, D., 2022. Influence of contact behavior on welding distortion and residual stress in a thin-plate butt-welded joint performed by partial-length welding. Thin-Walled Struct. 176, 109302. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.109302>
8. Pretelt Blanco, L.F., Territorial, M. en U. y D., 2015. Montería polo de desarrollo y como epicentro estratégico intermediario dentro de una subregión polinuclear, en el suroeste del Caribe colombiano. Universidad del Norte.
9. Sepe, R., Greco, A., De Luca, A., Caputo, F., Berto, F., 2021. Influence of thermo-mechanical material properties on the structural response of a welded butt-joint by FEM simulation and experimental tests. Forces Mech. 4, 100018. <https://doi.org/10.1016/j.finmec.2021.100018>

# ANEXOS

A continuación, se presentan los diferentes documentos anexos los cuales fueron necesarios para el desarrollo de la investigación.

## Anexo 1

### 产品质量证明书 CERTIFICATE OF QUALITY

订单号码: EXAI201216466 品名: STAINLESS STEEL SHEETS AND COILS AND PLATES  
 Order No. Commodity  
 订货方: ACINOX S.A.  
 Order  
 使用厂家: ACINOX S.A.  
 Consignee

编号: EXAI201216466  
 Invoice No.  
 发行日期: 2021/4/2  
 Date

序号 No.	货物编号 Product No.	材质grade	产品尺寸 Product Size			数量 Number	重量 Weight Kg	拉伸试验 Mechanical Test			表面硬度 Hardness HV	炉批号 HEAT NO.	化学成分 Chemical Composition (%)							
			厚度 Thickness MM	宽度 Width MM	长度 Length MM			屈服强度 0.2% YS N/mm <sup>2</sup>	抗拉强度 TS N/mm <sup>2</sup>	延伸率 EL %			C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	N
1	210402001	304/NO.1	3.00	1219	2438	40	2765	290	674	48	81.5	HA2845910	0.0470	0.4400	1.5800	0.0320	0.0010	8.0000	18.0500	0.0500
2	210402002	304/NO.1	3.00	1524	3048	17	1755	336	681	51	89	H24455010	0.0440	0.6100	1.7000	0.0250	0.0010	8.0000	18.0500	0.0500
3	210402003	304/NO.1	3.00	1524	3048	17	1755	336	681	51	89	H24455010	0.0440	0.6100	1.7000	0.0250	0.0010	8.0000	18.0500	0.0500
4	210402004	304/NO.1	4.50	1219	2438	19	2015	314	678	55	177	HB231041	0.0420	0.4100	1.6200	0.0300	0.0020	8.0000	18.1000	0.0500
5	210402005	304/NO.1	4.50	1219	2438	26	2680	256	680	56	84	HA2354001	0.0460	0.4400	1.6100	0.0300	0.0010	8.0000	18.0000	0.0500
6	210402006	304/NO.1	4.50	1219	2438	20	2050	256	680	56	84	HA2354001	0.0460	0.4400	1.6100	0.0300	0.0010	8.0000	18.0000	0.0500
7	210402007	304/NO.1	4.50	1524	3048	17	2760	359	682	54	90	HA92450055	0.0420	0.4000	1.6500	0.0300	0.0010	8.0000	18.1000	0.0500
8	210402008	304/NO.1	4.50	1524	3048	17	2760	359	682	54	90	HA92450055	0.0420	0.4000	1.6500	0.0300	0.0010	8.0000	18.1000	0.0500
9	210402009	304/NO.1	6.00	1219	2438	20	2795	307	649	54	84	HA2455995	0.0440	0.4900	1.5500	0.0320	0.0010	8.0000	18.2200	0.0500
10	210402010	304/NO.1	6.00	1219	2438	20	2795	307	649	54	84	HA2455995	0.0440	0.4900	1.5500	0.0320	0.0010	8.0000	18.2200	0.0500
11	210402011	304/NO.1	6.00	1524	3048	9	1920	344	694	51	91	HA88599956	0.0490	0.3900	1.6000	0.0260	0.0010	8.0000	18.2000	0.0500
12	210402012	304/NO.1	9.00	1524	3048	5	1770	328	683	56	90	HA84258651	0.0440	0.6100	1.7000	0.0250	0.0010	8.0000	18.0500	0.0500
13	210402013	304/NO.4/PE	0.90	1219	2438	120	2440	273	685	54	84	HA210131	0.0420	0.6000	1.5600	0.0290	0.0010	8.0000	18.0000	0.0500
14	210402014	304/NO.4/PE	0.90	1219	2438	121	2460	273	685	54	84	HA210131	0.0420	0.6000	1.5600	0.0290	0.0010	8.0000	18.0000	0.0500
15	210402015	304/NO.4/PE	0.90	1524	1800	95	1792	288	630	56	79	HA9045097	0.0400	0.4100	1.6000	0.0270	0.0010	8.1000	18.4000	0.0500
16	210402016	304/NO.4/PE	0.90	1524	1800	95	1792	288	630	56	79	HA9045097	0.0400	0.4100	1.6000	0.0270	0.0010	8.1000	18.4000	0.0500
17	210402017	304/NO.4/PE	1.20	1219	2438	90	2484	276	655	56	84	HA210132	0.0400	0.4900	1.5300	0.0310	0.0020	8.0000	18.6000	0.0600
18	210402018	304/NO.4/PE	1.20	1219	2438	90	2484	276	655	56	84	HA210132	0.0400	0.4900	1.5300	0.0310	0.0020	8.0000	18.6000	0.0600
19	210402019	304/NO.4/PE	1.50	1524	3048	20	1026	293	650	55	88	HA9046093	0.0400	0.4100	1.6000	0.0270	0.0010	8.1000	18.4000	0.0500
20	210402020	304/2B/PI	0.90	1219	2438	84	1708	273	685	54	84	HA210131	0.0420	0.6000	1.5600	0.0290	0.0010	8.0000	18.0000	0.0500
21	210402021	304/2B/PI	0.90	1219	2438	84	1710	273	685	54	84	HA210131	0.0420	0.6000	1.5600	0.0290	0.0010	8.0000	18.0000	0.0500
22	210402022	304/2B/PI	1.20	1219	2438	72	1975	276	655	56	84	HA210132	0.0400	0.4900	1.5300	0.0310	0.0020	8.0000	18.6000	0.0600
23	210402023	304/2B/PI	1.20	1219	2438	72	1975	276	655	56	84	HA210132	0.0400	0.4900	1.5300	0.0310	0.0020	8.0000	18.6000	0.0600
24	210402024	304/2B/PI	1.20	1219	2438	72	1975	276	655	56	84	HA210132	0.0400	0.4900	1.5300	0.0310	0.0020	8.0000	18.6000	0.0600
25	210402025	304/2B/PI	1.20	1219	2438	72	1975	276	655	56	84	HA210132	0.0400	0.4900	1.5300	0.0310	0.0020	8.0000	18.6000	0.0600



FICHA TÉCNICA DEL ACERO INOXIDABLE

TABLA DE CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL ACERO INOXIDABLE		SERIE 300		
		Acero al Cromo - Níquel	Acero al Cromo - Níquel - Molibdeno	
DESIGNACIÓN	TIPO AISI	<b>304</b>	<b>316</b>	
	COMPOSICIÓN QUÍMICA	C ≤ 0.08%* Si ≤ 1.00% Mn ≤ 2.00% Cr 18% - 20%* Ni 8% - 10,5%*	C ≤ 0.08%* Si ≤ 1.00% Mn ≤ 2.00% Cr 16% - 18%* Ni 10% - 14%* Mo 2% - 2,5%*	
PROPIEDADES FÍSICAS	PESO ESPECÍFICO A 20C (DENSIDAD) (g/cm <sup>3</sup> )	7.9	7.95 - 7.98	
	MÓDULO DE ELASTICIDAD (N/mm <sup>2</sup> )	193,000	193,000	
	ESTRUCTURA	AUSTENÍTICO	AUSTENÍTICO	
	CALOR ESPECÍFICO A 20C (J/Kg K)	500	500	
	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA A 20C/100C (W/m K)	15 / 16	15 / 16	
	COEFICIENTE DE DILATACIÓN A 100C (x 10 <sup>6</sup> C <sup>-1</sup> )	16.0 - 17.30	16.02 - 16.5	
	INTERVALO DE FUSIÓN (C)	1398/1454	1371/1398	
PROPIEDADES ELÉCTRICAS	PERMEABILIDAD ELÉCTRICA EN ESTADO SOLUBLE RECOCIDO	AMAGNÉTICO 1.008	AMAGNÉTICO 1.008	
	CAPACIDAD DE RESISTENCIA ELÉCTRICA A 20C (μΩm)	0.72 - 0.73	0.73 - 0.74	
PROPIEDADES MECÁNICAS A 20C	DUREZA BRINELL RECOCIDO HRB/CON DEFORMACIÓN EN FRÍO	130150 / 180330	130185 / -	
	DUREZA ROCKWELL RECOCIDO HRB/CON DEFORMACIÓN EN FRÍO	7088 / 1035	7085 / -	
	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN RECOCIDO / DEFORMACIÓN EN FRÍO Rm (N/mm <sup>2</sup> )	520 - 720 / 540 - 750	540690 / -	
	ELASTICIDAD RECOCIDO / CON DEFORMACIÓN EN FRÍO Rp (N/mm <sup>2</sup> )	210 / 230	205410 / -	
	ELONGACIÓN (A <sub>5</sub> ) MIN (%)	≥ 45		
	RESILIENCIA KCUL / KVL (J/cm <sup>2</sup> )	160 / 180	160 / 180	
PROPIEDADES MECÁNICAS EN CALIENTE	ELASTICIDAD	RP(0.2) A 300C/400C/500C (N/mm <sup>2</sup> )	125 / 97 / 93	140 / 125 / 105
		RP(1) A 300C/400C/500C (N/mm <sup>2</sup> )	147 / 127 / 107	166 / 147 / 127
	LÍMITE DE FLUENCIA A 500C/600C/700C/800C σ <sub>1/10</sub> <sup>1/2</sup> t (N/mm <sup>2</sup> )	68 / 42 / 14.5 / 4.9	82 / 62 / 20 / 6.5	
TRATAMIENT. TÉRMICOS	RECOCIDO COMPLETO RECOCIDO INDUSTRIAL (OC)	ENFR. RÁPIDO 1008/1120	ENFR. RÁPIDO 1008/1120	
	TEMPLADO	NO ES POSIBLE	NO ES POSIBLE	
	INTERVALO DE FORJA INICIAL / FINAL (C)	1200 / 925	1200 / 925	
	FORMACIÓN DE CASCARILLA, SERVICIO CONTINUO / SERVICIO INTERMITENTE	925 / 840	925 / 840	
OTRAS PROPIEDADES	SOLDABILIDAD	MUY BUENA	MUY BUENA	
	MAQUINABILIDAD COMPARADO CON UN ACERO BESSEMER PARA a. B1112	45%	45%	
	EMBUTICIÓN	MUY BUENA	BUENA	

\* Son aceptables tolerancias de un 1%



FICHA TÉCNICA DEL ACERO INOXIDABLE

## PROPIEDADES DEL ACERO INOXIDABLE AISI 304

### APLICACIONES

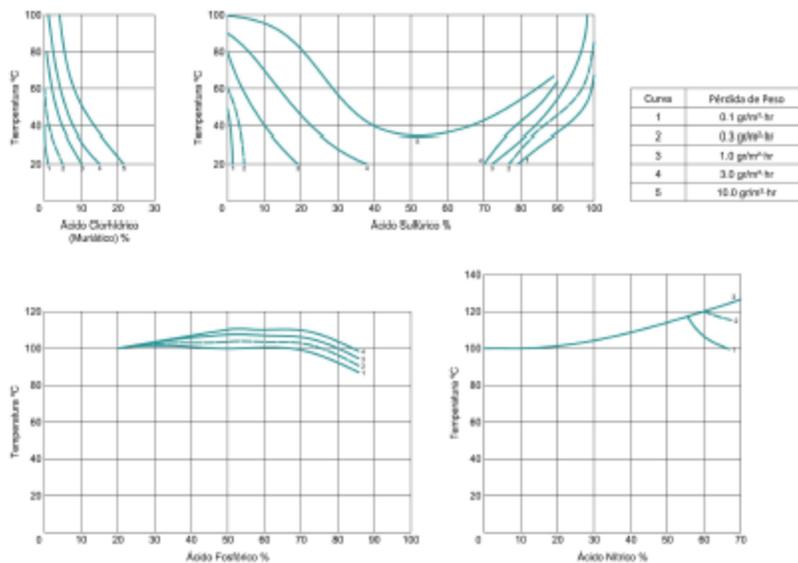
Debido a su buena resistencia a la corrosión, conformado en frío y soldabilidad, este acero es usado extensivamente para arquitectura, industria automotriz y para la fabricación de utensilios domésticos. Además es utilizado en la construcción de estructuras y/o contenedores para las industrias procesadoras de alimentación y para la industria química de producción del nitrógeno.

### CARACTERÍSTICAS DEL ACERO AISI 304

Acero inoxidable austenítico, aleado con cromo, níquel y bajo contenido de carbono que presenta una buena resistencia a la corrosión. No requiere un tratamiento posterior al proceso de soldadura; tiene propiedades para embutido profundo, no es templable ni magnético. Puede ser fácilmente trabajado en frío (por ejemplo doblado, cilindrado, embutido profundo, etc.) Sin embargo, el alto grado de endurecimiento que alcanza por trabajo en frío, comparado con aceros de baja aleación, hacen requerir de mayores esfuerzos para su proceso de conformado.

### Resistencia a la corrosión

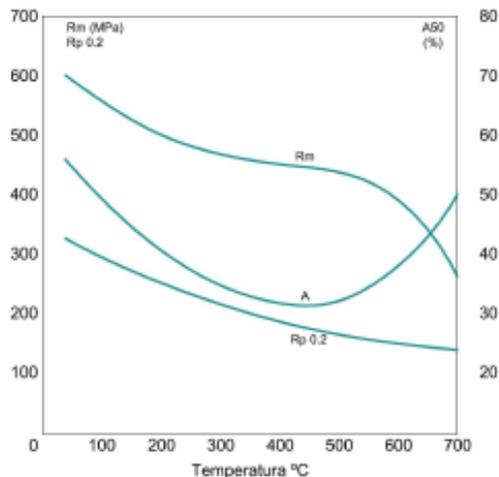
En los diagramas se observan las pérdidas de peso, determinadas experimentalmente para diferentes probetas atacadas con concentraciones variables para distintos ácidos en función de la temperatura. Las curvas representan la pérdida de peso de 0.1, 0.3, 1.0, 3.0 y 10.0 gr/m<sup>2</sup>·hr. Generalmente, una pérdida de peso de 0.3 gr/m<sup>2</sup>·hr (línea segmentada) se considera en el límite tolerable de un acero inoxidable.



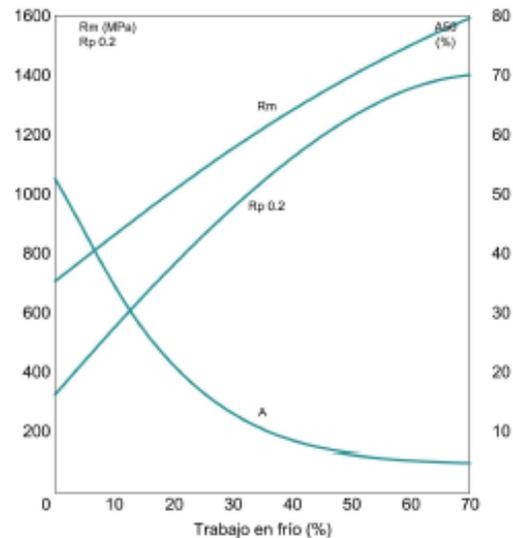
## Carbone Stainless Steel

FICHA TÉCNICA DEL ACERO INOXIDABLE

### Efecto de la temperatura en las propiedades mecánicas



### Efecto del trabajo en frío en las propiedades mecánicas



## PROPIEDADES DEL ACERO INOXIDABLE AISI 316

### APLICACIONES

Acero resistente a la corrosión intercrystalina hasta 300°C bajo condiciones de operación continua. Con la adición de molibdeno se le confiere una alta resistencia a ácidos no oxidables y corrosión por picado. El acero AISI 316 es utilizado en piezas y elementos de la industria de la celulosa, textiles, seda artificial, equipos para el desarrollo de fotografía, ejes de hélices, acoples. Usualmente utilizado en industria química y farmacéutica. Ideal para ser usado en piezas y elementos expuestos a la corrosión localizada originada por el ácido sulfuroso, baños de pinturas con ácido sulfúrico, baños clorados, etc.

### CARACTERÍSTICAS DEL ACERO AISI 316

El acero AISI 316 corresponde a un acero inoxidable aleado con molibdeno. Esta adición le confiere mejores propiedades anticorrosivas que los de la familia 304, debido principalmente a que se disminuye de forma importante la susceptibilidad a la corrosión por picado, dado que la capa pasiva formada es mucho más resistente.