



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

# UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

---

## COMPORTAMIENTO DE LA SOLDADURA TIG EN ACERO INOXIDABLE 304L CON VARILLA 308L E INCONEL 625 FRENTE A CORROSIÓN BAJO TENSIÓN.

*TRABAJO FINAL DEL*

**Grado en Ingeniería Mecánica**

*REALIZADO POR*

**Rubén Carbonell Morales**

*TUTORIZADO POR*

**Manuel Pascual Guillamón**

**Fidel Salas Vicente**

**FECHA: Valencia, Julio, 2019**



# COMPORTAMIENTO DE LA SOLDADURA TIG EN ACERO INOXIDABLE 304L CON VARILLA 308L E INCONEL 625 FRENTE A CORROSIÓN BAJO TENSIÓN.

## RESUMEN DEL TRABAJO FINAL DE GRADO

- Español

El proyecto está basado en la determinación del comportamiento frente a corrosión bajo esfuerzos tensiles de deformación de soldaduras en periodo plástico, en ambientes corrosivos que simulan estados marinos empleando como material base acero inoxidable AISI 304L y como aporte de soldadura electrodos AISI 308L y varillas de Inconel 625. Determinando las curvas de evolución que cumplan la relación establecida entre tensiones y corrosiones, así como la relación entre corrosiones y espesores de las muestras del ensayo.

- Valenciano

El projecte està basat en la determinació del comportament front a corrosió sota esforços tensils de deformació de soldadures en període plàstic, en ambients corrosius que simulen estats marins emprant com a material base acer inoxidable AISI 304L i com a aportació de soldadura elèctrodes AISI 308L i varetes de Inconel 625. Determinant les corbes d'evolució que complisquen la relació establida entre tensions i corrosions, així com la relació entre corrosions i grossàries de les mostres de l'assaig.

- Ingles

The project is based on the determination of the behavior against corrosion under tensile stresses of welds in plastic period, in corrosive environments that simulate marine states using as base material stainless steel AISI 304L and as a contribution of welding AISI 308 L electrodes and rods Inconel 625. Determining evolution curves that meet the established relationship between tensions and corrosions, as well as the relationship between corrosion and thickness in test samples.

## PALABRAS CLAVE

Soldadura; Corrosión; Esfuerzos; Periodo plástico; Deformación; AISI 304L; AISI308L; INCONEL 625; Evolución; Ambiente corrosivo.

Soldadura; Corrosió; Esforços; Període plàstic; Deformació; \*AISI 304L; AISI308L; INCONEL 625; Evolució; Ambient corrosiu.

Welding; Corrosion; Effort; Plastic Period; Deformation; AISI 304L; AISI308L; INCONEL 625; Evolution; Corrosive Environment.



**CAPÍTULO 1**  
**MEMORIA DESCRIPTIVA**

## ÍNDICE DE CONTENIDO

Memoria

<b>1. OBJETO DEL PROYECTO .....</b>	<b>9</b>
<b>2. ANTECEDENTES .....</b>	<b>11</b>
2.1. CLASIFICACIÓN DE LOS ACEROS INOXIDABLES .....	11
2.1.1. ACEROS FERRÍTICOS .....	12
2.1.2. ACEROS MARTENSÍTICOS .....	13
2.1.3. ACEROS AUSTENÍTICOS .....	14
2.1.4. SUBCLASIFICACIÓN DE LOS ACEROS INOXIDABLES .....	15
2.1.4.1. Serie 200 AISI .....	16
2.1.4.2. Serie 300 AISI .....	16
2.1.4.2.1. Acero inoxidable tipo 304L .....	16
2.1.4.2.2. Acero inoxidable 308L .....	17
2.1.4.3. INCONEL 625 .....	17
<b>3. CARACTERES DE SOLDABILIDAD</b>	
<b>DE LOS ACEROS INOXIDABLES.....</b>	<b>18</b>
3.1. ACEROS AUTENÍTICOS AL CROMO-NIQUEL .....	18
3.1.1. Propiedades físicas respecto aceros ordinarios al carbono .....	19
3.1.2. Propiedades de las uniones soldadas .....	19
3.1.3. Precipitación de los carburos .....	20
3.2. ACEROS FERRÍTICOS AL CROMO .....	21
3.3. ACEROS MARTENSÍTICOS AL CROMO .....	21
<b>4. RECOMENDACIONES DE TIPO GENERAL PARA LOS PROCEDIMIENTOS</b>	
<b>DE SOLDADURA POR FUSION.....</b>	<b>22</b>
4.1. PREPARACIÓN DE LOS BORDES DE LAS PIEZAS A UNIR .....	22
4.1.1. Precisión en el corte de las piezas a unir .....	23
4.1.2. Prevención contra la contaminación de la soldadura .....	24
4.2. FACTORES METALÚRGICOS QUE CONDICIONAN LA	
ELECCIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA .....	25
4.3. CÓMO PREVERNIR LAS DEFORMACIONES .....	27
4.4. TRATAMIENTO TÉRMICO POSTERIOR A LA SOLDADURA .....	29
4.5. LIMPIEZA Y ACABADO DE LAS UNIONES SOLDADAS .....	30
4.6. ENSAYOS EN SOLDADURAS .....	32

<b>5. PROCESOS DE SOLDADURA</b> .....	<b>33</b>
5.1. INTRODUCCIÓN.....	33
5.2. TIPOS DE SOLDADURA.....	34
5.2.1. Soldadura por arco eléctrico con electrodos revestidos.....	35
5.2.1.1. Campo de aplicación.....	37
5.2.1.2. Elementos.....	37
5.2.1.3. Intensidad de la corriente.....	39
5.2.1.4. Características del arco eléctrico.....	40
5.2.1.5. Técnica operatoria.....	41
5.2.1.6. Tipos de electrodos.....	42
5.2.1.7. Clasificación de los electrodos en función del tipo de revestimiento.....	44
5.2.1.8. Clasificación de los electrodos en función del espesor de revestimiento.....	48
5.2.1.9. Composición de los electrodos.....	49
5.2.2. Soldadura por arco eléctrico con gas protector.....	49
5.2.2.1. Soldadura MIG-MAG.....	50
5.2.2.2. Soldadura TIG.....	53
5.2.2.2.1. Consumibles soldadura TIG.....	57
5.3. SEGURIDAD.....	58
5.3.1. Recomendaciones generales sobre soldadura con arco.....	58
5.3.2. Equipo de protección personal.....	59
<b>6. CARACTERIZACIÓN DE ELECTRODOS Y VARILLAS PARA SOLDADURA</b> .....	<b>60</b>
6.1. ELECTRODOS NO CONSUMIBLES.....	61
6.2. VARILLAS APORTE DE ACERO INOXIDABLE.....	62
6.3. DIAGRAMA DE SCHAEFFLER.....	63
<b>7. METODOLOGIA DE OBTENCIÓN DE LAS PROBETAS DE ENSAYO</b> .....	<b>65</b>
7.1. RESUMEN DEL PROCESO REALIZADO.....	65
7.2. PROCESO DE SOLDADURA REALIZADO PARA MATERIAL BASE AISI 304L CON METAL DE APORTE AISI 308I E INCONEL625.....	67
7.3. ENSAYO TRACCIÓN DE LAS PROBETAS CON MATERIAL BASE AISI304L CON METAL DE APORTE AISI308L E INCONEL625.....	72
7.3.1. Determinación de la tensión de rotura.....	73
7.3.2. Determinación del alargamiento en %.....	75
7.3.3. Determinación del módulo de elasticidad.....	77

7.4. CORROSIÓN POR PICADURAS.....	78
7.4.1. Preparación del ensayo de corrosión por picaduras.....	79
7.4.2. Corrosión por diferencia de peso.....	80
<b>8. SOLDADURA DE ACERO AISI 304L CON METAL DE APORTE AISI 308L Y ATMÓSFERA INERTE DE ARGÓN.....</b>	<b>81</b>
8.1. RESULTADOS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN.....	81
8.2. RESULTADOS DEL ENSAYO DE CORROSIÓN POR PICADURAS.....	88
8.2.1. Corrosión por diferencia de peso.....	89
8.3. CONCLUSIONES SOLDADURA ACERO INOXIDABLE 304L CON VARILLA 308L FRENTE A CORROSIÓN BAJO TENSIÓN.....	90
<b>9. SOLDADURA DE ACERO AISI 304L CON METAL DE APORTE INCONEL625 Y ATMÓSFERA INERTE DE ARGÓN.....</b>	<b>92</b>
9.1. RESULTADOS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN.....	92
9.2. RESULTADOS DEL ENSAYO DE CORROSIÓN POR PICADURAS.....	98
9.2.1. Corrosión por diferencia de peso.....	99
9.3. CONCLUSIONES SOLDADURA ACERO INOXIDABLE 304L CON VARILLA INCONEL 625 FRENTE A CORROSIÓN BAJO TENSIÓN.....	100
<b>10. TABULACIÓN GENERAL DE DATOS.....</b>	<b>102</b>
<b>11. CONCLUSIONES.....</b>	<b>106</b>

## 1. OBJETO DEL PROYECTO

El objeto de estudio del siguiente proyecto será comprobar el comportamiento frente a corrosión bajo tensión de un **acero base inoxidable AISI 304L** con la adición de dos metales de aporte diferente, **acero inoxidable AISI 308L** e **Inconel 625**, estos dos metales se aportaran en forma de varilla mediante soldadura TIG y bajo una atmosfera protectora inerte de gas Argón.

El área de estudio de las muestras será aquella en la que se encuentre la unión soldada, debido a que en dicha región será donde puedan encontrarse los cambios en la estructura interna debido a la alta temperatura del proceso de soldeo, a la adición de metales diferentes al metal base y tensiones residuales debido a la tracción.

Se evaluara como varían las características mecánicas bajo ensayos que se realizaran en las muestras; dichos ensayos comprenden **laminado en frio, tracción y corrosión con cloruro férrico** con el fin de poder establecer una comparación entre los resultados obtenidos con valores como el límite elástico, pérdida de peso y corrosión por picaduras

Este proyecto sirve por tanto para conocer las características mecánicas de una soldadura heterogénea con dos aceros inoxidables diferentes y con muestras de distintos espesores, donde obtendremos datos tan relevantes como la tensión de rotura o el límite elástico. Y por otra parte conocer los efectos que produce la corrosión en dichas muestras, pudiendo por tanto simular condiciones a la que los aceros inoxidables utilizados en la vida real están sometidos tales como los depósitos de residuos corrosivos o depósitos de la industria petroquímica.

Poner en conocimiento que las probetas han sido realizadas por el alumno encargado del proyecto, encontrando dificultades en el proceso de soldadura tales como falta de penetración, tensiones internas de las probetas debido al gradiente de temperatura que se genera durante el proceso de soldeo, discontinuidades del cordón de soldadura y muescas en los extremos de la soldadura.

## 2. ANTECEDENTES

### 2.1. Clasificación de los aceros inoxidables

- **Acero inoxidable**

El acero inoxidable es una aleación a base de hierro, con un bajo contenido de carbono y un mínimo de 10% de Cromo, este último material, además de actuar como estabilizante de la Ferrita es el responsable de aportar al acero su característica resistencia a la corrosión. Para requerimientos específicos pueden añadirse elementos tales como *níquel, molibdeno o silicio* los cuales modificaran la composición de la aleación mejorando las propiedades del acero inoxidable ante medios críticos y agentes corrosivos.

En aleaciones como las citadas anteriormente se impide que la corrosión afecte al acero esto es debido a que se crea una capa de óxido de cromo muy fina que lo protege de este factor, Para producir el óxido protector, el acero inoxidable tiene que estar expuesto a agentes oxidantes.

En caso de que dicha capa de óxido sea rayada esta película protectora es removida pero se restaura al instante, debido a que el cromo posee gran afinidad por el oxígeno y se combina con él restaurando la capa protectora

Destacar que los aceros inoxidables comerciales con un 11% de cromo y hasta un 0.8% de carbono, con níquel como segundo elemento de aleación podrán soportar ambientes poco agresivos como puede ser el interior de una vivienda. Para que un acero soporte condiciones atmosféricas críticas, temperaturas elevadas o atmosferas industriales el contenido de cromo deberá ser de alrededor de un 18% pudiendo añadir molibdeno, el cual contribuye especialmente a la resistencia a la corrosión

Los **aceros inoxidables** pueden clasificarse en cuatro grupos principales: ferrítico, martensítico, austenítico y endurecido por precipitación. Analizaremos los tres primeros:

### **2.1.1. Aceros ferríticos**

Los aceros inoxidables ferríticos, son esencialmente aleaciones binarias de hierro-cromo, el contenido de cromo varía entre el 10.5% (Tipo 409) y el 30% (Tipo 448). Su contenido en carbono suele ser bajo, generalmente inferior al 0,15% y se caracterizan por una estructura ferrítica (cc, tipo hierro  $\alpha$ ) a cualquier temperatura. No presenta transformación de ferrita en austenita durante el calentamiento ni transformación martensítica en el enfriamiento. Pertenecen a la serie AISI 400.

Su resistencia a la corrosión suele ser moderada o buena, siendo ligeramente superior a la de los aceros inoxidables martensíticos, pero inferior a la de los grados austeníticos. Dicha resistencia se incrementa con el aumento en contenido de cromo y añadiendo molibdeno. Destacar que estos aceros no poseen Níquel, lo cual reduce la resistencia general a la corrosión, los hace susceptibles en muchos medios pero abarata su coste. Aquellos aceros ferríticos los que tienen un contenido en cromo entre el 25 % y el 30 %, tienen un excelente comportamiento frente a la oxidación a temperaturas elevadas. Un acero ferrítico con un 27% de cromo es capaz de resistir hasta los 1050°C.

Este tipo de aceros suelen ser blandos, de resistencia mecánica bastante baja y relativamente frágiles, por lo que su uso se limita generalmente a procesos de formado en frío. Su soldabilidad es pobre por lo que generalmente se eliminan las uniones por soldadura a calibres delgados.

Usualmente se les aplica un tratamiento de recocido con el que se obtiene una mayor suavidad, ductilidad y resistencia a la corrosión. No pueden ser endurecidos mediante tratamiento térmico, se endurece moderadamente por trabajo en frío.

### **2.1.2. Aceros martensíticos**

Los aceros inoxidables martensíticos son en esencia aleaciones Fe-Cr. Contienen entre un 12 a 14 % de Cr, excepto los tipos 440 A, B y C que contienen de un 16 a 18 % de Cr, y tienen un contenido relativamente alto del carbono (0.15 a 1.0% C) lo cual permite que se produzca mediante el templado una estructura martensítica a partir de la región de la fase austenítica. Estas aleaciones se denominan martensíticas debido a que son capaces de desarrollar una estructura de ese tipo después de un tratamiento térmico de austenizado y templado. Comparten la denominada serie AISI 400 junto con el acero inoxidable ferrítico.

La composición de dichos aceros se ajusta para optimizar solidez y dureza, lo cual repercute en que la resistencia a la corrosión sea entre moderada y baja en comparación con los de tipo ferrítico y austenítico.

Son magnéticos y de baja soldabilidad por la cantidad de carbono que posee la aleación. Resisten sin oxidarse temperaturas de hasta 750°C. Todos los aceros martensíticos se caracterizan porque pueden ser endurecidos por tratamiento térmico, por lo tanto se pueden desarrollar altos niveles de resistencia mecánica y dureza.

### **2.1.3. Aceros austeníticos**

Los aceros inoxidables austeníticos son aleaciones ternarias de hierro-cromo-níquel. Contienen generalmente entre 16 y 25 % de Cr y de 7 a 20 % de Ni.

La presencia del níquel permite que este acero sea estable a temperatura ambiente, ya que suprime la transformación de la austenita y lo estabiliza en todas las temperaturas normales del tratamiento térmico, siendo la estructura (ccc, tipo hierro  $\gamma$ ). Debido a esa estructura se debe la alta moldeabilidad de estos aceros.

Estos aceros tienen normalmente mayor resistencia a la corrosión que los de tipo ferrítico y martensítico porque los carburos pueden conservarse en solución sólida mediante el enfriamiento rápido a partir de altas temperaturas. Sin embargo, si esas aleaciones se soldaran o enfriaran lentamente a partir de altas temperaturas en el rango de 870 a 600°C, pueden volverse susceptibles a la corrosión intergranular porque los carburos que contienen cromo se precipitan en los límites del grano. Esta dificultad se puede evitar hasta cierto punto si se reduce el contenido máximo de carbono en la aleación a cerca de 0.03% C (aleación tipo 304L) o si se agrega un elemento de aleación como el columbio (niobio) (aleación tipo 347) para que se combine con el carbono de la aleación.

Los aceros inoxidables austeníticos constituyen la familia con el mayor número de aleaciones integrando las series 200 AISI y 300 AISI. Destacar que el acero base que se ha soldado para el desarrollo de este trabajo ha sido el 304L, empleando como material de aporte el acero inoxidable 308L en una de las dos partes.

### 2.1.4. Subclasificación de los aceros inoxidables

En 1912, la SAE (Sociedad de Ingenieros Automotores de Estados Unidos) se vio en la imperiosa necesidad de organizar los diferentes aceros según su composición. Se reunieron con productores y consumidores de aceros para crear la primera nomenclatura sobre composición de los aceros. Lo que derivó en la posterior creación de la **AISI (Instituto Americano del Hierro y el Acero)**

Dicha clasificación se realizó sobre la base de un determinado grado: AISI 420, para los martensíticos; AISI 430 para los ferríticos, AISI 304 y AISI 316 para los austeníticos y para los austenoferríticos (dúplex): AISI 201 y AISI 202; modificando uno o varios elementos de aleación obtenemos distintos grados dentro del mismo grupo aptos para mejorar algunas propiedades y/o usos.

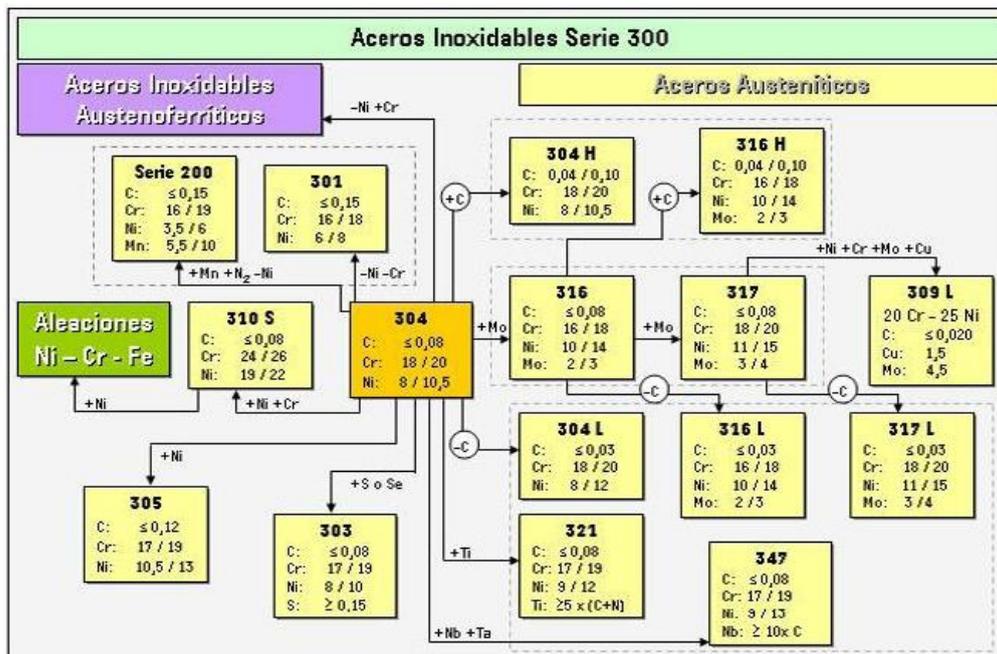


Figura 1. Clasificación aceros inoxidables Serie 300

(“www.herrerros argentinos.com”)

#### **2.1.4.1. SERIE 200 AISI**

Contiene menor cantidad de níquel. El contenido de manganeso es de 5 a 20%. La adición de nitrógeno incrementa la resistencia mecánica.

#### **2.1.4.2. Serie 300 AISI**

Es la más extensa, mantiene un alto contenido de níquel y hasta un 2% de manganeso. También puede contener molibdeno, cobre, silicio, aluminio, titanio y niobio, elementos que son adicionados para conferir ciertas características. En ciertos tipos se usa azufre o selenio para mejorar su habilidad de ser maquinados.

##### **2.1.4.2.1. Acero inoxidable Tipo 304L**

El tipo **304L** se emplea para todo propósito, se prefiere este respecto al 304 en las aplicaciones de soldadura para excluir la formación de carburos de cromo durante el enfriamiento en la región afectada por el calor de la soldadura. Tiene propiedades adecuadas para gran cantidad de aplicaciones, se recomienda para construcciones soldadas que requieran buena resistencia a la corrosión y que no requieran tratamiento térmico después de soldar. Tiene buen desempeño en temperaturas elevadas (800 a 900° C) y proporcionan resistencia a la corrosión en una amplia variedad de condiciones de oxidación y reducción moderadas, agua fresca y aplicaciones no marinas. Es recomendable cuando se requiera soldar altos espesores de material. Algunas aplicaciones son equipos químicos y tuberías, componentes de intercambiadores térmicos, aplicaciones arquitectónicas y estructurales expuestas a atmósferas no marinas.

#### **2.1.4.2 Acero inoxidable Tipo 308L**

El tipo 308L se emplea como metal de aporte predominantemente en aceros inoxidables austeníticos, tales como 301, 302, 304, 305 y en aplicaciones como equipos químicos y petroquímicos, estanques y para aplicaciones a alta temperatura. Los electrodos con dicho material tienen las propiedades de que el depósito es de acero inoxidable austenítico y la escoria se desprende fácilmente, muy buena reanudación del arco.

#### **2.1.4.3. INCONEL 625**

Inconel es una marca de la compañía estadounidense Special Metals Corporation. El Inconel 625 es un acero de aleaciones austeníticas de base níquel-cromo, resistente a la corrosión acuosa, corrosión de rendija, a la oxidación y a picadura en agua de mar. La aleación 625 tiene excelente fuerza de fatiga y resistencia a quebraduras de corrosión de esfuerzo de iones de cloruro. Esta aleación de níquel se puede soldar fácilmente y se usa frecuentemente para soldar AL-6XN. Esta aleación resiste un amplio rango de ambientes corrosivos. Algunas aplicaciones típicas del Inconel 625 son en sistemas de escape de motores de avión, ingeniería marina, equipos de control de polución y reactores nucleares.

Esta aleación puede ser soldada con métodos de soldado manual o automáticos, incluyendo arco con gas tungsteno, arco con gas metal, rayo de electrón y soldadura por resistencia. Muestra buenas características de soldado a sujeción.

### **3. CARACTERÍSTICAS DE SOLDABILIDAD DE LOS ACEROS INOXIDABLES**

Es conveniente repasar el efecto de los diferentes elementos de aleación de los aceros, los cuales determinan según su presencia que estructura metalográfica es más estable a cada rango de temperaturas

En la soldadura de aceros inoxidables debe de tenerse especial atención a que la estructura del metal base, la composición del cordón y la zona afectada por el calor no cambien sustancialmente. Una vez seleccionados los métodos adecuados para que las uniones ofrezcan la mejor ductilidad y resistencia posibles podremos añadir otros materiales para añadir otras cualidades a los aceros y poder emplearlos en una gran variedad de campos diferentes.

Podemos encontrar una infinidad de tipos de aceros inoxidables con características de soldabilidad propias en cada uno de ellos, los más importantes son:

#### **3.1. Aceros austeníticos al cromo-níquel**

Esta aleación es la que presenta mejor aptitud a la soldadura. Permite que se trabaje con ella en todos los procesos de soldadura y genera uniones de excelente calidad dentro de sus propiedades particulares.

### **3.1.1 Propiedades físicas respecto aceros ordinarios al carbono.**

- Propiedades físicas semblantes a las de los aceros ordinarios al carbono.
- Su punto de fusión (1425°C - 1475°C) es más bajo.
- Su resistividad eléctrica es más alta.
- Por tanto se necesita menos calor y, en los procedimientos de soldadura por resistencia, a igualdad de tiempos de soldadura, menor intensidad para soldarlos.
- Tienen una conductividad térmica menor: el calor de soldadura se transmite más lentamente y tiende a localizarse en las proximidades de las juntas de soldadura en una zona más estrecha.
- Su coeficiente de dilatación térmica es aproximadamente un 50% mayor que el del acero ordinario; por consiguiente pueden producirse deformaciones e incitaciones residuales mucho mayores que con el acero dulce.
- Ciertos tipos –los 25 % Cr, 20 % Ni, tienen tendencia a la fisuración en caliente.

### **3.1.2. Propiedades de las uniones soldadas**

En caso de que la soldadura se realice correctamente, las uniones tendrán características mecánicas muy parecidas y, por lo general, idénticas a las del metal base, sin necesidad de precalentamiento ni tratamiento térmico de las soldaduras. La elección del metal de aportación, cuando es necesario, es un factor decisivo para la buena calidad mecánica y la resistencia a la corrosión de la unión.

Sin embargo, para ciertos tipos, la resistencia a la corrosión en una zona próxima a la soldadura puede verse comprometida por el fenómeno de la precipitación de carburos, del que hablaremos a continuación.

### 3.1.3. Precipitación de los carburos

En el proceso de soldadura se aporta al metal grandes cantidades de calor, creando por tanto un gradiente de temperaturas que fluye desde el cordón, el cual alcanza temperaturas de fusión hasta a la temperatura ambiente a la que se encuentre el metal. Por tanto en las proximidades de la zona fundida puede encontrarse una temperatura entre 425°C y 800°C, pudiéndose provocar que el carbono se combine con el cromo que precipita en las uniones de los granos de matriz austenítica.

Este fenómeno de precipitación de carbonos produce un empobrecimiento en cromo de las uniones de los granos, pudiendo reducirse por tanto significativamente la capacidad de la resistencia a la corrosión. Dicha pérdida es más acusada cuanto más tiempo se mantenga la zona afectada entre el campo de temperaturas de sensibilización (425°C - 800°C) y cuanto mayor sea el contenido en carbono.

Existen algunos aceros a los que no afectan tanto este fenómeno, como los aceros con contenido máximo en carbono del 0.030% en el que el fenómeno es casi inexistente y los llamados aceros estabilizados que poseen una adición de titanio y niobio, elementos que se afinan con el carbono creando carburos estables y sin alterar el contenido en cromo del acero.

En el caso de los aceros ordinarios los efectos de la precipitación de carburos pueden limitarse parcialmente escogiendo un procedimiento de soldadura adecuado a las condiciones de servicio y mediante una técnica correcta, lo más adecuado es a una intensidad media, una velocidad constante e intentar realizar el cordón de una única pasada. Para condiciones de servicio en ambientes corrosivos, será necesario realizar un tratamiento de hipertemplado clásico del conjunto de la pieza soldada.

### **3.2. Aceros ferríticos al cromo**

Los aceros ferríticos al cromo poseen unas propiedades físicas similares al acero dulce particularmente comparten su coeficiente de dilatación lo cual permite una menor deformación en el proceso de soldadura. Estos aceros se pueden soldar mediante todos los procedimientos clásicos.

En este caso el calor de la soldadura produce un *engrosamiento muy rápido de grano* en las proximidades de la soldadura, un fenómeno que no es posible revertir por tratamiento térmico debido a que el metal no posee punto de transformación. Provocando que las uniones soldadas con este acero tienden *a ser irremediablemente frágiles*.

Sin embargo, algunas técnicas de soldeo en las que la fusión está acompañada de un forjado en caliente (soldaduras por resistencia por puntos y soldaduras por roldanas sobre todo) permiten limitar el agrandamiento de grano. No obstante, dichas uniones no podrán soportar grandes cargas ni esfuerzos mecánicos de importancia.

En los procedimientos de soldadura por fusión, puede mejorarse en general la ductilidad de la unión utilizando una varilla suplementaria austenítica. Por el contrario, debe prescindirse de esta varilla si, en servicio, la obra soldada va a estar sometida a tensiones térmicas.

### **3.3 Aceros martensíticos al cromo**

Los aceros corrientes de esta clase son los de 13 % de cromo con contenido en carbono superior a 0,10 %. Estos aceros, en el enfriamiento desde la temperatura de soldadura, endurecen por templado martensítico; la dureza aumenta -y por tanto la tendencia a la figuración en servicio, por la falta de ductilidad, aumenta.- con el contenido en carbono

#### **4. RECOMENDACIONES DE CARÁCTER GENERAL PARA LOS PROCEDIMIENTOS DE SOLDADURA POR FUSION**

Tanto los aceros inoxidable como los aceros al carbono se sueldan mediante las mismas técnicas, el factor diferencial será el tipo de material que se emplee como aporte en la unión soldada. Hay que pretender que las uniones soldadas posean las mismas características que el metal base que se está soldando, para ello es necesario elegir correctamente el material de aporte, además de adaptar las técnicas de soldeo teniendo en cuenta las propiedades físicas, químicas y metalúrgicas particulares del metal.

##### **4.1. Preparación de los bordes de las piezas a unir**

Para la unión de componentes y estructuras metálicas, existe la necesidad de preparar los bordes y terminaciones que van a ser soldadas para obtener unos resultados óptimos de funcionamiento de la unión soldada.

Los bordes a unir mediante soldadura se limpiarán cuidadosamente eliminando toda la herrumbre o suciedad, y en especial las manchas de grasa y pintura. En aplicaciones de construcción civil y obras exteriores se procurará que durante el soldeo se mantengan bien secos y protegidos de la lluvia tanto los bordes de la costura como las piezas a soldar. Se tomarán las debidas precauciones para proteger los trabajos de soldeo contra el viento y en especial contra el frío, no realizándose ninguna soldadura cuando la temperatura ambiente descienda de cero grados (0°C).

Cabe decir que, si el espesor de las piezas es menor de 6 milímetros, puede no ser necesario hacer ningún tipo de preparación previa a la soldadura de los bordes.

#### 4.1.1. Precisión en el corte de las piezas a unir

Es esencial la precisión en el corte de las piezas a unir para procurar el ajuste perfecto, de dicha manera se obtendrán cordones uniformes y se reducirán al máximo los riesgos de deformación de las piezas durante la soldadura.

Hay que tener en cuenta que la perfección requerida para el ajuste varía en gran medida dependiendo del procedimiento de soldadura que se adopte, en nuestro caso será una soldadura a tope cuadrada.

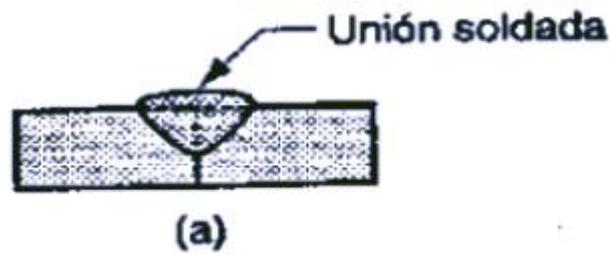


Figura 2. Representación soldadura a tope cuadrada  
(“www.feandalucia.ccoo.es”)

En este caso, el procedimiento que emplearemos será el TIG (Tungsten Inert Gas), el cual es el más idóneo para los espesores de chapas con los que se ha trabajado (1.5mm), será necesario una gran precisión en el ajuste de las piezas para garantizar que ambas absorben la misma energía y se funden por igual. En caso de que el ajuste sea incorrecto se fundirá solo uno de los bordes, el que absorba mayor energía, y no se generará una soldadura de calidad, con el posible de riesgo agujerear la pieza.

Para mejorar el ajuste en la fase de la soldadura es aconsejable mantener la separación de las piezas durante el punteado mediante elementos de fijación y puntear ambas piezas a unas distancias equitativas con una intensidad regulada.

#### **4.1.2. Prevención contra la contaminación de la soldadura**

El corte de las piezas a soldar puede realizarse mediante diferentes procedimientos, en los casos en los que se realice con una radial o amoladora, es recomendable igualar los bordes en caso de que sea necesario y finalmente eliminar los óxidos que se puedan haber generado mediante un proceso de lijado.

Es necesario preparar convenientemente los bordes de las chapas a soldar antes de realizar el proceso de soldadura, dicha preparación engloba el decapado de los mismos y limpiar los aceites y grasas próximos a la zona de soldeo así se garantiza que los bordes estén limpios y libres de todo agente corrosivo que pueda incrustarse en el cordón o generar poros.

El zinc es un componente que puede producir problemas de fisuración en la soldadura de los aceros al Cr-Ni, por lo que es necesario eliminar dichas partículas, así como todas las de acero ordinario y óxido. Por otra parte debe evitarse emplear útiles que hayan sido usados para trabajos con otros tipos de metales, concretamente los que han sido usados con aceros galvanizados, debido a que pueden contaminar el acero inoxidable y provocar dificultades en la soldadura. Por lo que es conveniente reservar un juego de herramientas destinadas exclusivamente para las piezas de acero inoxidable.

En todo proceso de soldadura se recomienda puntar previamente las piezas a unir, una vez realizado este proceso es necesario eliminar la escoria generada, para evitar que dicha escoria se aloje en el cordón final de soldadura continuo. Para eliminar dicha escoria se deben utilizar cepillos de acero inoxidable.

Por último, hay que procurar los elementos que se utilizan, incluidos los electrodos, estén en unas condiciones idóneas.

#### **4.2. Factores metalúrgicos que condicionan la elección del procedimiento de soldadura en los aceros inoxidables.**

A lo largo del proceso de soldadura ocurre la fusión del material que se quiere unir y su posterior solidificación. Dichos cambios de estado se producen en tiempos muy cortos, afectando a la microestructura de los aceros y modificando las propiedades físicas, mecánicas y químicas. Por dichos motivos debemos escoger un procedimiento de soldadura adecuado en el cual controlar las variables de soldeo y establecer los límites operativos que permitan obtener soldaduras sanas, que puedan soportar los requerimientos mecánicos y demandas extremas del servicio en su vida útil.

Existen varios procedimientos adecuados para el soldeo de aceros inoxidables, centrándonos en los más comunes podríamos afirmar que los más usuales en la industria son los procedimientos de soldadura por fusión en atmósfera protegida con gas inerte, es decir TIG y MIG-MAG. Destacar también otro tipo, la soldadura por arco manual con electrodo revestido.

Por lo tanto, entre el amplio abanico de posibilidades que se dispone, deberá escogerse el procedimiento más acorde a las condiciones de ejecución y propiedades a conseguir.

Los factores que determinan la elección del proceso más idóneo son:

- El tipo de unión a realizar: forma de la unión y características de servicio.
- El espesor de las piezas a unir.
- El tipo (o tipos) de material de las piezas a soldar.

Todos los procedimientos deberán satisfacer las siguientes reglas:

- a) Buena *protección del baño contra la oxidación*, ya que ésta, al tiempo que origina una pérdida de cromo, tendría como consecuencia:
- Disminución de las características resistentes a la corrosión.
  - Alteración las propiedades físicas y mecánicas del metal.
- b) *Garantía contra la inclusión de carbono* en la soldadura, ya que dicho elemento puede llegar a combinarse con el cromo, debido a las altas temperaturas que se llegan a alcanzar en la soldadura, produciendo que se formasen carburos de cromo en las uniones de los granos, empobreciendo por lo tanto el contenido de cromo del metal. Por dicho motivo, hay que excluir los electrodos de carbono y los electrodos revestidos con contenido en carbono superior al 0,03 %.
- c) *Control del régimen térmico* de forma que:
- En el caso de los aceros inoxidables ferríticos con un contenido del 13 % al 17 % de cromo, se limite el agrandamiento de grano.
  - Para todos los tipos de acero inoxidables que no tengan un contenido en carbono muy bajo (<0,03 %) o que no estén estabilizados, se limite la precipitación de los carburos.

Destacar que es recomendable limitar la aportación de calor y favorecer la evacuación del mismo en el proceso de soldadura, debido a que el régimen térmico influye en las deformaciones que se generan en las chapas, así como en las tensiones residuales que pueden generarse.

Se recomienda emplear un agente de refrigeración *previamente* a la realización de la soldadura para evitar la precipitación de carburos y el agrandamiento de grano. Hay que tener en cuenta que el agrandamiento de grano genera una fragilización del material en las inmediaciones de la soldadura. Por otra parte, cabe destacar que la precipitación de los carburos generados se produce durante la misma fusión, con lo que la post refrigeración no sería útil.

### 4.3. Como prevenir las deformaciones

Los **aceros inoxidables al cromo** de tipo ferrítico y martensítico, tienen la mitad de conductividad que los aceros dulces y sus coeficientes de dilatación son solo un 10 % aproximadamente inferior. Por el hecho de que estos aceros difieran tan poco del acero dulce, podremos tener en cuenta los criterios de soldadura dulce para la realización de un trabajo u obra.

Es necesario tener en cuenta que la baja conductividad térmica puede causar deformaciones en las uniones de las chapas de espesor reducido. El control de las deformaciones se limitará mediante premontajes a la soldadura apropiados, donde se recomienda, dejar una distancia de separación entre chapas, emplear sargentos de apriete para sujetar las chapas y a ser posible soldar sobre superficies planas

Por otra parte, los **aceros Cr-Ni** tienen una conductividad térmica tres veces menor que la de los aceros dulces y un coeficiente de dilatación superior en un 50 %. Dichas características poseen efectos ventajosos para la soldadura pero habrá que limitar los fenómenos térmicos en la medida que sea posible para limitar las deformaciones y para evitar la fisuración en caliente de las chapas.

Los pasos a seguir, por tanto son:

- a) Alinear los bordes correctamente enfrentados entre sí para conseguir que ambas chapas absorban la misma energía, especialmente en chapas finas. Una vez realizado el alineamiento fijar ambas chapas con sargentos de sujeción.
- b) Una vez realizado el cordón habrá que dejar la fijación hasta que la soldadura se enfríe, de esta manera se evitará que las chapas soldadas se deformen durante el enfriamiento. Cuando no sea posible sujetar las piezas a soldar, se deberá puntear previamente la unión, tomando las precauciones usuales para no comprometer la seguridad ni la penetración del cordón (el procedimiento TIG dará los mejores resultados)
- c) Para casos de soldaduras considerables se puede favorecer la evacuación del calor generado en el proceso de soldadura disponiendo barras de refrigeración a cada lado del cordón. Estas podrían ser de cobre, ya posee una buena difusividad
- d) Al emplear la soldadura por arco, deben evitarse las extinciones del arco, ya que puede producir zonas con falta de penetración.
- e) Soldar a una velocidad continua y rápida, dentro de lo adecuadamente posible, evitando por tanto una excesiva aportación de calor, el sobrecalentamiento de las chapas y posibles riesgos de agujerear el material.
- f) Depositar el material de aporte necesario, ya que un exceso aumenta la cantidad de calor, su posterior contracción y un aumento del coste del proceso.

#### **4.4. Tratamiento térmico posterior de la soldadura**

El tratamiento térmico después de la soldadura consiste en un procedimiento que permite reducir las tensiones residuales, recocer la zona Afectada térmicamente y difundir el Hidrógeno de la zona soldada después de que la unión se haya realizado.

Para ciertos tipos de acero, es indispensable emplear un post tratamiento térmico para:

- Evitar la formación de grietas, en aceros martensíticos con contenido de carbono superior al 0,20%.
- Conseguir que la unión soldada y el metal base posean cualidades homogéneas tras el proceso de soldadura.
- Garantizar una resistencia a la corrosión intergranular semejante a la del metal base tanto en el cordón de soldadura como en las proximidades del mismo, esto se conseguirá mediante una reposición en solución de los carburos precipitados. Especialmente indicado para austeníticos al Cr-Ni, con contenidos en carbono no muy bajos y no estabilizados

El post tratamiento térmico también puede ser útil para:

- Disminuir las tensiones residuales generadas en las uniones soldadas y prevenir riesgos de corrosión bajo tensión en ambientes agresivos.
- Mejorar la ductilidad de la unión en aceros ferríticos (17% Cr), debido a que este tratamiento consigue una disolución de los islotes de martensita que se pueden generar durante el proceso.
- En el caso de los aceros estabilizados, sirve para precipitar los carburos de Titanio o Niobio.

La ejecución de estos tratamientos térmicos debe realizarse bajo una atmosfera protectora. En caso de no proteger la soldadura, se creara una oxidación superficial del metal debiendo de decapar las zonas afectadas. El decapado puede realizarse de varias maneras:

- Inmergir el metal en un baño nítrico seguidamente enjuagar en aguas con un pH próximo a la neutralidad (pH=7).
- En el caso de que se adhiere silicato hidratado de zinc (calamina) al metal soldado, podrá aplicarse antes del baño ácido un baño alcalino. La calamina es fácilmente identificable, ya que es de color blanco o amarillento.

Sin embargo, el post tratamiento térmico puede llegar a originar *deformaciones*, las cuales se pueden evitarse empleando enderezadores provisionales cuyos coeficientes de dilatación sean similares al de las piezas de acero que se están soldando.

#### **4.5. Limpieza y acabado de las uniones soldadas**

Un buen acabado superficial siempre otorga una buena apariencia estética pero su cometido es evitar una posible corrosión en las superficies de unión de las piezas soldadas, por lo que será necesario que una vez finalizado el proceso se amole a ras y se pulan los cordones de forma que estos queden en línea con la superficie de las piezas obteniendo así unas uniones *limpias, pulidas y sin poros*.

Los factores que pueden afectar a la obtención de una unión soldada serán el procedimiento de soldadura escogido, la técnica del operario, la preparación previa del material y la ejecución del proceso. Destacar que el procedimiento TIG, el cual se ha utilizado en este proyecto, es el procedimiento que ofrece las soldaduras más limpias.

a) Pasos a seguir en una **operación de limpieza**:

- Una vez realizado el proceso de soldadura será necesario levantar la escoria. Se realizará con cincel o piqueta en la soldadura con electrodo, o moletear o desbastar el cordón en el caso de la soldadura TIG. Siempre que sea necesario, se deberá limpiar el cordón con un cepillo de acero inoxidable para suavizar la soldadura.
- Retirar las proyecciones de metal que se generan en el proceso de soldadura, puede realizarse por medios mecánicos o químicos.
- Eliminar la coloración y el óxido que se generen en el proceso de soldadura. Si la coloración es ligera o superficial se puede eliminar con arena, proyección de vapor o por decapado con ácido nítrico. Si el óxido o la coloración que se genera es intensa, se eliminarán con un chorro de arena o moleteo, seguido de un decapado ácido, ya sea líquido o en pasta. Para limpiar el óxido de nuestras probetas se realizó con gelatina decapante para aceros inoxidables.

b) Pasos a seguir para obtener un buen acabado:

- Preparar los bordes que se van a soldar. En el caso de soldadura de chapas pulidas con extremos libre, se cortarán las chapas con cizalla por el reverso y se soldarán por dicha cara. Así se consigue que las rebabas sobresalgan por el lado de la cara pulida, asegurando una penetración total en condiciones de trabajo adecuadas.
- Alinear bien las piezas a soldar y dejar el espacio necesario.
- Aportar solo el material necesario.
- Mantener una atmosfera protectora.

#### **4.6. Ensayos en soldaduras**

Previamente a un proceso de soldadura es posible realizar ensayos previos a la soldadura final. Estos podrán orientarnos en la elección del mejor procedimiento o la mejor estrategia para abordar las uniones aunque el uso más habitual de los ensayos es para obtener la puesta a punto de la regulación de un trabajo específico.

En caso de que una unión sea crítica o forme parte de una obra importante, se deberán realizar ensayos destructivos que certifiquen que es válido su dimensionamiento, frente a los diferentes factores que puedan afectar al mismo. Debido a que estos ensayos son destructivos será conveniente realizarlos sobre prototipos.

Los ensayos que pueden llevarse a cabo son:

- Ensayos de tracción estática.
- Medida de la dureza, ensayos de plegado y medida de la resiliencia.
- Ensayos de flexión rotativa, flexión alternada o flexo-compresión.
- Ensayos de corrosión intergranular, sobre todo, para aceros austeníticos.

Para nuestro estudio se han realizado los siguientes ensayos:

- Ensayos de tracción de probetas de diferentes espesores para obtener el límite elástico.
- Corrosión húmeda de las probetas, tanto laminadas como sin laminar.
- Corrosión húmeda de probetas sin deformar traccionadas a tensiones superiores al límite elástico.

El objetivo es estudiar la influencia de las tensiones residuales en las uniones soldadas. Como agente corrosivo se ha empleado cloruro férrico al 20%.

## **5. PROCESOS DE SOLDADURA**

### **5.1. Introducción**

La soldadura es un proceso que consiste en la fijación de dos o más piezas metálicas, dicha unión se consigue al fundir los bordes de contacto de las piezas gracias a un aporte de energía en forma de calor. La unión puede ser con o sin aporte de material. En el caso de que la soldadura se realice con aportación de material, se deberá tratar que este posea características mecánicas y estructurales similares a las de metal base, de tal modo que la unión soporte los esfuerzos que pueda requerir su función.

Para realizar correctamente la unión soldada será necesario que el metal base se funda entre sí, en caso de utilizar un metal de aporte, este también debería de fundirse, de modo que se produzca una mezcla de ambos metales en fase líquida.

Las características que debe de tener un cordón de soldadura son ser continuo, homogéneo y que se consiga una buena penetración, es decir que la fundición cubra todo el espesor de los bordes de unión. Se deberá garantizar que la adherencia entre el metal base y el metal de aporte sea mayor que las fuerzas de cohesión entre los átomos del material de aporte. Además, normalmente, los metales de aportación tienen un punto de fusión menor que el metal base.

Sin embargo, se deberán de controlar los efectos secundarios derivados del calor que se aporta en el proceso de soldadura. El cual puede producir cambios en la estructura y en la composición química de los metales de las piezas soldadas

Para prevenir efectos secundarios en el metal por el calor aportado, se puede precalentar la unión antes del proceso de soldeo. Otra alternativa sería someterlas a un post tratamiento térmico. En lo que concierne a las deformaciones, una forma de reducirlas es fijando las piezas antes del proceso de soldadura y dejándolas así hasta que estas hayan enfriado. En nuestro ensayo se realizó tanto un precalentamiento de la unión como la fijación de las piezas.

Con el post tratamiento térmico, además de combatir los efectos mencionados anteriormente, también se consigue eliminar las tensiones residuales que se originan tanto en el cordón como en las zonas afectadas térmicamente (ZAT) de las piezas.

## **5.2. Tipos de soldadura**

En primer lugar podemos clasificar una soldadura en dos grandes grupos, en función de si esta es homogénea o heterogénea. Lo cual dependerá de los materiales base o del metal de aporte si es el caso.

- *Soldadura heterogénea.* Proceso de soldadura de materiales de distinta naturaleza. Con o sin metal de aportación, o, entre metales base iguales, pero con distinto metal de aportación. Puede ser blanda o fuerte.
- *Soldadura homogénea.* Proceso en que los materiales base que se sueldan y el metal de aportación, si lo hay, son de la misma naturaleza. Puede ser oxiacetilénica, eléctrica (por arco voltaico o por resistencia), etc. En caso de que no haya metal de aportación, las soldaduras homogéneas se denominan autógenas.

En el siguiente esquema se muestran los procesos de soldadura más importantes y cómo se clasifican, siendo objeto de estudio en este trabajo la soldadura por arco eléctrico:

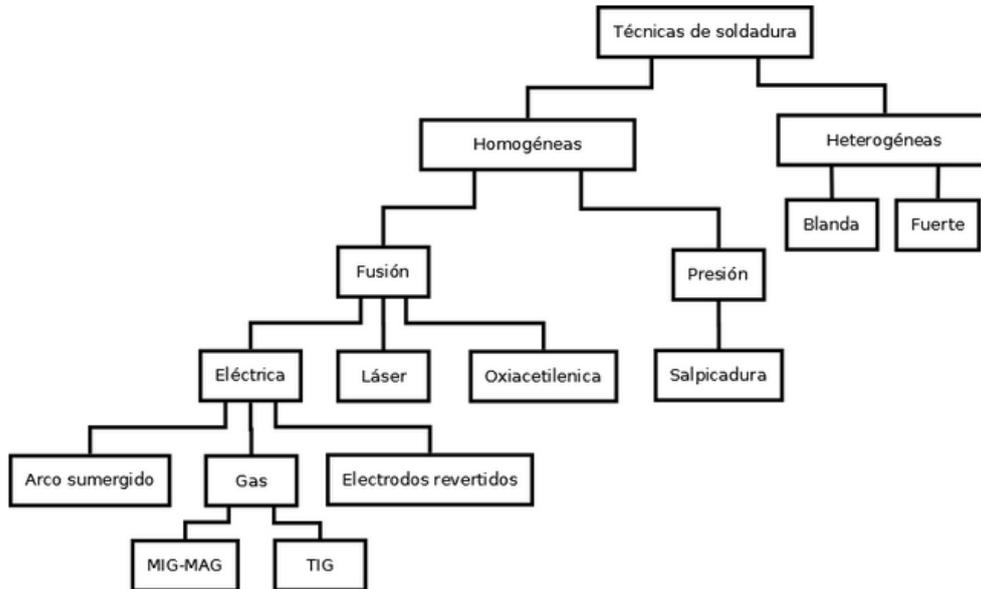


Figura 3. Representación soldadura a tope cuadrada  
(“www.textfire.net”)

### 5.2.1. Soldadura por arco eléctrico con electrodos revestidos

El soldeo por arco con electrodos revestidos es un proceso en el cual la fusión del metal se produce debido al calor generado por un arco eléctrico establecido entre el extremo de un electrodo y el metal base de la unión a soldar.

El electrodo está formado por una varilla metálica denominada alma, la cual está recubierta con un revestimiento de sustancias no metálicas cuya composición química puede ser muy variada. El propósito del alma será proveer el metal de aportación necesario y su recubrimiento protegerá el cordón mediante su descomposición en forma de gases y escoria líquida, presentes en el baño de fusión que posteriormente se solidificará.

Comportamiento de la soldadura TIG en acero inoxidable 304L con varilla 308L e Inconel 625 frente a corrosión bajo tensión.

El proceso de soldadura por arco provoca una temperatura aproximada de 3500 grados en la punta del electrodo, dicho calor funde el metal base y el electrodo revestido, este proceso genera un baño de fusión el cual va solidificando a medida que el electrodo avanza a lo largo de la junta .Creando finalmente una única pieza resistente.

Para poder generar el arco eléctrico se requiere una diferencia de potencial entre el electrodo y la pieza a soldar, esto se consigue poniendo en contacto los polos opuestos de un generador. En este punto se ioniza el aire entre ambas superficies y se vuelve conductor generándose por tanto el arco el eléctrico y cerrándose el circuito, lo cual permite que al separar ligeramente los polos se mantenga el paso de la corriente eléctrica entre el electrodo y el metal base.

Es uno de los procesos más utilizados, debido a que es de reducido coste y aplicable a una gran variedad de metales. Indicado para soldaduras de producción, trabajos de mantenimiento y reparación, así como en construcciones de campo por su facilidad de transporte.

### 5.2.1.1. Campo de aplicación

El proceso de soldadura por arco eléctrico con electrodos revestidos es utilizado preferentemente entre aplicaciones con espesores entre 3 y 38 mm. En caso de espesores inferiores son más recomendables otros procedimientos de soldadura, concretamente la TIG, ya que el arco no genera un calor tan intenso y no se corre el riesgo de perforar la chapa.

Actualmente este proceso se realiza casi siempre en operaciones manuales por ser un procedimiento manejable y de bajo coste. Sin embargo en la industria para procesos automáticos o semiautomáticos lo más recomendable son otros procedimientos tales como el MIG (alambre de electrodo fusible bajo argón) o el de arco sumergido, lo cuales dan buenos resultados a un menor coste.

### 5.2.1.2. Elementos

Los elementos más importantes de la soldadura por arco eléctrico son:

- **Plasma:** Está considerado como el cuarto estado de agregación de la materia y es similar al estado gaseoso. Está formado por electrones que transportan la corriente y que circulan del polo negativo al positivo, de iones metálicos que van del polo positivo al negativo, de átomos gaseosos que se van ionizando y estabilizándose conforme pierden o ganan electrones, y de productos de la fusión tales como vapores que ayudarán a la formación de una atmósfera protectora. Esta zona alcanza la mayor temperatura del proceso.
- **Llama:** Es la zona que envuelve al plasma y presenta menor temperatura que éste, está formada por átomos que se disocian y recombinan desprendiendo calor por la combustión del revestimiento del electrodo. Otorga al arco eléctrico su forma cónica.
- **Baño de fusión:** La acción calorífica del arco provoca la fusión del material, donde parte de éste se mezcla con el material de aportación del electrodo, provocando la soldadura de las piezas una vez solidificado.

- **Cráter:** Surco producido por el calentamiento del metal. Su forma y profundidad vendrán dadas por el poder de penetración del electrodo.
- **Cordón de soldadura:** Está constituido por el metal base y el material de aportación del electrodo, se pueden diferenciar dos partes; la escoria, compuesta por impurezas que son segregadas durante la solidificación y que posteriormente son eliminadas, y el sobre espesor, formado por la parte útil del material de aportación y parte del metal base, que es lo que compone la soldadura en sí.
- **Electrodo:** Son varillas metálicas preparadas para servir como polo del circuito; en su extremo se genera el arco eléctrico. En algunos casos, sirven también como material fundente. La varilla metálica a menudo va recubierta por una combinación de materiales que varían de un electrodo a otro. El recubrimiento de los electrodos tiene varias funciones, éstas pueden resumirse en:
  - Función eléctrica del recubrimiento
  - Función física de la escoria
  - Función metalúrgica del recubrimiento

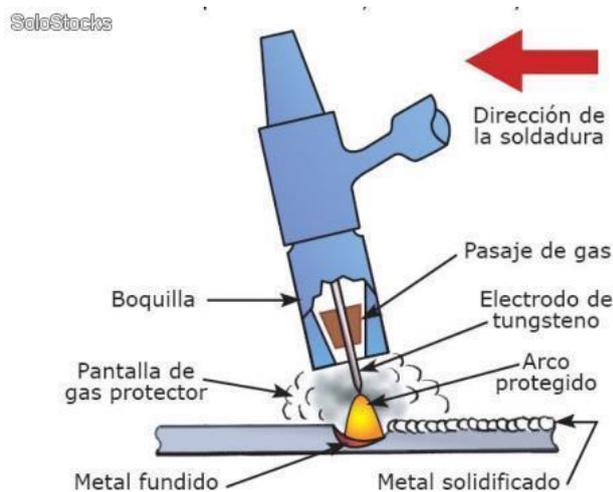


Figura 4. Representación proceso soldadura TIG

(“<http://luisportillaeafe.blogspot.com>”)

### 5.2.1.3. Intensidad de la corriente

Estos equipos pueden emplear corriente continua o corriente alterna. La corriente continua es la que permite una selección más amplia de electrodos y escalas de corriente con una mayor estabilidad del arco, por lo que suele ser preferible en trabajos de difícil acceso y chapas de bajo espesor. Si utilizamos corriente continua se puede diferenciar entre conectar el electrodo al terminal negativo y la pieza al positivo (polaridad directa) o bien conectar el electrodo al terminal positivo y la pieza al negativo (polaridad inversa).

Lo más habitual es que se trabaje con **polaridad directa** (la pieza al positivo y el electrodo al negativo). Dicha conexión permite obtener mayor temperatura en la pieza que en el hilo, debido a que los electrones siempre van de polo negativo al positivo. Obteniendo por tanto dos tercios del calor generado en el polo positivo y el restante en el polo negativo.

El otro tipo de polaridad, la inversa, permite la obtención en general de un baño relativamente ancho, con poca penetración, consiguiéndose una mayor velocidad de fusión del electrodo.

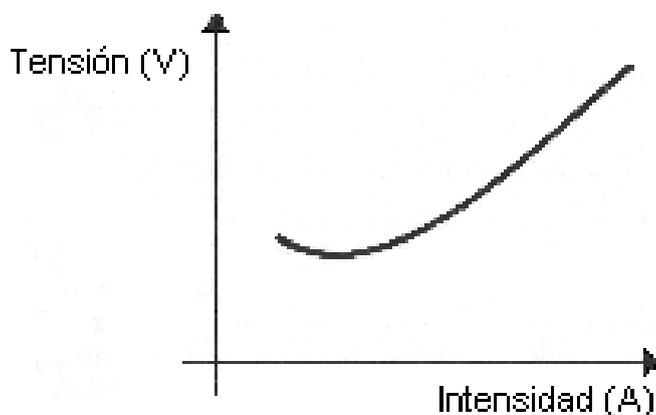
En resumen, el electrodo conectado al polo positivo (polaridad invertida) permite una menor penetración y el electrodo conectado al negativo (polaridad directa) da una mayor velocidad de fusión del metal base. En cambio los componentes químicos del revestimiento del electrodo pueden variar los efectos de la polaridad, por lo que es recomendable seguir las instrucciones del fabricante para conectar el electrodo correctamente, ya sea al polo positivo o negativo.

#### 5.2.1.4. Características del arco eléctrico

Recordemos que el arco eléctrico o arco voltaico es un fenómeno físico producido por el paso de una corriente eléctrica a través de una masa gaseosa (ionización) lo cual produce una gran temperatura.

La longitud del arco viene definida por la distancia entre los extremos por donde circula la corriente eléctrica, siendo en soldadura la distancia desde el extremo del electrodo a la superficie de metal a soldar. Como referencia dicha longitud debe ser similar a la del diámetro del electrodo excepto en los electrodos de contacto en los cuales la longitud del arco es nula.

Puede considerarse el arco eléctrico como un conductor gaseoso, por lo que existe una relación entre la intensidad y el voltaje. Dicha relación se denomina **característica del arco** y se representa en la Figura 4.



*Figura 5. Curva característica del arco eléctrico*

Comportamiento de la soldadura TIG en acero inoxidable 304L con varilla 308L e Inconel 625 frente a corrosión bajo tensión.

La curva característica depende de muchas variables, entre ellas está el tamaño y naturaleza del cátodo y del ánodo, del tipo de protección del electrodo (gas o revestimiento) y de la longitud del arco.

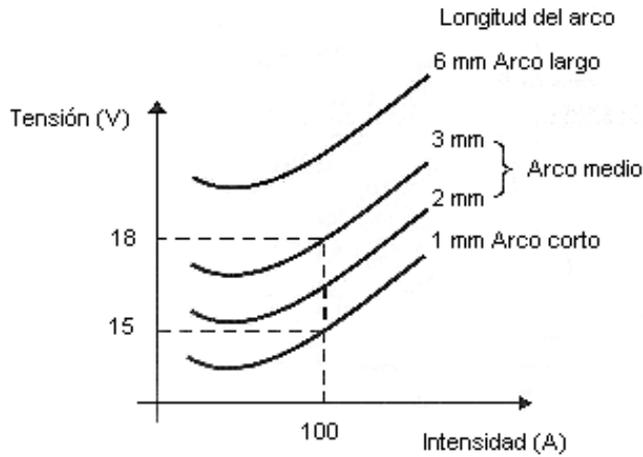


Figura 6. Características del arco para diferentes longitudes de arco

En la Figura 6 se puede observar las curvas V – I para distintas longitudes de arco. A partir de esta figura se puede deducir que, para una misma intensidad, la tensión aumenta con la longitud del arco.

### 5.2.1.5. Técnica operatoria

Para soldaduras manuales, en primer lugar es necesario retirar parte del revestimiento del inicio del electrodo. Para que el alma del mismo pueda entrar en contacto con el metal a soldar.

Para establecer el arco, se frota ligeramente el electrodo sobre la superficie a soldar, produciéndose por tanto el cebado por lo que habrá que retirar rápidamente el electrodo a una distancia en la que se mantenga el arco y que evite que el electrodo se pegue a la pieza.

En este punto el objetivo a conseguir es que la distancia del arco sea tan corta como sea posible, reduciendo así riesgos de oxidación y posibles poros. Además un arco largo genera inestabilidad en el mismo y da lugar a proyecciones.

El desplazamiento del electrodo sobre la superficie a soldar puede ser mediante un movimiento rectilíneo o con un ligero zigzag en caso de que la superficie a abarcar sea mayor. Para piezas con un espesor considerable, se deberán de preparar los bordes mediante chaflanes, los cuales deberán ser rellenados con el número debido de pasadas, variando el diámetro de los electrodos.

Cuando se interrumpa la soldadura y por tanto se apague el arco (electrodo gastado, o fin de pasada), deberá de aproximarse el electrodo al baño para retroceder sobre el cordón que se está soldando, con el objetivo de reducir el cráter terminal. Tras cada cambio de electrodo o después de cada pasada, se debe retirar la escoria para evitar las inclusiones de escoria y los poros con un martillo de soldador. En cada comienzo, después un cambio de electrodo, cebar el electrodo sobre el cráter anterior del cordón.

#### **5.2.1.6. Electrodo de soldadura**

El electrodo es una parte fundamental de la soldadura el cual permite hacer de borne necesario para cerrar el circuito del generador y generar la energía eléctrica necesaria para crear el arco de plasma, y además aporta el metal de aportación.

Existen electrodo revestidos y sin revestimiento. Los electrodos sin revestimiento están formados por un alambre trefilado o laminado, el cual solo puede ser utilizado en procesos en los cuales exista una protección externa para impedir la acción del Oxígeno y del Nitrógeno. En la parte práctica el cordón resultante suele ser desigual, poroso y con características resistentes mejorables.

Los electrodos revestidos están formados por un núcleo metálico (alma), un revestimiento a base de sustancias químicas y un extremo no revestido para poder fijarlo en el portaelectrodos. Cada elemento realiza una función, ya sea durante la fusión o la solidificación.

**El revestimiento** tiene las siguientes funciones:

- Dirige y estabiliza el arco conduciendo a una fusión equilibrada y uniforme.
- Genera gases los cuales actúan como protección evitando el acceso del Oxígeno y el Nitrógeno.
- Produce una escoria la cual cubre el metal de aporte, evitando el enfriamiento brusco y también el contacto del Oxígeno y del Nitrógeno.
- Contiene determinados elementos para obtener una buena fusión con los distintos tipos de materiales.
- Aporta al baño de fusión elementos químicos que darán al metal depositado las distintas características para las cuáles fue formulado

### 5.2.1.7. Clasificación de los electrodos en función del tipo de revestimiento

Uno de los principales criterios a tener en cuenta para diferenciar los diferentes tipos de electrodos es el tipo de recubrimiento. Existen cinco tipos:

**Revestimiento ácido:** Su composición química se basa en óxidos de hierro y en aleaciones ferrosas de manganeso y silicio. Su aplicación se centra fundamentalmente en aceros de bajo contenido en carbono, azufre y fósforo. Propiedades a destacar:

- Genera un baño muy fluido.
- Puede utilizarse con intensidades elevadas
- Buena estabilidad del arco, tanto en corriente continua como alterna.
- Indicados para soldar en horizontal.
- Características mecánicas aceptables, aunque de resiliencia baja.
- Puede generar grietas en el cordón, ya que el revestimiento no dota al baño de un poder de limpieza en el metal base, es decir no extraen el azufre y el fósforo como los revestimientos básicos.

Comportamiento de la soldadura TIG en acero inoxidable 304L con varilla 308L e Inconel 625 frente a corrosión bajo tensión.

**Revestimiento de rutilo:** Su composición química es predominada por un alto contenido de rutilo, es decir óxido de titanio, en el revestimiento. Su utilización es recomendada para espesores reducidos y posiciones complicadas, aun así son de los más comunes y utilizados en la industria. Sus principales características son:

- Penetración mediana a baja.
- Arco suave, pueden utilizarse en cualquier posición.
- Soldadura regular, produce buenos acabados.
- Escoria rica, densa y fácilmente extraíble.

**Revestimientos básicos o de bajo hidrógeno:** Están compuestos básicamente por óxidos de hierro, aleaciones ferrosas, carbonato cálcicos y otros carbonatos básicos. Deben presentar ausencia absoluta de humedad en su revestimiento. Son adecuados para aplicaciones de alta responsabilidad, para la soldadura de grandes espesores y alto grado de restricción. Su manejo es algo dificultoso por lo que se recomienda utilizar equipos de corriente continua, debiéndose emplear con un arco muy corto, con intensidades poco elevadas y generalmente se emplea la conexión de polaridad inversa. Sus características principales son:

- Alta ductilidad
- Máxima resistencia en depósitos y grandes estructuras
- Alta resistencia a los impactos a baja temperatura y fisuras
- Genera uniones de calidad radiográfica
- Penetración mediana a alta
- Escoria poco abundante y de difícil eliminación

**Revestimientos celulósicos:** Contienen grandes cantidades de material orgánico, tales como la celulosa que generan cantidades considerables de metal líquido gas protector. Se recomiendan para soldadura circunferencial de tuberías y ejecución de los pases de raíz en general por la buena penetración que consiguen y por la rapidez del trabajo debida a su alta velocidad de fusión. No se recomiendan para el llenado de biseles o soldeo de posiciones planas ya que causa gran cantidad de salpicaduras. Normalmente precisan corriente continua y polaridad directa. Principales características:

- Máxima penetración
- Solidificación rápida
- Buenas características de resistencia, posibilidad de fragilización por hidrogeno
- Elasticidad y ductilidad
- Presentación irregular con salpicaduras y poca escoria.

#### **5.2.1.8. Clasificación de los electrodos en función del espesor del revestimiento**

Otra clasificación de los electrodos revestidos es en función del espesor del revestimiento, se clasifican en electrodos de revestimiento delgado y electrodos de revestimiento grueso.

Los electrodos de revestimiento delgado son aquellos cuya relación entre el diámetro exterior del revestimiento y el diámetro del alma es aproximadamente 1,1. Se caracterizan por aportar ventajas técnicas y económicas en determinados trabajos de reparación y de relleno.

Los electrodos de revestimiento grueso son aquellos cuya relación entre el diámetro exterior del revestimiento y el diámetro del alma es aproximadamente 1,3. Se utilizan en la práctica totalidad de soldaduras.

Los electrodos cuya relación esté entre los dos valores anteriores se denominan electrodos de revestimiento *semigrueso*.

La fabricación de los electrodos se hace, bien por inmersión o bien mediante máquinas de extrusión. Generalmente, los electrodos que emplean revestimiento delgado se recubren por inmersión, y los de revestimiento grueso por extrusión.

Algunos electrodos revestidos pueden presentar defectos como consecuencia de la calidad del alma o del revestimiento. Los defectos pueden variar según el sistema de fabricación. La composición del alma debe poseer una composición constante y exenta de impurezas, por otra parte, el revestimiento podría presentar defectos de fabricación que influyan sobre la calidad de la soldadura.

Por dichos motivos la fabricación de electrodos exige un control muy riguroso y una calidad final relativa a la exigencia de dichos productos.

### **5.2.1.9. Composición de los electrodos:**

Se clasifican los electrodos para soldadura por arco a partir de sus propiedades como metal de aporte. Se deberán de seleccionar en función de la composición química del acero que se vaya a soldar.

Su composición se basa en que el electrodo contenga una mayor cantidad de aleantes que el metal base, lo cual compensará posibles pérdidas de dichos elementos que se puedan producir durante el proceso de soldadura. Añadir también que generalmente los electrodos son de muy bajo contenido en carbono y/o estabilizados con niobio.

Particularmente en algunos casos de soldadura se utilizan electrodos de una composición completamente diferente a la del metal base, por ejemplo:

- Para los aceros al cromo, se mejora la ductilidad de la unión mediante los electrodos compuestos con un 19 % Cr - 10 % Ni.
- Para los aceros austeníticos del tipo 18/13 Mo, pueden elegirse electrodos 20/13 Mo o 25/13 Mo para disminuir los riesgos de figuración (especialmente en espesores grandes), consiguiendo por tanto una estructura en el cordón de soldadura que contenga de un 6 % a un 10 % de ferrita.

### **5.2.2. Soldadura por arco eléctrico con gas protector**

La soldadura por arco eléctrico con gas protector o soldadura de hilo continuo bajo gas protector es un proceso de soldadura por fusión. El calor necesario es generado por un arco que se establece entre un electrodo consumible y el metal a soldar. El electrodo, el arco, el metal fundido y las zonas adyacentes del metal base, quedan protegidas de la contaminación de los gases atmosféricos mediante una corriente de gas que se aporta por la tobera de la pistola, de manera concéntrica al alambre o electrodo.

En este caso de soldadura los electrodos están formados por alambre macizo, desnudo, que se alimenta de forma continua automática o manualmente dependiendo del proceso y que se convierte en el metal de aporte según se consume, realizando la función de electrodo.

Los procesos de soldeo por arco protegidos por gas más comunes son:

- Soldadura bajo gas protector inerte con electrodo no consumible de Tungsteno. TIG (Tungsten Inert Gas).
- Arco metálico y gas inerte. MIG.
- Arco metálico y gas activo. MAG.
- Soldeo por plasma

#### 5.2.2.1 Soldadura MIG – MAG

La soldadura MIG-MAG requiere de una máquina de potencial constante, una antorcha y un mecanismo que alimenta el alambre hacia la unión de los metales. Es requerida la protección de un gas o mezcla de gases. La polaridad recomendada es polaridad invertida, sin embargo deberá consultarse la especificación del electrodo a aplicar.

Distinguiremos en este caso dos procesos de soldadura según la naturaleza del gas de aportación. **Soldadura MIG** (gas inerte) todos sus componentes serán inertes, los más comunes son el **argón (Ar)** y el **helio (He)**. **Soldadura MAG** (gas activo) en la cual los componentes más activos son el **dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)** y **oxígeno (O<sub>2</sub>)**.

Aunque lo más habitual en la industria y que genera los mejores resultados es mezclar ambos tipos de gases, inertes y activos, en diferentes proporciones.

La soldadura MIG puede utilizarse con todos los metales comerciales importantes, como los aceros al carbono, de aleación, inoxidable, el aluminio, magnesio, cobre, hierro, etc. a partir de espesores de 0.5mm y en todas las posiciones. Se caracteriza por ser más productiva que la soldadura por electrodos ya que el uso de metal de portación continuo permite una eficiencia de trabajo entre el 80% y el 95%.

Cabe destacar que el empleo del procedimiento MIG-MAG es cada vez más frecuente en el sector industrial, debido a su alta productividad y facilidad de automatización. Un aspecto importante es su flexibilidad, ya que permite soldar aluminio, cobre, aceros de baja aleación y aceros inoxidables, a partir de espesores de 0,5 mm y en todas las posiciones. Al emplear gas como elemento protector, se consiguen cordones de soldadura continuos y uniformes libres de impurezas y escorias.

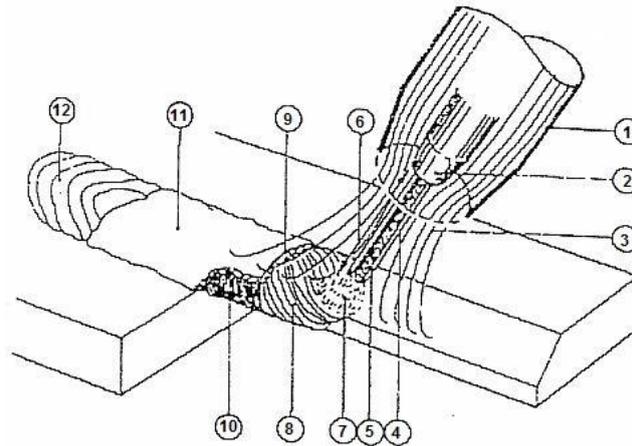


Figura 7. Esquema del proceso de soldadura MIG – MAG  
("www.ingmecanica.com")

- |   |   |
|---|---|
| 1.-Boquilla                             | 7.-Transferencia del metal aportado             |
| 2.-Tubo de contacto                     | 8.-Baño de soldeo y escoria líquida             |
| 3.-Gas de protección                    | 9.-Escoria sólida protegiendo al baño de fusión |
| 4.-Varilla (sólida o tubular)           | 10.-Metal depositado                            |
| 5.-Flux en caso de varilla tubular      | 11.-Escoria solidificada                        |
| 6.-Longitud libre de varilla (stik-out) | 12.-Metal de soldadura solidificado sin escoria |

Comportamiento de la soldadura TIG en acero inoxidable 304L con varilla 308L e Inconel 625 frente a corrosión bajo tensión.

Influencia de los gases en la soldadura:

<b>Metal</b>	<b>Tipo de Soldadura</b>	<b>Gas o Mezcla de Gases</b>	<b>Rasgos sobresalientes / Ventajas</b>
Acero Dulce	Punteada	Argón	Larga duración del electrodo, mejor contorno del cordón, más fácil de establecer el arco inicial
	Manual	Argón	Mejor control del cordón especialmente en soldaduras en posiciones especiales
	Mecanizada	Argón-Helio	Alta velocidad, menos flujo de gas que con Helio
Helio		Más velocidad que la obtenida con Argón	
Aluminio y Magnesio	Manual	Argón	Mejor arranque del arco, mejor acción de limpieza y calidad de soldadura, menos consumo de gas
		Argón-Helio	Más alta velocidad de soldadura, mayor penetración que con Argón
	Mecanizada	Argón-Helio	Buena calidad de soldadura, más bajo flujo de gas requerido que con Helio solo
		Helio DCSP	Más profunda penetración y mayor velocidad de soldadura, puede proveer acción de limpieza para las soldaduras en aluminio y magnesio
Acero Inoxidable	<i>Punteada</i>	Argón	Excelente control de la penetración en materiales de bajo calibre
		Argón-Helio	Más alta entrada de calor para materiales de mayor calibre
	<i>Manual</i>	Argón	Excelente control del cordón, penetración controlada
	<i>Mecanizada</i>	Argón	Excelente control de penetración en materiales de bajo calibre
		Argón-Helio	Más alta entrada de calor, más velocidad de soldadura es posible
		Argón-Hidrogeno (Hasta 35% H <sub>2</sub> )	Minimiza el corte en los bordes del cordón, produce soldaduras de contornos deseables a bajo nivel de corriente, requiere bajo flujo de gas
Cobre, Níquel y Aleaciones Cu-Ni	Manual solamente	Argón	Excelente control del cordón, penetración en materiales de bajo calibre
		Argón-Helio	Alta entrada de calor para compensar la alta disipación térmica de los materiales más pesados
		Helio	Más alta temperatura para sostener más altas velocidades de soldadura en secciones de materiales más pesados
Titanio	Manual Solamente	Argón	Alta densidad del gas provee un escudo más efectivo
		Argón-Helio	Mejor penetración para la soldadura manual de secciones gruesas (se requiere un gas inerte de respaldo para proteger la soldadura de la contaminación)

Figura 8. Tabla para seleccionar el Gas según el proceso y metal a ser aplicado.  
 (“<http://isfime.blogspot.com>”)

### 5.2.2.2. Soldadura TIG

El proceso TIG (Tungsten Inert Gas) establece el arco eléctrico entre un electrodo permanente de tungsteno y la pieza a unir, se requiere de un gas protector inerte como el argón o el helio o una mezcla de ambos. Este proceso permite la obtención de cordones más resistentes, más dúctiles y menos sensibles a la corrosión que en el resto de procedimientos, ya que el gas protector impide el contacto entre el oxígeno de la atmósfera y el baño de fusión. Este proceso ha sido el empleado en este proyecto.

Es un método muy adecuado para soldar una gran variedad de materiales como acero inoxidable, aceros al carbón, aluminio, cobre y aleaciones, etc. Permitiendo soldar en todas las posiciones por lo que es muy recomendable para cañerías. El proceso puede realizarse tanto manual como automáticamente, destaca porque no genera salpicaduras, ni crea escoria y produce cordones de gran calidad. Los rangos de espesor que permite soldar son hasta 6.4 mm, permitiendo cuando sea necesario, aportar material de aporte en forma de varilla. En cambio posee algunos inconvenientes como la necesidad de tener que proporcionar un flujo continuo de gas, una mano de obra especializada por lo que se reserva para uniones con necesidades especiales de acabado superficial y precisión.

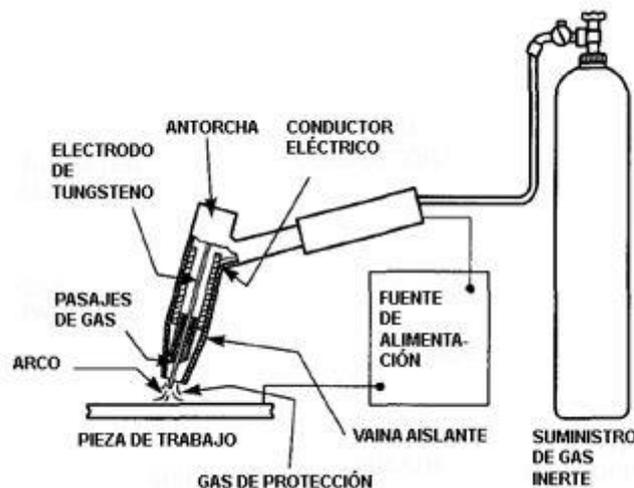


Figura 9. Equipamiento para la soldadura TIG.  
(“<https://sites.google.com>”)

Para proporcionar el calor necesario para la operación de soldadura se requiere un arco de bajo voltaje (16-40 V) y alta intensidad (60-600 A) que se establece entre el electrodo y la pieza de trabajo. Comúnmente se emplea corriente continua, con electrodo negativo. Aunque, para el soldeo de materiales finos, lo más adecuado es emplear la corriente alterna con el fin de evitar agujerear la pieza que se está soldando. La corriente alterna también es útil cuando se sueldan cañerías, en ese caso se empleará este tipo de corriente para realizar las pasadas de raíz. Las fuentes de potencia normalmente cuentan con un dispositivo de encendido de alta frecuencia que permite establecer el arco sin tener que tocar la superficie, de esta manera se evita una posible contaminación del electrodo de tungsteno con partículas metálicas del baño de fusión.

Para la fabricación del electrodo permanente se emplea tungsteno conocido en Europa también como wolframio. Se trata de un material moderadamente común en la corteza terrestre. El tungsteno puro es gris acerado o plateado, extremadamente duro, resistente al desgaste y quebradizo. Posee un punto de fusión más alto que cualquier otro metal (3410°C), el punto de ebullición más alto de todos los elementos conocidos y también la mayor resistencia a la tracción. Es por ello que sus propiedades físicas y químicas hacen que sea muy útil para la fabricación de herramientas muy duras y para componentes y materiales que trabajen a altas temperaturas.

Existen diferentes tipos de aleaciones con tungsteno para poder obtener el resultado óptimo en una soldadura, pudiendo influir estas composiciones en el encendido del arco, su estabilidad y la disminución de la erosión de la punta dando mayor rendimiento y durabilidad.

Comportamiento de la soldadura TIG en acero inoxidable 304L con varilla 308L e Inconel 625 frente a corrosión bajo tensión.

Entre los electrodos más comunes se encuentran los de tungsteno con un 2% de torio, los cuales incrementan las propiedades de la soldadura frente a temperatura y rendimiento, aunque también se emplean electrodos de tungsteno con otras aleaciones como Cerio, Lantano, Zirconio, etc. Los electrodos comerciales presentan una forma cilíndrica en las cuales los diámetros varían desde un diámetro de 0.3 a 6.4 mm, siendo los más comunes los de 1,6; 2,4 y 3,2 mm, aunque la elección del diámetro está directamente relacionada con el amperaje a utilizar. Siendo necesario basarse en una tabla como la que se muestra a continuación:

Ø del Electrodo mm	CC en Amp.		CA en Amp.	
	Polaridad Directa DCEN	Polaridad Inversa DCEP	Onda Desbalan.	Onda Balan.
0,3	0,1 - 15	No Aplicable	0,1 - 15	0,1 - 15
0,5	5 - 20	No Aplicable	5 - 20	5 - 20
1,0	15 - 80	No Aplicable	10 - 80	20 - 60
1,6	70 - 150	10 - 20	70 - 150	60 - 120
2,4	150 - 250	15 - 30	140 - 235	100 - 180
3,2	250 - 400	25 - 40	225 - 325	160 - 250
4,0	400 - 500	40 - 55	300 - 400	200 - 320
4,8	500 - 750	55 - 80	400 - 500	290 - 390
6,4	750 - 1000	80 - 125	500 - 630	340 - 525

Figura 10. Tabla relación diámetro-amperaje para soldadura TIG.

El último factor a destacar del electrodo es la importancia del afilado de su extremo, ya que incide cualitativamente en la calidad de la soldadura. Dicho afilado, normalmente debe estar entre 20° y 25° con el extremo despuntado a 0.25 mm de diámetro. A continuación, se muestra un esquema de diferentes afilados y de sus posibles consecuencias:



Figura 11. Influencia del afilado del electrodo en la calidad de la soldadura.  
("www.pinterest.es")

Las toberas o copas gaseosas utilizadas en el proceso de soldadura TIG vienen en una amplia variedad de tamaños y formas, por lo que es recomendable adaptar la tobera a cada proceso. Los diámetros de copa más pequeñas permiten mantener un arco más estable y ofrecen una mayor visibilidad, en cambio, las copas más grandes ofrecen mejor protección gaseosa.

#### **5.2.2.2.1. Consumibles en soldadura TIG**

Recordar que en los procesos de soldadura MIG (gas inerte) los gases serán inertes, los más comunes son el argón (Ar) y el helio (He) en la Soldadura MAG (gas activo) los más activos son el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y oxígeno (O<sub>2</sub>). En cambio lo más eficiente es mezclar ambos tipos de gases, inertes y activos, en diferentes proporciones.

Para soldar aceros inoxidable en los procesos de TIG se emplea una atmosfera protectora de argón puro, helio o una mezcla de ambos como escudo gaseoso protector. En este caso no es posible mezclar dicha atmosfera con gases activos, ni nitrógeno debido a que deteriorarían rápidamente el electrodo de tungsteno.

En soldaduras manuales y espesores de hasta 1.6 mm, se utiliza el argón como gas inerte debido a que protege la soldadura y permite una buena penetración con una velocidad de flujo menor que la del helio lo que reduce el riesgo de fundir las piezas.

Por otra parte, el helio produce un mayor flujo calorífico y una penetración más profunda, lo cual puede ser una ventaja en algunas operaciones de soldadura automática. Las mezclas de argón helio pueden mejorar el contorno de la soldadura y la mojabilidad.

### **5.3. Seguridad**

#### **5.3.1. Recomendaciones generales sobre soldadura con arco**

Previamente a la realización de cualquier trabajo de soldadura, deben llevarse a cabo unas medidas de protección las cuales aseguren que no exista ningún riesgo, y en caso de que exista tener medidas para minimizarlo.

Será necesario comprobar correctamente el equipo de soldadura, haciendo énfasis a las conexiones de las botellas de gas, mangueras y componentes del sistema como el portaelectrodos. Comprobar que el equipo posee interruptores que permitan desconectar de una manera rápida y fácil el sistema, y comprobar que funcionen correctamente. La alimentación deberá contar con una toma de tierra y deberá estar desconectada siempre que no se esté soldando.

Deberá inspeccionarse la zona de trabajo colindante a la operación del soldeo, debiendo retirar los productos inflamables o que puedan arder, para más protección puede añadirse un panel protector. Dichas operaciones deberán llevarse a cabo en lugares bien ventilados pero sin corrientes de aire que puedan perjudicar la estabilidad del arco eléctrico.

Además se deberá de tener presente en la zona de trabajo elementos apropiados para extinguir posibles incendios, correspondiendo dichos elementos con el riesgo que conlleve la operación que se esté realizando.

### **5.3.2. Equipo de protección personal**

Como se ha comentado previamente la primera tarea antes de ejecutar un trabajo de soldadura será identificar el riesgo del puesto de trabajo, intentar reducirlo y en última instancia recurrir al uso de EPIs.

Los principales riesgos que pueden afectar severamente al operario son el riesgo respiratorio por inhalación de humos y el riesgo ocular. Para evitar inhalar humos será necesario el uso de una mascarilla para humos de soldadura y para evitar riesgos oculares se necesitara una pantalla de soldar con un visor filtrante de grado apropiado, con ello evitaremos que la radiación del arco eléctrico pueda afectar a la retina. Dicha pantalla debe proteger la cara del operario además de sus ojos.

También se necesitará una ropa adecuada para prevenir riesgos de quemaduras y descargas eléctricas. La ropa de trabajo debe ser de pura lana o de algodón ignífugo. Las mangas de la camisa deben ser largas con los puños ceñidos a la muñeca y es conveniente que no lleven bolsillos, en dicho caso deberían poder cerrarse herméticamente. Los pantalones no deben tener dobladillo, pues podrían retener las chispas producidas y por último un calzado de seguridad tipo bota, que sea preferiblemente aislante. El objetivo principal de este conjunto será cubrir todo el cuerpo y no dejar zonas de la piel expuestas, para evitar quemaduras o exposición a las radiaciones.

Por último para trabajos con mayor riesgo podrían utilizarse EPIs como polainas, mandil de cuero, cascos o arnés.

## 6. CARACTERIZACIÓN DE ELECTRODOS Y VARILLAS PARA SOLDADURA

A continuación procederemos a identificar que electrodos y metales de aportación son más idóneos para cada tipo de soldadura.

Lo primero que se debe tener en cuenta en la elección de un electrodo es el tipo de material que se va a soldar, para así poder elegir el más adecuado. Consecuentemente elegiremos el revestimiento del electrodo sabiendo que este funde al mismo tiempo que el núcleo y que su misión es mejorar las propiedades metalúrgicas y la calidad final del cordón de soldadura

Estas son algunas muestras de que electrodos y varillas de aporte se pueden utilizar en los procesos existentes de soldadura:

Soldadura por arco de carbón	Se utiliza un electrodo no consumible de carbón. El metal de aportación se añade mediante una varilla.
Soldadura por soplete	Se unen las piezas mediante fusión según el principio de capilaridad, el metal de aportación puede aportarse en forma de varilla o de un material fundible interpuesto entre los componentes.
Soldadura por arco manual	Se utiliza un electrodo ,el cual atribuye el metal de aportación
Soldadura TIG	Se utiliza un electrodo no consumible de tungsteno. El metal de aportación se añade mediante una varilla.
Soldadura MIG	Se utiliza un electrodo consumible. Viene en forma de alambre y es aportado continuamente. Dicho alambre se puede considerar como electrodo y metal de aportación.
Soldadura con arco sumergido	El alambre que se alimenta continuamente es a la vez el electrodo y el metal de aportación.
Soldadura por haz electrónico	No emplea metal de aporte.

Figura 12. Tabla de tipos de soldadura y tipos de electrodo empleado.

### **6.1. Electrodo no consumibles**

El objetivo de los electrodos no consumibles es el de mantener el arco, sin necesidad de tener que aportar material al baño de fusión. Dicho electrodo sufre un desgaste debido al calor intenso del arco el cual produce una erosión constante del material y deforma continuamente el electrodo, por dicho motivo en una conexión de CC será recomendable conectar el electrodo al polo negativo y que se reduzca el calor generado. Además, electrodos como el de Tungsteno necesitan afilarse constantemente por lo que pierden material.

Podemos encontrar electrodos no consumibles de diferentes materiales entre ellos encontraremos el carbono, el volframio y el tungsteno. Los cuales tienen un punto de fusión por encima de los 3200 grados. En este proyecto se ha realizado la soldadura TIG con electrodo de tungsteno y varillas de metal de aporte de acero inoxidable e Inconel.

Debido a que en el punto 5.2.2.1 Soldadura TIG, ya se ha descrito el electrodo de Tungsteno y sus propiedades, veamos directamente las propiedades de las varillas de aporte utilizadas.

## **6.2. Varillas aporte de acero inoxidable**

Las varillas de aporte son como el alma de un electrodo pero sin revestimiento, estas varillas deben ser de un material de igual o mejor calidad que el metal de soldar lo cual compensará pérdidas de propiedades producidas por la fusión. La finalidad de estas varillas de acero inoxidable austeníticas será la unión de aceros inoxidables al carbono y aceros de baja aleación.

Estas varillas poseen un alto contenido de níquel, el cual permite estabilizar la ductilidad y tenacidad de la fase austenítica a temperatura ambiente, evitando que se presente el peligro de la fragilización del cordón.

Las varillas de la serie 300 tienen tendencia al agrietamiento en algunas circunstancias, por lo que será necesario depositar un porcentaje de ferrita en el cordón para solucionar dicho problema. Lo cual se consigue ajustando la composición de la varilla.

Las varillas 308 tienen gran versatilidad, permiten unir tipos comunes de acero inoxidable, tales como el 301, 302, 304, 305. En caso de que se precise una soldadura dúctil, se emplean para unir otros tipos como el 201, 202 y los aceros martensíticos 403, 410 y 420. Los tipos de varilla 316 y 316L se utilizan con metales base del mismo tipo.

Las varillas utilizadas en este proyecto correspondientes a la familia de aceros inoxidables es el tipo 308L, la cual tiene la característica de poseer un bajo contenido en carbono reduciendo la precipitación de carburos de cromo en el borde de grano.

Comportamiento de la soldadura TIG en acero inoxidable 304L con varilla 308L e Inconel 625 frente a corrosión bajo tensión.

Composiciones del metal depositado aportado por las varillas de aporte de acero inoxidable:

Varilla	Metal depositado (%)						
	C	Cr	Ni	Mn	Si	Nb - Ta	Mo
308	0,08	18-21	9-11	2,50	0,90		
308L	0,04	18-21	9-11	2,50	0,90		
309	0,15	22-25	12-14	2,50	0,90		
309 Nb	0,12	22-25	12-14	2,50	0,90	0,7-1,0	
310	0,20	25-28	20-22	2,50	0,75		
310 Mo	0,12	25-28	20-22	2,50	0,75		2,0-3,0
316	0,08	17-20	11-14	2,50	0,90		2,0-2,5
316L	0,04	17-20	11-14	2,50	0,90		2,0-2,5
318	0,08	20	11-14	2,50	0,90	0,80	2,0-2,5
347	0,08	18-20	9-11	2,50	0,90	1,0	
410	0,10	11-13		1,00	0,60		0,5
430	0,10	15,8	0,6	1,00	0,90		
502	0,10	4-6		0,75	0,75		0,5

Figura 13. Composición típica de las varillas de acero inoxidable más comunes.

### 6.3. Diagrama de Schaeffler

Una vez finalizada una unión existe el problema de que se desconocen exactamente las características mecánicas del cordón de soldadura realizado, esto es debido a que no se sabe con precisión la estructura final del metal base, del material de soldadura o del depósito soldado. Para ello se creó el Diagrama de Schaeffler, para el cual necesitaremos conocer la composición química de los materiales involucrados.

Partiendo de que ningún cordón de acero inoxidable tiene una estructura que sea completamente ferrítica, martensítica o autenítica. Distinguiremos dos conceptos para agrupar elementos Cromo-equivalente y Níquel-equivalente.

Comportamiento de la soldadura TIG en acero inoxidable 304L con varilla 308L e Inconel 625 frente a corrosión bajo tensión.

El primer grupo, los Cromo-equivalente agrupan elementos formadores de ferrita también conocidos como alfégenos. El segundo grupo los Níquel-equivalente, agrupan elementos gammágenos los cuales son formadores de austenita. Es decir, según los elementos contenidos en nuestro sistema la estructura variará y se podrán determinar las características mecánicas del cordón de soldadura obtenido cuando se unan dos piezas de acero inoxidable.

Este sería el diagrama:

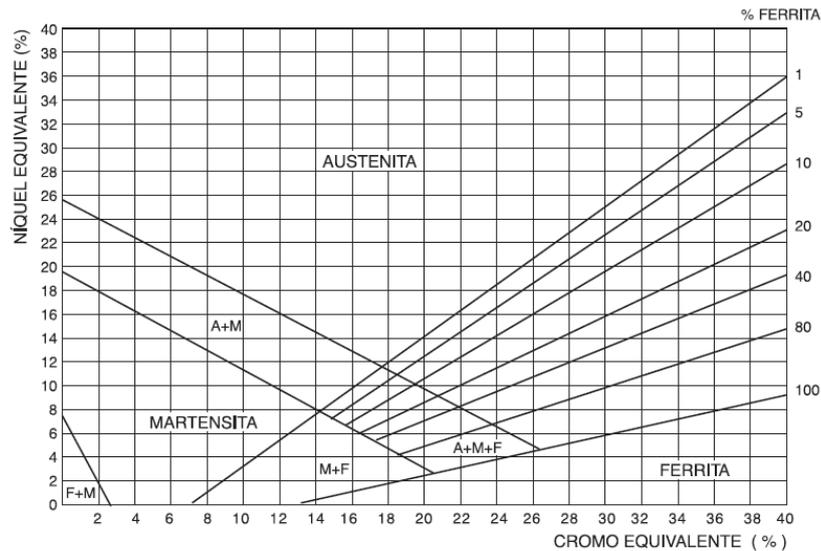


Figura 14. Diagrama de Schaeffler

El diagrama de Schaeffler consta de dos escalas. Siendo la escala vertical el Níquel-equivalente, que agrupa a los formadores de austenita, y la horizontal representa el cromo equivalente, que agrupa a los formadores de ferrita.

Los elementos de cada grupo son multiplicados por un factor el cual depende de su grado de influencia en la formación de ferrita o austenita.

- Níquel-equivalente =  $\%Ni + 0,5\% Mn + 30\%C$
- Cromo-equivalente =  $\%Cr + \%Mo + 1,5\%Si + 0,5\%Nb + 2\%Ti$

Como criterio general, es recomendado posicionarse en la zona austenítica que contenga un porcentaje de 5 a 10% de ferrita. Este método también se podría aplicar a otros aceros que no pertenezcan al grupo de los aceros inoxidables.

## **7. METODOLOGIA DE OBTENCIÓN DE LAS PROBETAS DE ENSAYO**

Como describíamos brevemente en el punto 1 Objeto del proyecto, el objeto de estudio de este trabajo es comprobar el comportamiento frente a corrosión bajo esfuerzos tensiles de deformación de soldaduras en periodo plástico, para ello se requerirá de un acero base inoxidable AISI 304L con la adición de dos metales de aporte diferente, acero inoxidable AISI 308L e Inconel 625, estos dos metales se aportaran en forma de varilla mediante soldadura TIG y bajo una atmosfera protectora inerte de gas Argón.

Recordar que el concepto de corrosión bajo tensión, implica la combinación de efectos de tensiones y corrosión específica que actúa en el entorno del metal. El área objeto de estudio de las muestras será aquella en la que se encuentre la unión soldada

### **7.1. Resumen del proceso realizado**

En primer lugar se realizó una simulación con recortes de metal 304L para mejorar la técnica en el proceso de soldadura TIG y además poder obtener la configuración de trabajo más adecuada (V, I, caudal de gas). Se procede por tanto a la soldadura de las chapas de espesor 1.5mm con los dos metales de aportación del estudio, una vez soldadas se procede a desbastarlas y pulirlas, para finalmente cortarlas en probetas rectangulares de 80x20 mm.

Para poder realizar un mejor estudio de la corrosión bajo tensión, se ha realizado un proceso de laminado obteniendo de los dos grupos de probetas cuatro nuevos espesores; 1,25mm; 1,00mm; 0,75mm y 0,65mm. Destacar, que un grupo de probetas no se ha laminado (1,5mm), pudiendo así comparar los valores de una probeta laminada con la de una sin laminar.

Se han realizado por tanto un total de 50 muestras de los dos grupos, quedando repartidas así:

Aporte	Espesor	Ensayo	Nº de probetas
Aisi 308L	1,5	Tracción	3
Aisi 308L	1,5	Corrosión	2
Aisi 308L	1,25	Tracción	3
Aisi 308L	1,25	Corrosión	2
Aisi 308L	1	Tracción	3
Aisi 308L	1	Corrosión	2
Aisi 308L	0,75	Tracción	3
Aisi 308L	0,75	Corrosión	2
Aisi 308L	0,65	Tracción	3
Aisi 308L	0,65	Corrosión	2
			25

Aporte	Espesor	Ensayo	Nº de probetas
Inconel 625	1,5	Tracción	3
Inconel 625	1,5	Corrosión	2
Inconel 625	1,25	Tracción	3
Inconel 625	1,25	Corrosión	2
Inconel 625	1	Tracción	3
Inconel 625	1	Corrosión	2
Inconel 625	0,75	Tracción	3
Inconel 625	0,75	Corrosión	2
Inconel 625	0,65	Tracción	3
Inconel 625	0,65	Corrosión	2
			25

- Se realizaran ensayos de tracción siendo por tanto destructivos, lo cual nos permitirá conocer el límite elástico y la carga a rotura.
- Corrosión húmeda en cloruro férrico, siendo la concentración del 20%.
- Corrosión por diferencia de peso de las probetas.

Estos ensayos nos permitirán comprobar cómo afectan los diferentes agentes sobre los dos grupos de materiales y sus espesores correspondientes, pudiendo tener una estimación de sus características mecánicas finales y su comportamiento frente a una situación real.

Comportamiento de la soldadura TIG en acero inoxidable 304L con varilla 308L e Inconel 625 frente a corrosión bajo tensión.

## 7.2. Proceso de soldadura realizado para material base AISI 304L con metal de aporte AISI 308L e Inconel 625

Las chapas de acero inoxidable AISI 304L empleadas tenían unas dimensiones iniciales de 180 mm de largo, 75 mm de ancho y 1,5 mm de espesor. En nuestro caso no fue necesario preparar los bordes de las piezas a unir ya que venían preparadas por el fabricante, tal como se muestra en la siguiente figura:



*Figura 15. Chapas de acero AISI 304 L*

Para mejorar el ajuste en la fase de la soldadura se mantuvo una separación de 1 mm entre las piezas mediante elementos de fijación



*Figura 16. Preparación previa a la soldadura de las chapas de acero AISI 304L*

Comportamiento de la soldadura TIG en acero inoxidable 304L con varilla 308L e Inconel 625 frente a corrosión bajo tensión.

Mediante la configuración de trabajo para la máquina de soldadura obtenida en los ensayos previos, se realizó tanto la soldadura con corriente continua, y polaridad directa, con una intensidad de 48 amperios y 94 V de potencia. Para obtener la polaridad directa se conecta el cable de la masa al polo positivo y la pinza porta electrodos al polo negativo. Consiguiendo menores deformaciones en la pieza, mayor avance de soldadura y cordones más estrechos

En primer lugar se puntearon ambas piezas a unas distancias equitativas con una intensidad regulada.



*Figura 17. Punteo de soldadura TIG con atmósfera inerte de Argón*

Comportamiento de la soldadura TIG en acero inoxidable 304L con varilla 308L e Inconel 625 frente a corrosión bajo tensión.

A continuación se realiza el proceso de soldadura con su metal de aportación correspondiente, tratando de realizar la soldadura completa en una sola pasada para no aportar más calor del necesario. Se retira la escoria con un cincel. Se dejan las piezas fijadas con el sargento hasta que se enfrían para evitar posibles deformaciones y por último se limpia el cordón con un cepillo de acero inoxidable para suavizar la soldadura.

Mediante una radial y un disco de desbaste se retiran los excesos del metal de aporte de la unión y las posibles salpicaduras con el fin de dejar la probeta limpia, pulida y sin poros



*Figura 18. Procedimiento para retirar el material sobrante de la soldadura*

Comportamiento de la soldadura TIG en acero inoxidable 304L con varilla 308L e Inconel 625 frente a corrosión bajo tensión.

A continuación limpiamos el óxido y coloración de nuestras probetas mediante gelatina decapante para aceros inoxidables.

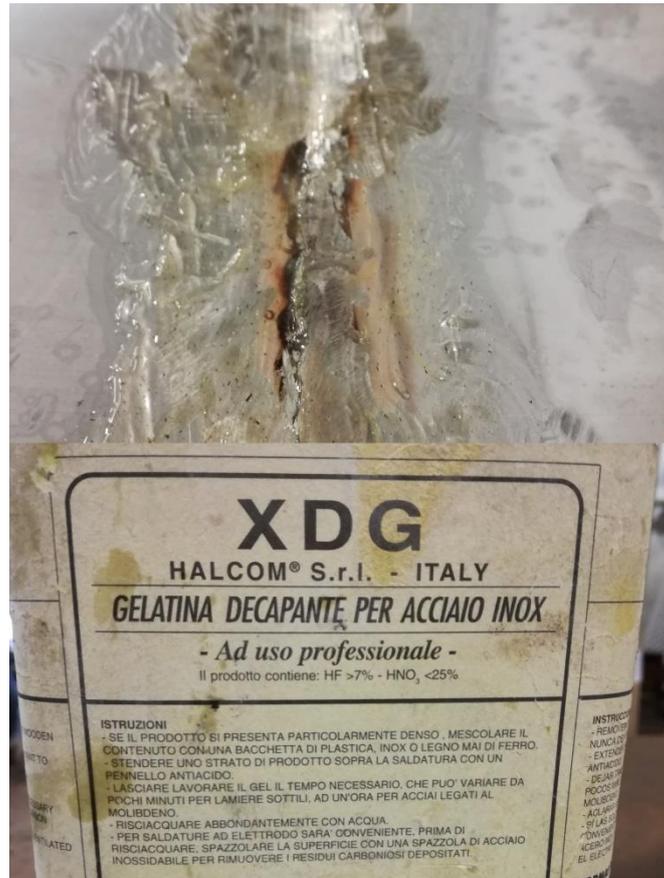


Figura 19. Gelatina decapante y su aplicación sobre una probeta

Una vez todo listo, se procede a marcar probetas de 20 mm de ancho por 80 mm de largo, las cuales posteriormente se cortan mediante una cizalla. De este modo, se obtuvieron 50 probetas, 25 con varilla de aporte de acero inoxidable y 25 con varilla de aporte de Inconel 625

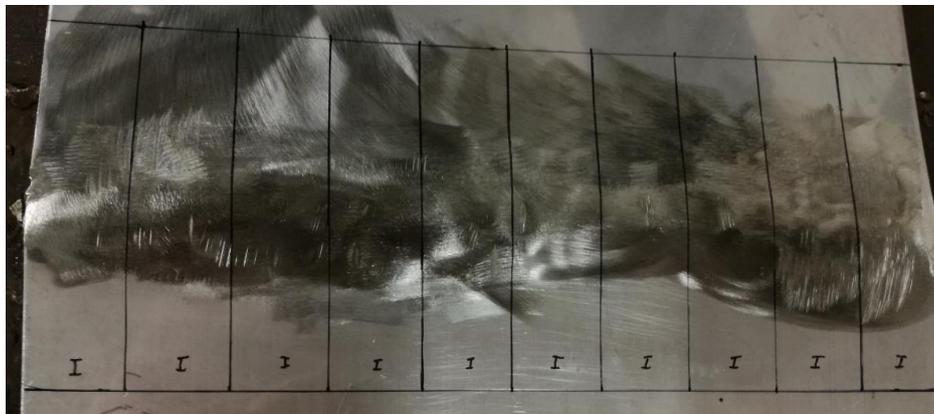


Figura 20. Probetas de acero inoxidable AISI 304L con varilla de aporte 308L

Comportamiento de la soldadura TIG en acero inoxidable 304L con varilla 308L e Inconel 625 frente a corrosión bajo tensión.



*Figura 21. Proceso de corte mediante la cizalla de las probetas realizadas*



*Figura 22. Muestra de probetas lijadas, pulidas y cortadas según sus dimensiones de ensayo.*

### 7.3. Ensayo tracción para de las probetas con material base AISI 304L con metal de aporte AISI 308L e Inconel 625

El objetivo de este ensayo es determinar el comportamiento mecánico de los materiales cuando están sometidos a tracción. Las características que se estudiarán principalmente serán la tensión de rotura y el límite elástico. Dicho ensayo, el cual está normalizado por la UNE, se realiza mediante una máquina de tracción. La cual provoca la deformación de una probeta hasta su rotura, aplicándole una carga progresiva en sentido axial. Con estos datos se obtendrá la curva esfuerzo-deformación.

La prensa registra todos los valores necesarios para el estudio posterior, consta de dos cabezales, uno fijo y otro móvil, los cuales incorporan una mordaza en cada extremo en las que se amarrarán las probetas a ensayar. En dicho momento no podrá haber tensión. El cabezal fijo en la posición inferior permanecerá estático, mientras el móvil ascenderá progresivamente. Todas las tensiones producidas por el ensayo, alargamientos de la probeta y tiempo de ejecución serán registrados en un tambor que lleva incorporado la máquina y almacenados en un ordenador contiguo.

En la figura 23, se puede apreciar la prensa hidráulica, y los complementos necesarios para la obtención y lectura de los datos del ensayo, que hemos empleado para traccionar las probetas.



Figura 23. Prensa hidráulica, tambor y ordenador empleado en el ensayo de tracción de las probetas.

En conclusión, el objetivo es realizar una comparación de las características mecánicas y microestructurales que aportan los dos metales de aporte a diferentes espesores, se realizara contrastando los resultados obtenidos de las distintas variables consideradas, permitiéndonos conocer mejor la tensión que soportan dichas uniones y su evolución.

### 7.3.1. Determinación de la Tensión de Rotura

El estudio del ensayo de tracción se realiza mediante la curva tensión-deformación, esta tiene la peculiaridad de variar según el espesor o el material, como podremos observar en nuestro estudio.

La curva tensión-deformación del acero (fig.24) se inicia en lo que englobaremos como la **zona elástica**. La cual está compuesta por la **zona de proporcionalidad**, tramo OA, en la cual el alargamiento unitario o deformación ( $\epsilon$ ) es proporcional a la tensión ejercida ( $\sigma$ ). Siendo este tramo el que se utiliza en aplicaciones industriales, debido a que una vez se retira la carga se elimina la deformación no creando por tanto deformaciones permanentes. A continuación encontraríamos la **zona de no proporcionalidad o zona plástica**, tramo AB, suele ser una región más corta que la anterior en la que el material se comporta de forma elástica, pero no existe relación proporcional entre tensión y deformación

La siguiente parte de la curva es la **zona plástica** dividida en tres subzonas. Llegados a este punto se ha superado la tensión del límite elástico y aunque se deje de aplicar la carga el material ya no recuperaría su longitud original. En el caso del acero, una vez superado el límite elástico se produce una deformación sin que varíe la tensión aplicada, tramo BC, dicha zona se conoce como **Plasticidad perfecta o fluencia**. A continuación se pasaría a la **Zona de endurecimiento por deformación o Zona límite de rotura**, tramo CD, en la cual primero se produce un aumento de la tensión y grandes alargamientos hasta llegar al límite de rotura, en dicho punto la probeta se considera rota aunque físicamente no lo pueda parecer. Por último se encuentra la **Zona de rotura o Zona de estricción**, tramo DE, En la cual las deformaciones son localizadas y se va produciendo un descenso de la tensión mientras el material se deforma hasta la rotura.

Llegados a este punto la probeta se habrá roto, aunque en otros casos puede que la sección se reduzca drásticamente.

El valor máximo de tensión que soporta la probeta es conocido como **Tensión de tracción a rotura ( $\sigma_r$ )**. El cual se puede obtener mediante la Ec. 1.

$$\sigma_r = \frac{F_r}{A} \quad [\text{Ec. 1}]$$

Donde:

$F_r$ = Carga o esfuerzo máximo efectuado sobre la probeta, punto D del diagrama.

$A$ = Sección transversal de la probeta de ensayo

$\sigma_r$ = Tensión de rotura del material

La sección transversal de la probeta se obtiene midiendo su ancho y su espesor.

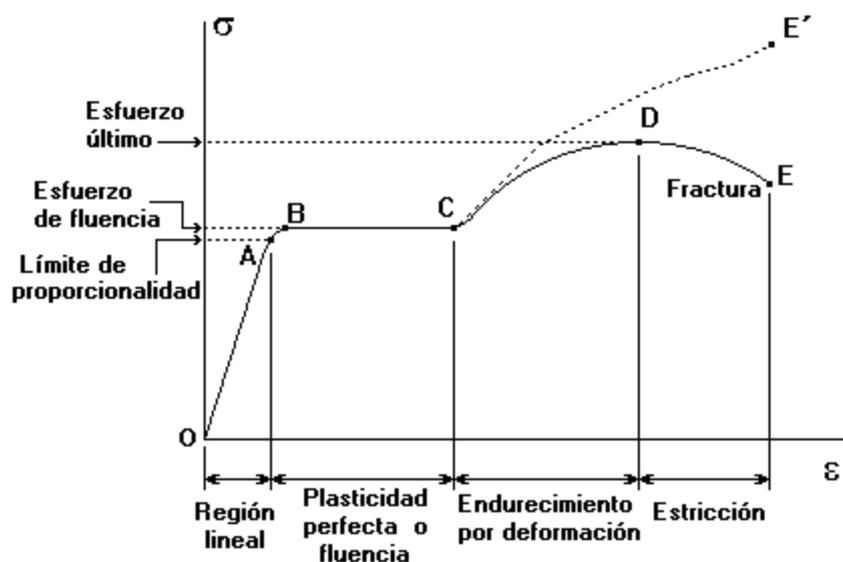


Figura 24. Diagrama tensión - deformación característica de un acero dúctil.

(“www.blogspot.com”)

### 7.3.2. Determinación del Alargamiento en %

La ductilidad es la propiedad mecánica que permite medir el grado de deformación plástica que puede soportar un material antes de llegar a la rotura. Esta característica es muy importante en el estudio que se está realizando. Debido a que los aceros inoxidables austeníticos, caso del acero inoxidable base 304L, poseen una excelente ductilidad pero al realizarse el trabajo en frío de laminado se reduce la misma. Por lo que se reflejará en las gráficas del ensayo en un aumento del límite elástico y la tensión de rotura, por el contrario la deformación que se producirá dejara de ser dúctil para transformarse en frágil

El diagrama tensión–deformación que compara el comportamiento ambos tipos de material se ilustra esquemáticamente en la Figura 25.

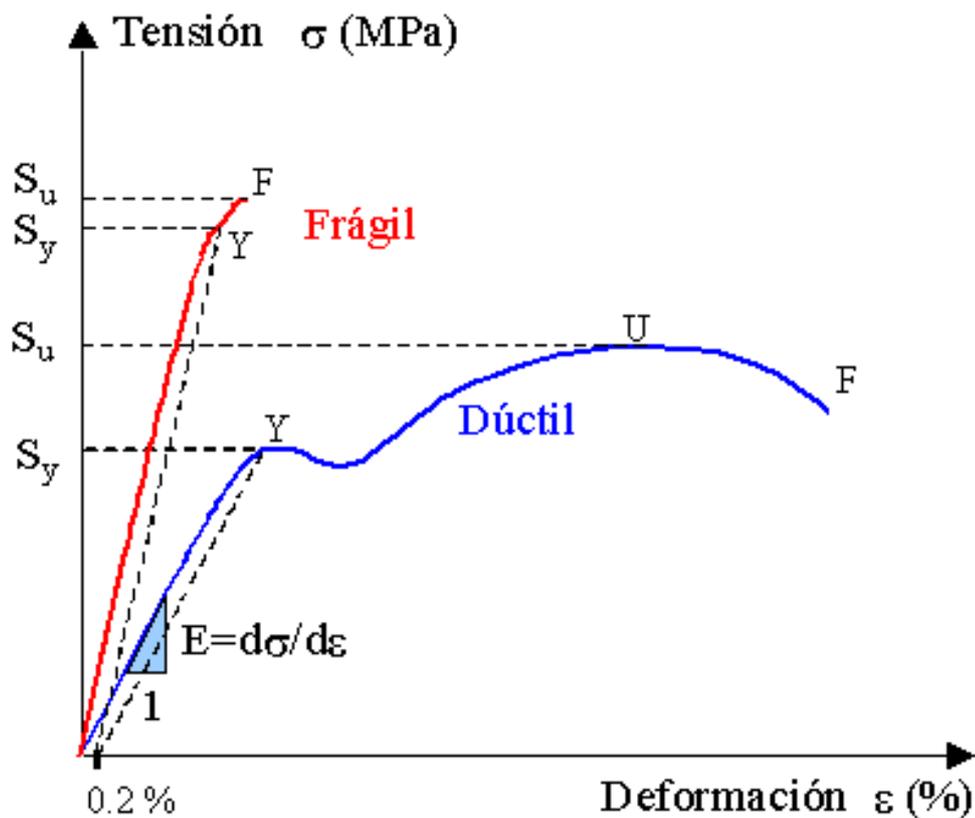


Figura 25. Representación esquemática de los diagramas de tracción - deformación de materiales frágiles y dúctiles ensayados hasta la fractura.

(“www.mecapedia.uji.es”)

La ductilidad se conoce cuantitativamente como *deformación unitaria o porcentual*, la cual se reflejará mediante la deformación obtenida en las gráficas. Dicha información puede no ser exacta debido a que en ella no se tiene en cuenta la contracción del material al romper por su recuperación elástica. Por dicho motivo es mejor medir la probeta antes y después del ensayo.

El *alargamiento en %* se determina tomando una medida de longitud prefijada por la norma **UNE-EN 10002**, la cual indica que la expresión para determinar la longitud de las probetas de sección rectangular es:

$$l_0 = 5,65 \cdot \sqrt{b \cdot e} \quad [\text{Ec. 2}]$$

Siendo:

$l_0$  = Longitud a tomar de referencia

$e$  = Espesor de la probeta

$b$  = Anchura de la probeta

El alargamiento porcentual a la rotura  $\Delta l\%$ , es el porcentaje de deformación plástica a rotura y se determina aplicando la siguiente expresión:

$$\Delta l\% = \frac{l_0 - l_f}{l_0} \cdot 100 \quad [\text{Ec. 3}]$$

Siendo:

$l_f$  = Longitud final de la probeta (después del ensayo de tracción)

La longitud final se determina uniendo las dos partes de la probeta y midiéndolas con un pie de rey. De esta manera se evita el no tener en cuenta la recuperación elástica que se produce tras la rotura de la probeta.

### 7.3.3. Determinación del Módulo de Elasticidad

El módulo de elasticidad se encuentra en el primer tramo de un diagrama  $\sigma-\varepsilon$  o régimen lineal elástico, (figura 26), y es el módulo de esfuerzo por deformación. Siendo por tanto una relación lineal con el campo elástico del material:

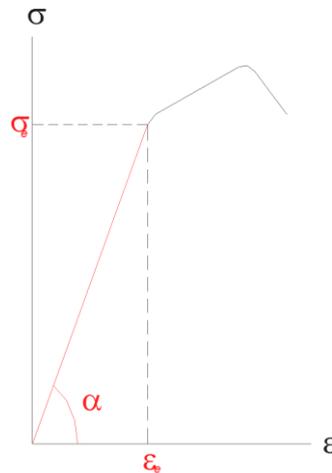


Figura 26. Definición del módulo de elasticidad mediante el diagrama  $\sigma-\varepsilon$

Para determinar el módulo de elasticidad se pueden aplicar las siguientes expresiones:

$$E = \frac{F_e \cdot l_0}{\Delta l \cdot A} \quad [\text{Ec. 4}]$$

$$E = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \varepsilon} = \text{tg } \alpha \quad [\text{Ec. 5}]$$

Siendo:

$F_e$  = Carga elástica

$l_0$  = Longitud inicial de la probeta

$\Delta l$  = Incremento de longitud sufrido por la probeta

$A$  = Sección de la probeta

$E$  = Módulo de elasticidad

Destacar la ley de Hooke, ley que establece que si la tensión se establece por debajo de un límite de proporcionalidad, las deformaciones y las tensiones serán directamente proporcionales. Se calcularía mediante la fórmula:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

#### **7.4. Corrosión por picaduras (Pitting)**

La corrosión por picaduras, o pitting, es una forma de ataque corrosivo extremadamente localizado la cual produce pequeños agujeros en el metal. Se pueden diferenciar distintas magnitudes de corrosión, desde las más severas que pueden producir perforación del metal siendo muy crítico por tanto para estructuras de ingeniería a pequeñas picaduras en equipos de ingeniería que no afecten a su funcionamiento. Sin embargo, en una corrosión por picaduras el número y profundidad de los agujeros pueden variar enormemente por lo que puede ser difícil evaluar la extensión del daño producido por la misma, pudiendo ocasionar fallos inesperados. La picadura puede ser difícil de detectar ya que los pequeños agujeros pueden ser tapados por los productos de la corrosión, suciedad u otros elementos.

En estructuras metálicas se puede requerir de meses o años para llegar a perforar una sección metálica. Generalmente la picadura requiere un periodo de iniciación lento el cual puede producirse donde se produzca un aumento de la corrosión, por heterogeneidades estructurales o por diferencias en las concentraciones de iones y oxígeno, pero una vez comenzada, los agujeros crecen a gran velocidad. La mayoría de estas se desarrollan y crecen en la dirección de la gravedad y sobre las superficies más bajas de los equipos de ingeniería.

Se cree que la propagación de un agujero trae consigo la disolución del metal en el agujero mientras se mantiene un alto grado de acidez en el fondo del orificio.

Las aleaciones protegidas por una película de óxido tenaz (pasivante) son las más desfavorecidas frente a la corrosión concretamente las expuestas a ambientes costeros, marinos o ambientes industriales en los que se contengan tiosulfatos. Se dependerá también de condicionantes en estos ambientes como la temperatura, la acidez o la alcalinidad y el contenido de gases oxidantes. La resistencia al ataque por picaduras de un acero inoxidable depende de su composición química. El cromo, el molibdeno y el nitrógeno mejoran la resistencia al ataque por picaduras.

### 7.4.1. Preparación del ensayo de corrosión por picaduras

Para el desarrollo de este ensayo se han soldado mediante el proceso TIG (Tungsten Inert Gas) bajo atmosfera de gas inerte de argón, un total de veinte probetas con una acero inoxidable base 304L y dos metales de aporte diferentes acero inoxidable AISI 308L y acero Inconel 625, dichas probetas se laminan en frio previamente hasta conseguir cinco espesores diferentes con el objetivo de poder estudiar el efecto de la corrosión bajo las tensiones producidas por la tracción.

Aporte	Espesor	Ensayo	Nº de probetas
AISI 308	1,5	Corrosión	2
AISI 308	1,25	Corrosión	2
AISI 308	1	Corrosión	2
AISI 308	0,75	Corrosión	2
AISI 308	0,65	Corrosión	2
			10

Aporte	Espesor	Ensayo	Nº de probetas
Inconel 625	1,5	Corrosión	2
Inconel 625	1,25	Corrosión	2
Inconel 625	1	Corrosión	2
Inconel 625	0,75	Corrosión	2
Inconel 625	0,65	Corrosión	2
			10

Tabla1. Probetas preparadas para el ensayo de corrosión en frío.

El agente corrosivo que se ha empleado es Cloruro Férrico ( $Fe Cl_3$ ) concentrado al 20% durante un tiempo de exposición de 72 horas. Se tendrán en cuenta las picaduras producidas en una región de 20 x 20 mm, donde se encuentran las áreas de soldadura. A continuación, se expone una imagen de los distintos resultados obtenidos tras el ataque corrosivo:

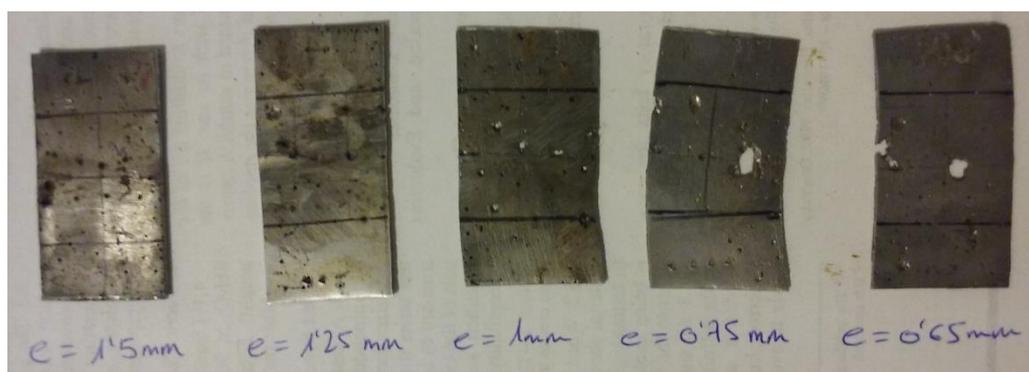


Figura 28. Picaduras debido a la corrosión en diferentes espesores de laminación en frío.

Las probetas destinadas al ensayo de corrosión fueron pulidas tras el desbaste y lijado. Esto se fue necesario para evitar que el ataque del líquido corrosivo se concentrase en las zonas rugosas.

#### **7.4.2. Corrosión por diferencia de peso**

Este método permite relacionar los efectos causados por la corrosión respecto a la pérdida de material sufrida, consiste en exponer piezas de metal a ambientes corrosivos y determinar la pérdida de peso que sufra la muestra de ensayo tras las pruebas.

Es por tanto un método muy utilizado en estudios de corrosión y oxidación para obtener el grado de afectación en los metales, pudiéndose considerar los resultados obtenidos fiables. Uno de sus usos más comunes en la industria es para obtener una selección preliminar de los mejores materiales para una determinada aplicación, siendo una metodología rápida y efectiva.

## **8. SOLDADURA ACERO AISI 304L CON METAL DE APORTE AISI 308L Y ATMÓSFERA INERTE DE ARGÓN**

La realización de esta soldadura se ha llevado a cabo según el procedimiento detallado previamente en el apartado 7.2.

Para el estudio de las características resistentes de este tipo de unión, se ha procedido a comparar las tensiones de rotura y los límites elásticos de las distintas probetas. Dichos datos son obtenidos mediante el ensayo de tracción.

### **8.1. Resultados del ensayo de tracción**

A continuación, se mostrarán los **datos obtenidos mediante el ensayo de tracción** de cada uno de los espesores de la soldadura **AISI 304L+308L con atmósfera inerte de Argón**.

Destacar que de **no todos los ensayos realizados son válidos**. Esto es debido a que algunas probetas contenían micro fisuras en los extremos de la unión, las cuales se incrementaron mediante el laminado en frío, no permitiendo que en el ensayo de tracción lleguen a su tensión de rotura correspondiente.

**En las curvas tensión-deformación, se representa la Tensión en Megapascuales y la Deformación en tanto por ciento.**

**Soldadura de AISI 304L + 308L con atmósfera inerte de Argón. Espesor 1.5 mm**



*Figura 29. Probetas de 1,5mm de espesor ensayadas a tracción. Soldadura de AISI 304L + 308L + atmosfera Argón*

Observamos que las probetas utilizadas rompen en la zona afectada térmicamente o zona de interfase, área de unión entre el acero base AISI 304L y el metal de aporte AISI 308L, que dicha rotura sea “recta” es un indicativo de una buena resistencia mecánica de la unión soldada. El motivo de que la rotura se produzca en la zona de interfase es debido a que es el lugar donde se produce un cambio de estructura del grano siendo por tanto más frágil. **La rotura en la zona de interfase se repite en todos y cada uno los ensayos realizados por lo que para realizar el informe más práctico se procede a omitir las fotografías.**

Comportamiento de la soldadura TIG en acero inoxidable 304L con varilla 308L e Inconel 625 frente a corrosión bajo tensión.

Se representa en la figura 30 la curva tensión – deformación de las tres probetas de 1,5 mm. Registrando los valores de la tensión máxima y límite elástico en la tabla 2. Recordar que estas probetas no han sido laminadas en frío.

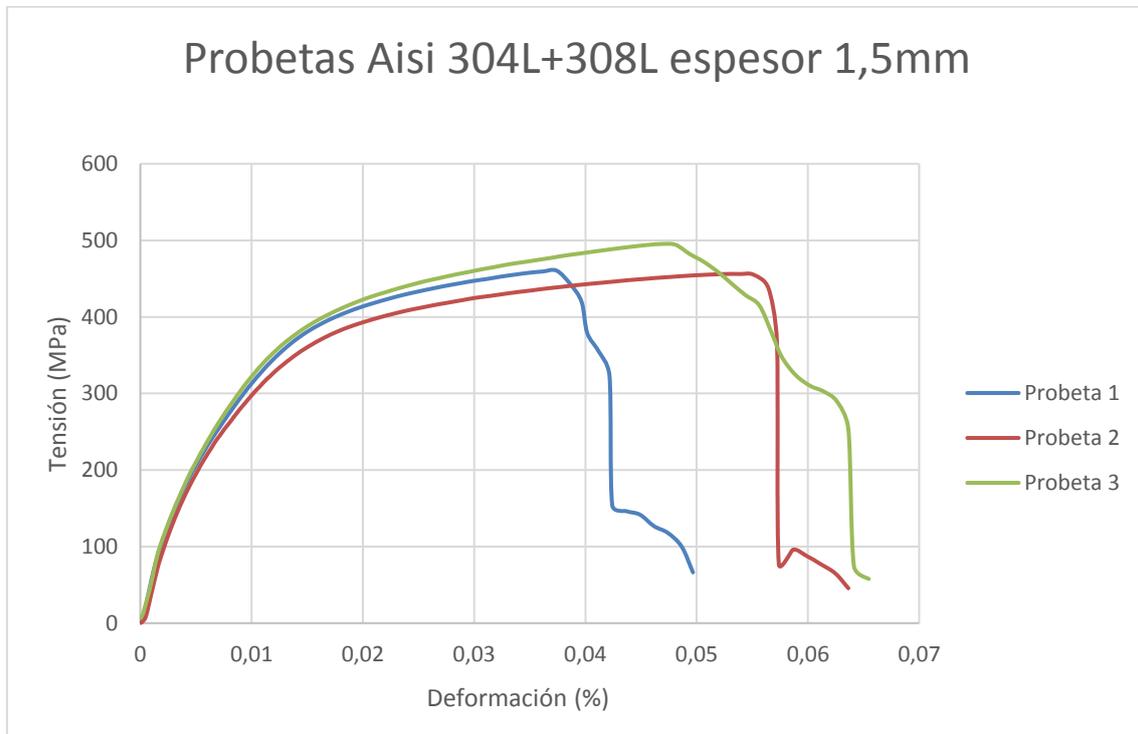


Figura 30. Curvas tensión – deformación del ensayo de tracción de las probetas de  $e=1,5\text{mm}$ .

Soldadura 304 + 308L con atmósfera inerte de Argón. Espesor 1.5 mm				
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	MEDIA
$\sigma_{\max}(\text{MPa})$	460.5	456.1	495.4	<b>470.7</b>
<b>LE (MPa)</b>	128.8	139.6	129.8	<b>132.7</b>

Tabla 2. Recopilación de las tensiones de rotura y los límites elásticos. Probetas de  $e=1,5\text{mm}$ .

**Soldadura de AISI 304L + 308L con atmósfera inerte de Argón. Laminadas tras la soldadura hasta un espesor de 1,25mm.**

Se representa en la figura 31 la curva tensión – deformación de las tres probetas de 1,25 mm. Registrando los valores de la tensión máxima y límite elástico en la tabla 3. Recordar que estas probetas han sido laminadas en frío desde un espesor de 1.5 mm.

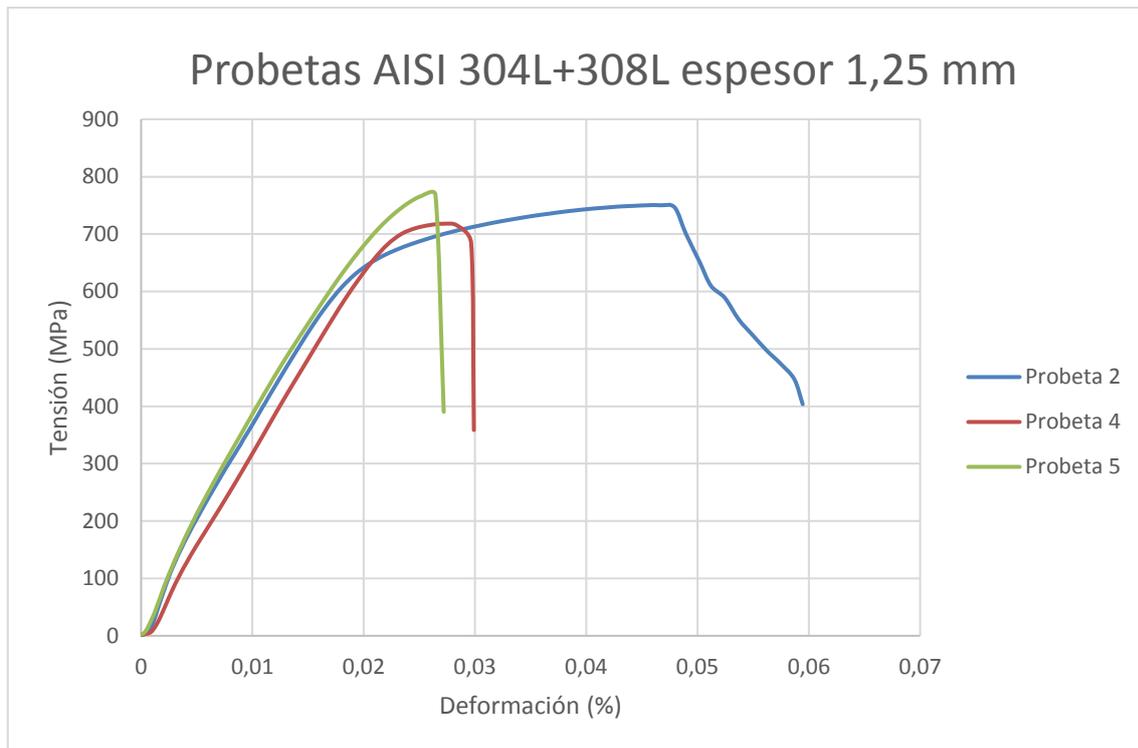


Figura 31. Curvas tensión – deformación del ensayo de tracción de las probetas de e=1,25mm.

Soldadura 304 + 308L con atmósfera inerte de Argón. Espesor 1.25 mm				
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	MEDIA
$\sigma_{max}$ (MPa)	750.1	717.9	768.8	<b>745.6</b>
LE (MPa)	572.9	529.4	600	<b>567.4</b>

Tabla 3. Recopilación de las tensiones de rotura y los límites elásticos. Probetas de 1,25mm de espesor.

**Soldadura de AISI 304 + 308L con atmósfera inerte de Argón. Laminadas tras la soldadura hasta un espesor de 1 mm.**

Se representa en la figura 32 la curva tensión – deformación de las tres probetas de 1 mm. Registrando los valores de la tensión máxima y límite elástico en la tabla 4. Recordar que estas probetas han sido laminadas en frío desde un espesor de 1.5 mm.

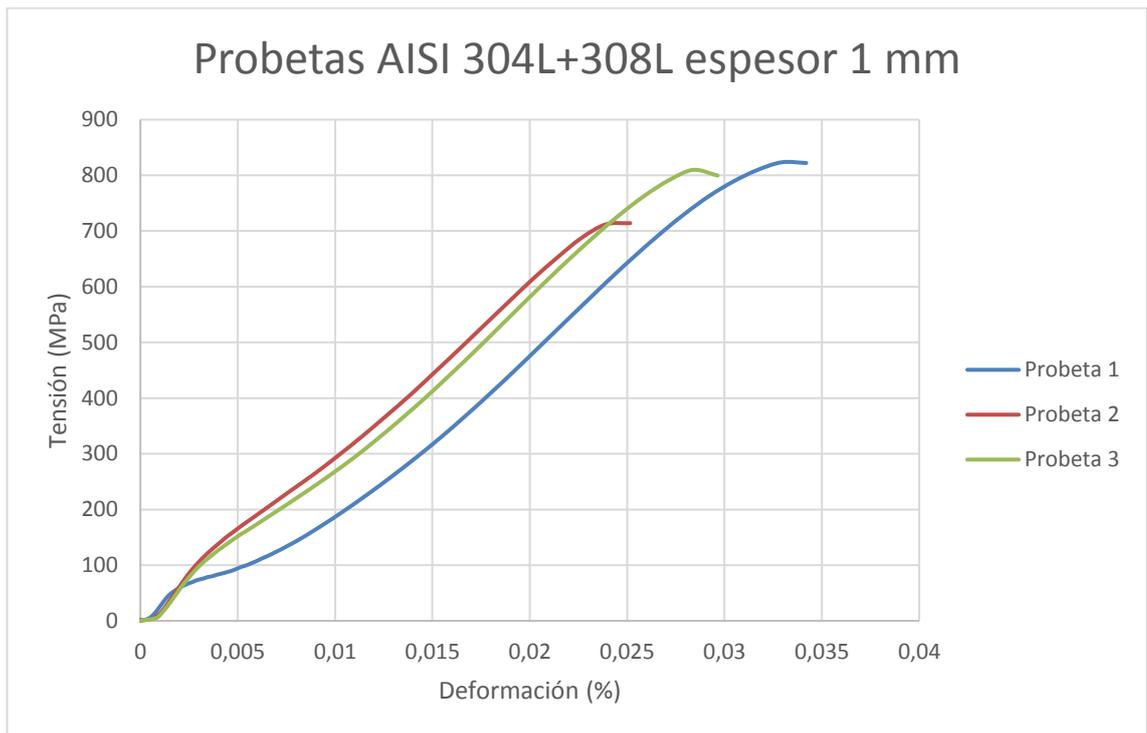


Figura 32. Curvas tensión – deformación del ensayo de tracción de las probetas de e=1mm

Soldadura 304 + 308L con atmósfera inerte de Argón. Espesor 1 mm				
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	MEDIA
$\sigma_{max}$ (MPa)	823.5	714.1	809.8	<b>782.5</b>
LE (MPa)	572.9	529.4	600	<b>567.3</b>

Tabla 4. Recopilación de las tensiones de rotura y los límites elásticos. Probetas de 1,00mm de espesor.

**Soldadura de AISI 304 + 308L con atmósfera inerte de Argón. Laminadas tras la soldadura hasta un espesor de 0,75 mm.**

Se representa en la figura 33 la curva tensión – deformación de las tres probetas de 0.75 mm. Registrando los valores de la tensión máxima y límite elástico en la tabla 5. Recordar que estas probetas han sido laminadas en frío desde un espesor de 1.5 mm.

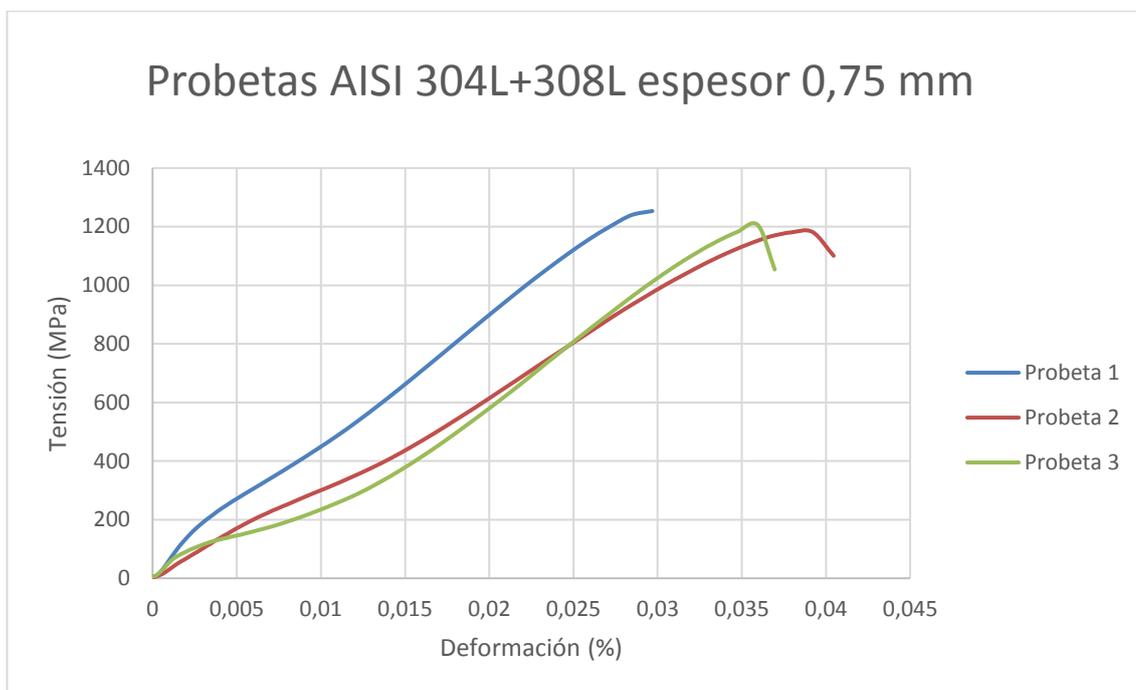


Figura 33. Curvas tensión – deformación del ensayo de tracción de las probetas de e=0.75mm

Soldadura 304 + 308L con atmósfera inerte de Argón. Espesor 0.75 mm				
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	MEDIA
$\sigma_{max}$ (MPa)	1253.3	1181.6	1205.3	<b>1213.4</b>
LE (MPa)	591	584.4	678.3	<b>617.9</b>

Tabla 5. Recopilación de las tensiones de rotura y los límites elásticos. Probetas de 0,75mm de espesor.

**Soldadura de AISI 304 + 308L con atmósfera inerte de Argón. Laminadas tras la soldadura hasta un espesor de 0,65 mm.**

Se representa en la figura 34 la curva tensión – deformación de las tres probetas de 0.65 mm. Registrando los valores de la tensión máxima y límite elástico en la tabla 6. Recordar que estas probetas han sido laminadas en frío desde un espesor de 1.5 mm.

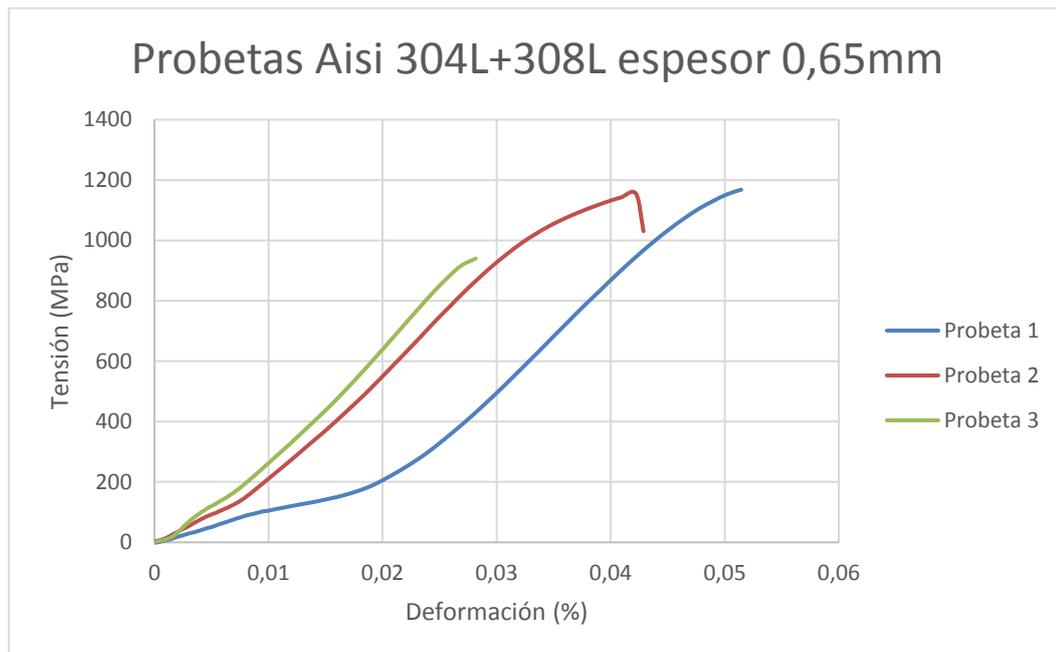


Figura 34. Curvas tensión – deformación del ensayo de tracción de las probetas de e=0.65mm

Soldadura 304 + 308L con atmósfera inerte de Argón. Espesor 0.65 mm				
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	MEDIA
$\sigma_{max}$ (MPa)	1168.2	1154.7	939.9	<b>1087.6</b>
LE (MPa)	950.8	982	891.9	<b>941.6</b>

Tabla 6. Recopilación de las tensiones de rotura y los límites elásticos. Probetas de 0,65mm de espesor.

## 8.2 Resultados del ensayo de corrosión por picaduras

Como comentábamos en el apartado 8.4, preparación del ensayo de corrosión por picaduras bajo Cloruro Férrico ( $\text{Fe Cl}_3$ ). El objeto de este proyecto es el estudio de la corrosión bajo tensión, por tanto se han laminado las probetas obteniendo cuatro espesores diferentes, en los cuales se han generado tensiones residuales en el material por la deformación en frío del mismo (deformación del grano) y otra probeta del espesor inicial la cual solo sufre los efectos de la corrosión.

Muestra de los resultados de las probetas tras el ensayo de corrosión:

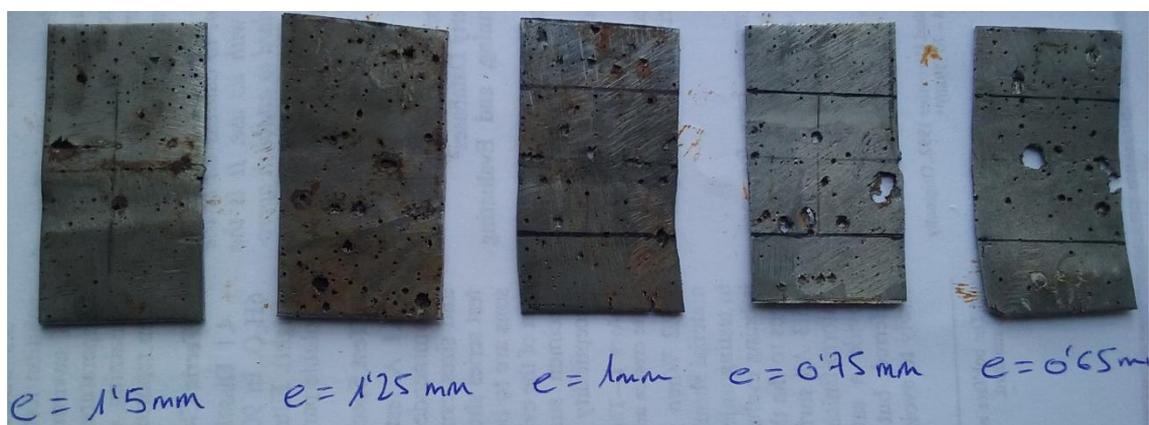


Figura 35. Probetas soldadas, mediante el proceso TIG con gas inerte Argón, y laminadas, sometidas a corrosión bajo tensión en una disolución de Cloruro Férrico con una concentración del 20%.

La relación entre el grado de corrosión de las probetas tras la inmersión en cloruro férrico, puede observarse en la siguiente gráfica a partir del nº de picaduras:

Aporte	Espesor	Nº de picaduras
Aisi 308L	1,5	<b>140</b>
Aisi 308L	1,25	<b>145</b>
Aisi 308L	1	<b>162,5</b>
Aisi 308L	0,75	<b>172</b>
Aisi 308L	0,65	<b>184</b>

Tabla 7. Nº de Picaduras del ensayo de corrosión bajo tensión en cloruro férrico.

El recuento de las picaduras se ha realizado mediante un **microscopio Olympus B061**. Dividiéndose el área de estudio de la probeta en distintas secciones, lo que permitía obtener un recuento total lo más preciso posible

Destacar que en las probetas de mayor espesor se encuentra un mayor número de picaduras, pero estas son de muy poco diámetro y sin apenas profundidad. En cambio a medida que disminuye el espesor por la laminación, se empiezan a generar pequeños hoyos hasta llegar a orificios de un tamaño considerable. La equivalencia de estos orificios a picaduras se obtiene en función de su área mediante la siguiente fórmula:

$$\text{N}^\circ \text{ de picaduras} = \frac{\emptyset^2}{0.5^2}$$

[Ec. 6]

Siendo:

$\emptyset$ =El área ocupada por el orificio pasante

### 8.2.1. Corrosión por diferencia de peso

Se ha procedido a pesar las piezas previamente a su inmersión en Cloruro Férrico ( $\text{Fe Cl}_3$ ) y tras las 72 horas de exposición. Obteniendo estos resultados:

Aporte	Espesor	Peso Inicial (g)	Peso final (g)	Diferencia (g)	Media diferencia (g)
Aisi 308L	1,5	8,585	8,408	0,177	0,1955
Aisi 308L	1,5	8,431	8,217	0,214	
Aisi 308L	1,25	7,377	7,175	0,202	0,2335
Aisi 308L	1,25	7,564	7,299	0,265	
Aisi 308L	1	5,392	5,086	0,306	0,3325
Aisi 308L	1	6,388	6,029	0,359	
Aisi 308L	0,75	5,132	4,79	0,342	0,3835
Aisi 308L	0,75	4,648	4,223	0,425	
Aisi 308L	0,65	3,886	3,424	0,462	0,4645
Aisi 308L	0,65	3,703	3,236	0,467	

Tabla 8. Resultados de la corrosión por diferencia de peso.

### 8.3. Conclusiones soldadura acero inoxidable 304 L con varilla 308L frente a corrosión bajo tensión.

En este estudio se demuestra **la influencia de los esfuerzos tensiles producidos por el laminado en frio sobre el acero austenítico** en las probetas ensayadas, dicho proceso aporta al material mayor resistencia, dureza y mejor acabado superficial aunque reduce su fluencia, ductilidad y capacidad de soportar altas temperaturas. Por tanto, **destacar que este fenómeno produce cambios en las propiedades mecánicas del área de estudio. Dichos cambios se ven reflejados en un cambio en la tendencia de la gráfica pasando de ser curvas dúctiles a curvas frágiles según se reduce el espesor, a la par que se van aumentando los límites de rotura, los límites elásticos y se disminuyen sus deformaciones.**

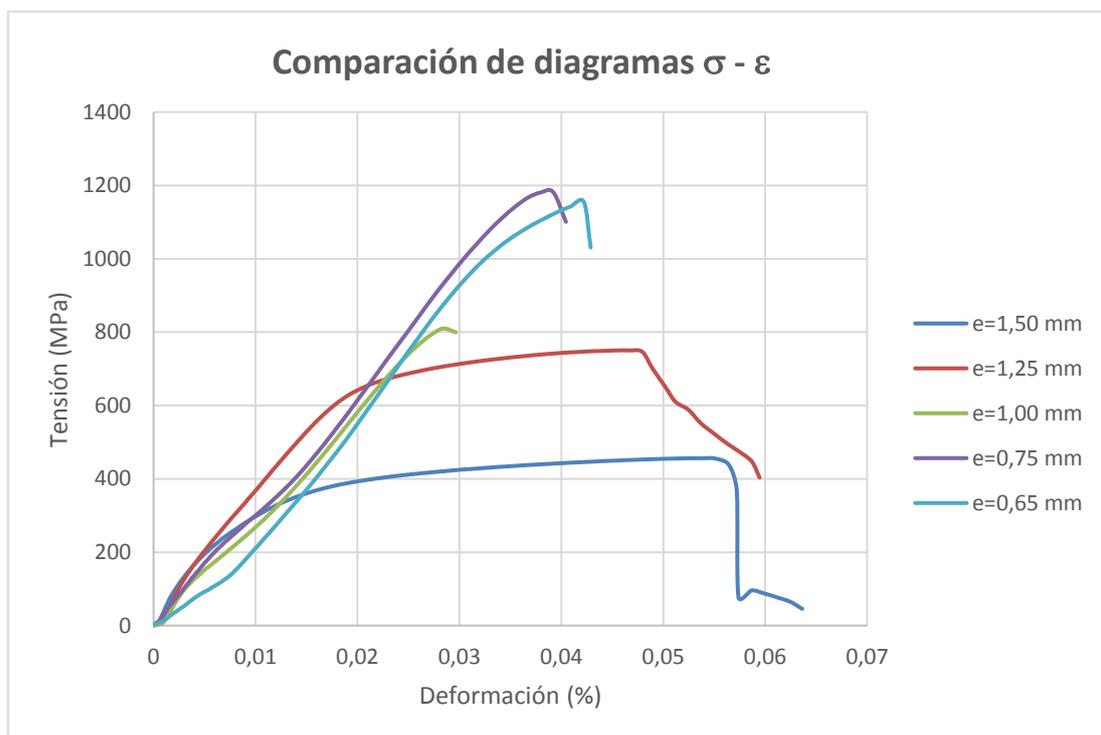


Figura 36. Curvas de tensión – deformación de probetas laminadas desde un espesor de 1,50 mm

A pesar que estos metales tienen la capacidad de endurecerse al deformarse plásticamente, al tener una gran presencia de cromo y níquel, su composición química permite que mantenga en gran parte sus propiedades.

Comportamiento de la soldadura TIG en acero inoxidable 304L con varilla 308L e Inconel 625 frente a corrosión bajo tensión.

Sin embargo para su uso industrial lo más recomendable es mantener un equilibrio entre la fuerza máxima y la máxima ductilidad. Destacando también, que las tensiones residuales de la deformación en frío del material podrían ser eliminadas mediante un tratamiento térmico adecuado del material.

En contra se observa que la laminación afecta negativamente a las características frente a la corrosión húmeda y en fenómenos como la corrosión por diferencia de peso.

Destacar que una probeta laminada no podrá soportar la misma temperatura que una sin laminar.

## **9. SOLDADURA ACERO AISI 304L CON METAL DE APORTE INCONEL 625 Y ATMÓSFERA INERTE DE ARGÓN**

La realización de esta soldadura se ha llevado a cabo según el procedimiento detallado previamente en el apartado 8.2.

Para el estudio de las características resistentes de este tipo de unión, se ha procedido a comparar las tensiones de rotura y los límites elásticos de las distintas probetas. Dichos datos son obtenidos mediante el ensayo de tracción.

### **9.1 Resultados del ensayo de tracción**

A continuación, se mostraran los **datos obtenidos mediante el ensayo de tracción** de cada uno de los espesores de la **soldadura AISI 304L+ Inconel 625 con atmósfera inerte de Argón.**

Destacar que de **no todos los ensayos realizados son válidos.** Esto es debido a que algunas probetas contenían micro fisuras en los extremos de la unión, las cuales se incrementaron mediante el laminado, no permitiendo que en el ensayo de tracción lleguen a su tensión de rotura correspondiente.

**En las curvas tensión-deformación, se representa la Tensión en Megapascuales y la Deformación en tanto por ciento.**

### Soldadura de AISI 304L + Inconel 625 con atmósfera inerte de Argón.

#### Espesor 1.5 mm

Las probetas utilizadas rompen en la zona afectada térmicamente o zona de interfase, área de unión entre el acero base AISI 304L y el metal de aporte Inconel 625, que dicha rotura sea “recta” es un indicativo de una buena resistencia mecánica de la unión soldada. El motivo de que la rotura se produzca en la zona de interfase es debido a que es el lugar donde se produce un cambio de estructura del grano siendo por tanto menos robusta.

Se representa en la figura 37 la curva tensión – deformación de las tres probetas de 1,5 mm. Registrando los valores de la tensión máxima y límite elástico en la tabla 9. Recordar que estas probetas no han sido laminadas en frío.

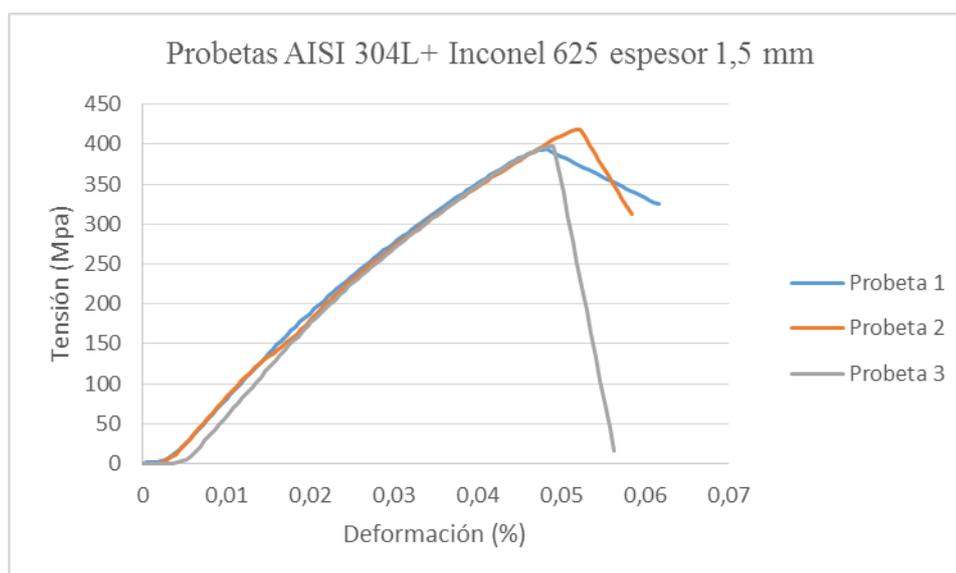


Figura 37. Curvas tensión – deformación del ensayo de tracción de las probetas de  $e=1.5\text{mm}$

Soldadura 304L + Inconel 625 con atmósfera inerte de Argón. Espesor 1.5 mm				
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	MEDIA
$\sigma_{\max}(\text{MPa})$	397	417.9	397.8	<b>404.2</b>
LE (MPa)	177.3	133.9	171.4	<b>160.9</b>

Tabla 9. Recopilación de las tensiones de rotura y los límites elásticos. Probetas de  $e=1,5\text{mm}$

### Soldadura de AISI 304L + Inconel 625 con atmósfera inerte de Argón. Espesor 1.25 mm

Se representa en la figura la curva tensión – deformación de las tres probetas de 1,5 mm. Registrando los valores de la tensión máxima y límite elástico en la tabla 10. Recordar que estas probetas no han sido laminadas en frío.

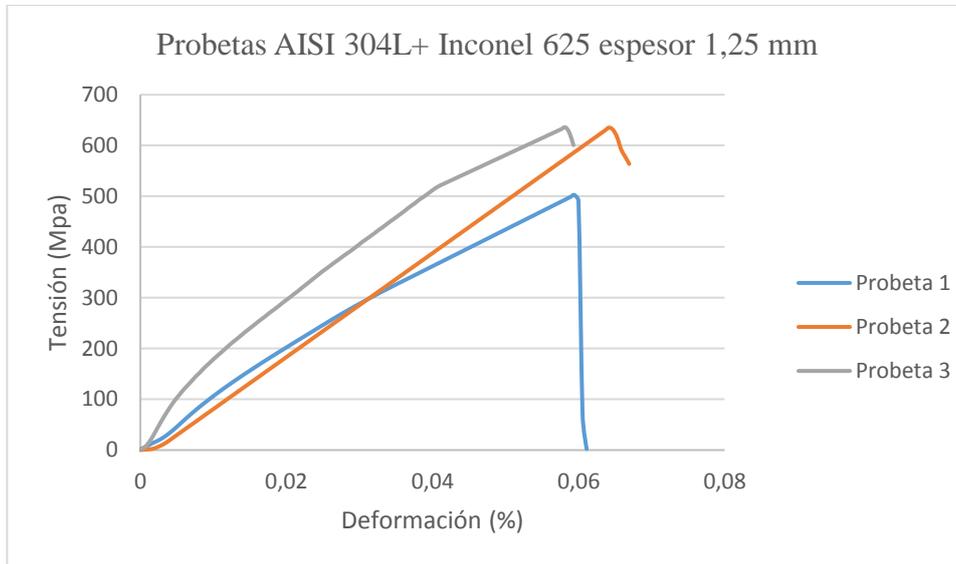


Figura 38. Curvas tensión – deformación del ensayo de tracción de las probetas de e=1.25mm

Soldadura 304L + Inconel 625 con atmósfera inerte de Argón. Espesor 1.25 mm				
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	MEDIA
$\sigma_{max}$ (MPa)	502.6	635.3	636	<b>591.3</b>
LE (MPa)	224.8	282.7	257.3	<b>254.9</b>

Tabla 10. Recopilación de las tensiones de rotura y los límites elásticos. Probetas de e=1,25mm

Comportamiento de la soldadura TIG en acero inoxidable 304L con varilla 308L e Inconel 625 frente a corrosión bajo tensión.

**Soldadura de AISI 304L + Inconel 625 con atmósfera inerte de Argón. Espesor 1 mm**

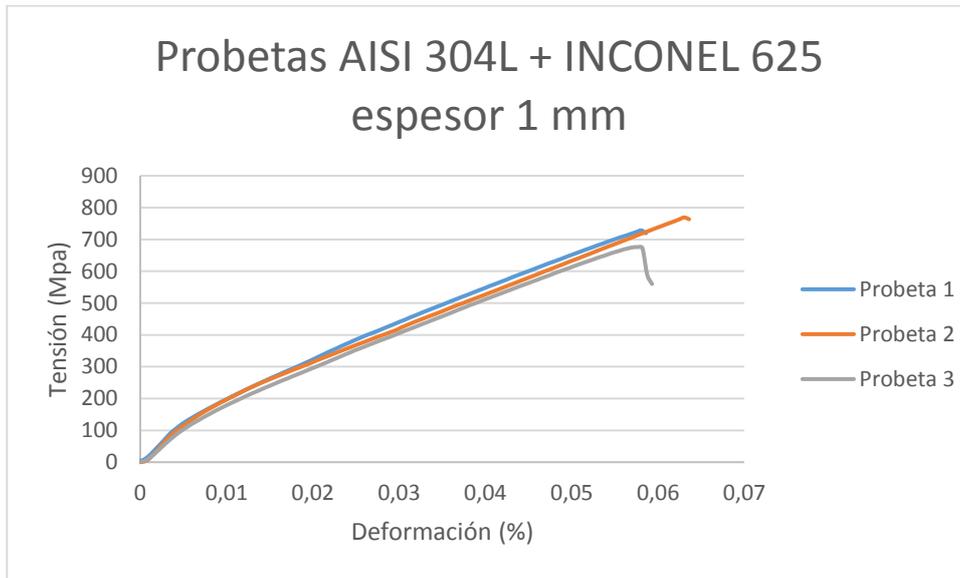


Figura 38. Curvas tensión – deformación del ensayo de tracción de las probetas de e=1 mm

Soldadura 304L + Inconel 625 con atmósfera inerte de Argón. Espesor 1 mm				
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	MEDIA
$\sigma_{\max}$ (MPa)	722.3	763.4	672.8	<b>719.5</b>
LE (MPa)	526.6	489.9	486.9	<b>501.1</b>

Tabla 11. Recopilación de las tensiones de rotura y los límites elásticos. Probetas de e=1mm

### Soldadura de AISI 304L + Inconel 625 con atmósfera inerte de Argón. Espesor 0.75 mm

Se representa en la figura 40 la curva tensión – deformación de las tres probetas de 1,5 mm. Registrando los valores de la tensión máxima y límite elástico en la tabla 12. Recordar que estas probetas no han sido laminadas en frío.

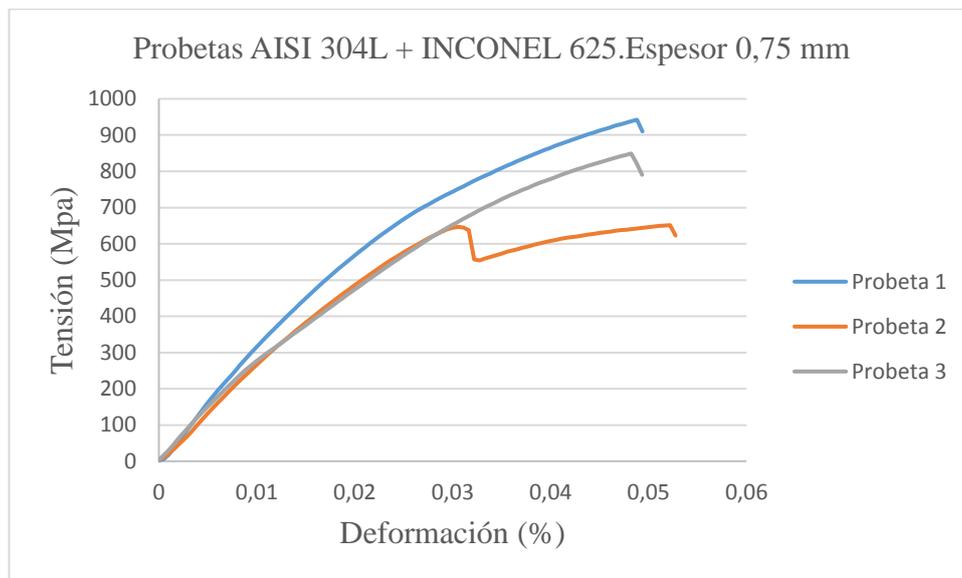


Figura 39. Curvas tensión – deformación del ensayo de tracción de las probetas de e=0.75 mm

Soldadura 304L + Inconel 625 con atmósfera inerte de Argón. Espesor 0.75 mm				
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	MEDIA
$\sigma_{max}$ (MPa)	921.2	634.4	827.3	<b>794.3</b>
LE (MPa)	678.4	460.2	632.5	<b>590.4</b>

Tabla 12. Recopilación de las tensiones de rotura y los límites elásticos. Probetas de e=0.75mm

### Soldadura de AISI 304L + Inconel 625 con atmósfera inerte de Argón. Espesor 0.65 mm

Se representa en la figura 40 la curva tensión – deformación de las tres probetas de 1,5 mm. Registrando los valores de la tensión máxima y límite elástico en la tabla 13. Recordar que estas probetas no han sido laminadas en frío.

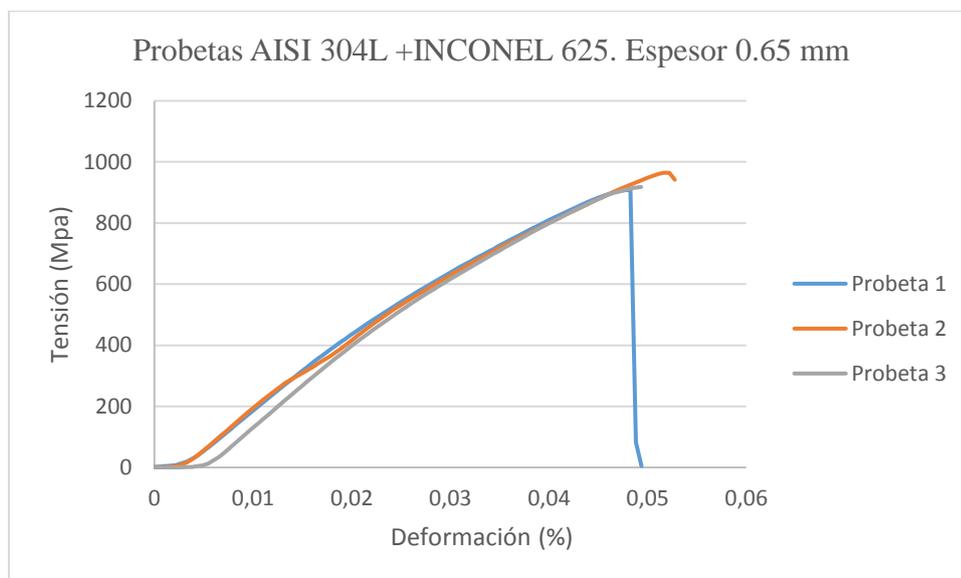


Figura 40. Curvas tensión – deformación del ensayo de tracción de las probetas de e=0.65 mm

Soldadura 304L + Inconel 625 con atmósfera inerte de Argón. Espesor 0.65 mm				
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	MEDIA
$\sigma_{max}$ (MPa)	913.1	964.4	918.1	<b>931.9</b>
LE (MPa)	457.4	496.1	462.1	<b>471.9</b>

Tabla 13. Recopilación de las tensiones de rotura y los límites elásticos. Probetas de e=0.65mm

## 9.2 Resultados del ensayo de corrosión por picaduras

Como comentábamos en el apartado 8.4, preparación del ensayo de corrosión por picaduras bajo Cloruro Férrico ( $\text{Fe Cl}_3$ ). El objeto de este proyecto es el estudio de la corrosión bajo tensión, por tanto se han laminado las probetas obteniendo cuatro espesores diferentes, en los cuales se han generado tensiones residuales en el material por la deformación en frío del mismo (deformación del grano) y otra probeta del espesor inicial la cual solo sufre los efectos de la corrosión.

La relación entre el grado de corrosión de las probetas tras la inmersión en cloruro férrico, puede observarse en la siguiente gráfica a partir del nº de picaduras:

Aporte	Espesor	Nº de picaduras
Inconel 625	1,5	88
Inconel 625	1,25	102
Inconel 625	1	115
Inconel 625	0,75	145
Inconel 625	0,65	163

Tabla 13. Picaduras obtenidas tras el ensayo de corrosión

El recuento de las picaduras se ha realizado mediante un **microscopio Olympus B061**. Dividiéndose el área de estudio de la probeta en distintas secciones, lo que permitía obtener un recuento total lo más preciso posible

Destacar que en las probetas de mayor espesor se encuentra un mayor número de picaduras, pero estas son de muy poco diámetro y sin apenas profundidad. En cambio a medida que disminuye el espesor por la laminación, se empiezan a generar pequeños hoyos hasta llegar a orificios de un tamaño considerable. La equivalencia de estos orificios a picaduras se obtiene en función de su área mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Nº de picaduras} = \frac{\emptyset^2}{0.5^2}$$

[Ec. 7]

Siendo:

$\emptyset$ =El área ocupada por el orificio pasante

### 9.2.1. Corrosión por diferencia de peso

Se ha procedido a pesar las piezas previamente a su inmersión en Cloruro Férrico ( $FeCl_3$ ) y tras las 72 horas de exposición. Obteniendo estos resultados:

Aporte	Espesor	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Diferencia (g)	Media diferencia (g)
Inconel 625	1,5	8,106	7,947	0,159	0,1865
Inconel 625	1,5	8,102	7,888	0,214	
Inconel 625	1,25	7,227	6,991	0,236	0,217
Inconel 625	1,25	7,388	7,19	0,198	
Inconel 625	1	6,181	5,973	0,208	0,198
Inconel 625	1	6,51	6,322	0,188	
Inconel 625	0,75	4,628	4,344	0,284	0,268
Inconel 625	0,75	4,903	4,651	0,252	
Inconel 625	0,65	4,945	4,609	0,336	0,3895
Inconel 625	0,65	4,585	4,142	0,443	

Tabla 14. Resultados obtenidos tras el ensayo de corrosión por diferencia de peso

### 9.3. Conclusiones soldadura acero inoxidable 304 L con varilla INCONEL 625 frente a corrosión bajo tensión.

Tal como ocurre en el otro caso de estudio, se demuestra en las probetas ensayadas la **influencia de los esfuerzos tensiles producidos por el laminado en frio sobre esta soldadura heterogénea de aleaciones austeníticas**, dicho fenomeno aporta al material mayor resistencia, dureza y mejor acabado superficial aunque reduce su fluencia, ductilidad y capacidad de soportar altas temperaturas. Por tanto, **destacar que se produce un aumento de la resistencia a tracción y del límite elástico lineal según las piezas se laminan**, por el contrario en este caso la **reducción de la deformación o ductilidad no es tan acusada**. Esto es por la influencia del niobio que contiene esta aleación el cual afina el tamaño del grano y confiere una mayor ductilidad, permitiendo que sus propiedades mecánicas no se vean tan afectadas.

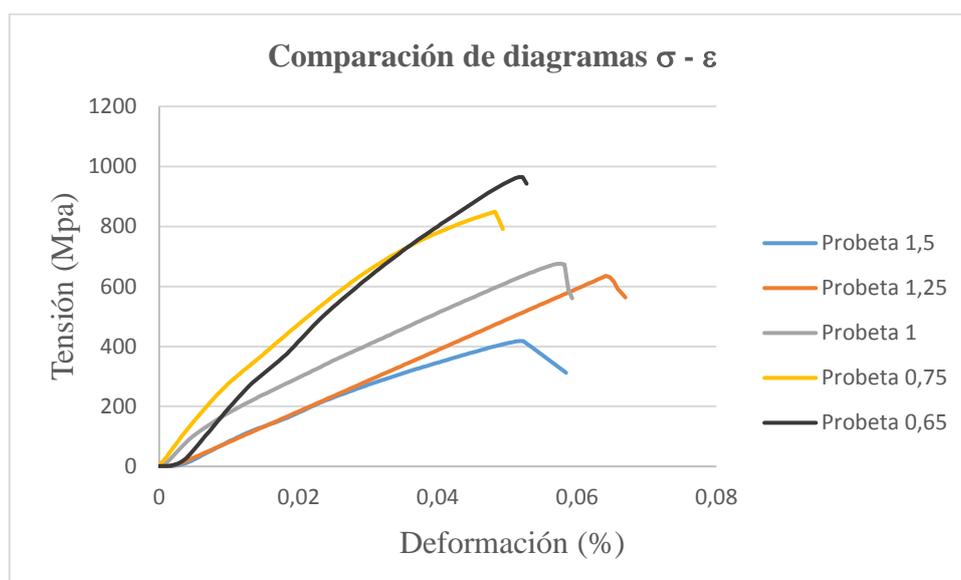


Figura 40. Curvas de tensión – deformación de probetas laminadas desde un espesor de 1,50 mm

El Inconel 625 es un acero de aleaciones austeníticas de base **níquel-cromo**, resistente a la corrosión acuosa, a la oxidación y a picadura en agua de mar. **Por dicho motivo en los ensayos de corrosión húmeda y por diferencia de peso sale mejor parado que las probetas con AISI 308L.**

Comportamiento de la soldadura TIG en acero inoxidable 304L con varilla 308L e Inconel 625 frente a corrosión bajo tensión.

## 10. TABULACIÓN GENERAL DE DATOS

### 10.1. SOLDADURA DE ACERO AISI 304L CON METAL DE APORTE AISI 308L Y ATMÓSFERA INERTE DE ARGÓN

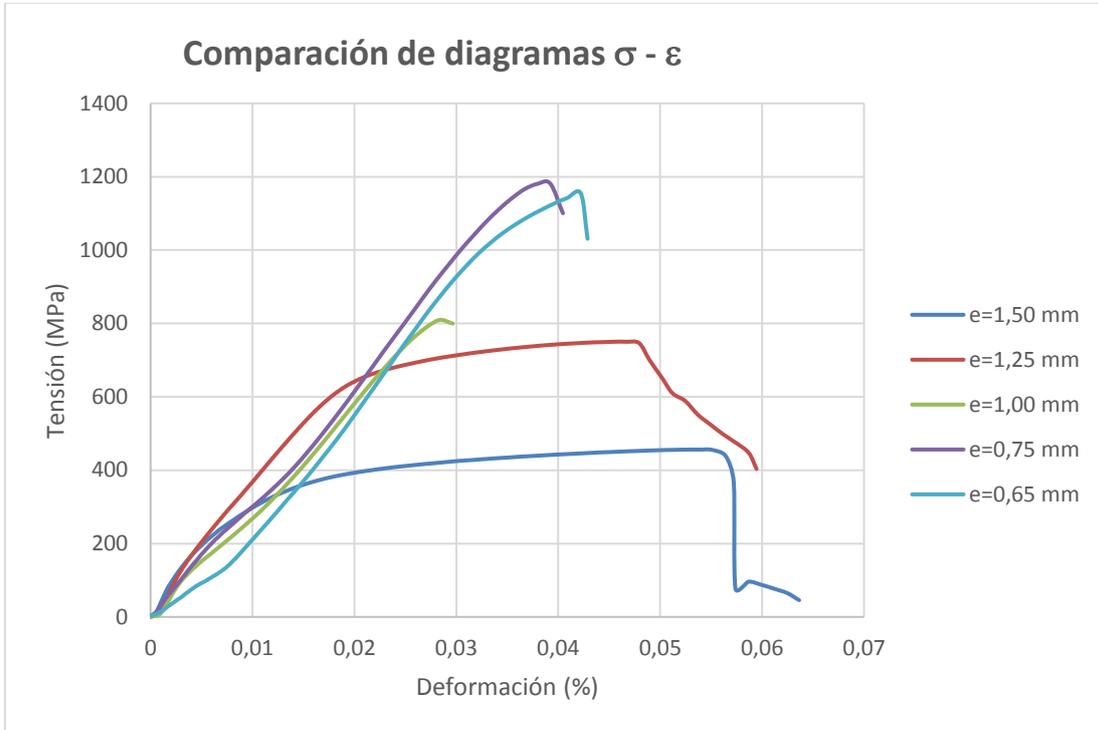
10.1.1. Resultados del ensayo de corrosión por picaduras:

Aporte	Espesor	Nº de picaduras
Aisi 308L	1,5	<b>140</b>
Aisi 308L	1,25	<b>145</b>
Aisi 308L	1	<b>162,5</b>
Aisi 308L	0,75	<b>172</b>
Aisi 308L	0,65	<b>184</b>

10.1.2. Corrosión por diferencia de peso:

Aporte	Espesor	Peso Inicial (g)	Peso final (g)	Diferencia (g)	Media diferencia (g)
Aisi 308L	1,5	8,585	8,408	0,177	0,1955
Aisi 308L	1,5	8,431	8,217	0,214	
Aisi 308L	1,25	7,377	7,175	0,202	0,2335
Aisi 308L	1,25	7,564	7,299	0,265	
Aisi 308L	1	5,392	5,086	0,306	0,3325
Aisi 308L	1	6,388	6,029	0,359	
Aisi 308L	0,75	5,132	4,79	0,342	0,3835
Aisi 308L	0,75	4,648	4,223	0,425	
Aisi 308L	0,65	3,886	3,424	0,462	0,4645
Aisi 308L	0,65	3,703	3,236	0,467	

10.1.3. Curvas de tensión – deformación de probetas laminadas desde un espesor de 1,50 mm:



## 10.2. SOLDADURA DE ACERO AISI 304L CON METAL DE APORTE INCONEL625 Y ATMÓSFERA INERTE DE ARGÓN

### 10.2.1. Resultados del ensayo de corrosión por picaduras:

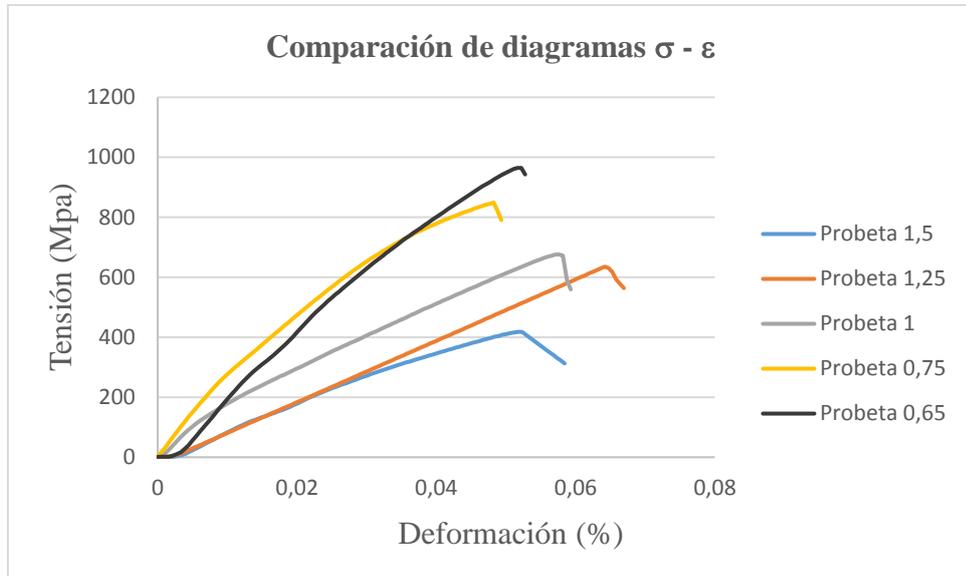
Aporte	Espesor	Nº de picaduras
Inconel 625	1,5	88
Inconel 625	1,25	102
Inconel 625	1	115
Inconel 625	0,75	145
Inconel 625	0,65	163

### 10.2.2. Corrosión por diferencia de peso:

Aporte	Espesor	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Diferencia (g)	Media diferencia (g)
Inconel 625	1,5	8,106	7,947	0,159	0,1865
Inconel 625	1,5	8,102	7,888	0,214	
Inconel 625	1,25	7,227	6,991	0,236	0,217
Inconel 625	1,25	7,388	7,19	0,198	
Inconel 625	1	6,181	5,973	0,208	0,198
Inconel 625	1	6,51	6,322	0,188	
Inconel 625	0,75	4,628	4,344	0,284	0,268
Inconel 625	0,75	4,903	4,651	0,252	
Inconel 625	0,65	4,945	4,609	0,336	0,3895
Inconel 625	0,65	4,585	4,142	0,443	

Comportamiento de la soldadura TIG en acero inoxidable 304L con varilla 308L e Inconel 625 frente a corrosión bajo tensión.

### 10.2.3. Curvas de tensión – deformación de probetas laminadas desde un espesor de 1,50 mm:



## 11. CONCLUSIONES

En este proyecto se ha llevado a cabo en las probetas ensayadas la **determinación del comportamiento frente a corrosión bajo esfuerzos tensiles producidos por el laminado en frio sobre el acero austenítico.**

Dichos esfuerzos tensiles en espesores tan bajos crean una deformación plástica, es decir irreversible, la cual aporta esfuerzos residuales de compresión en las superficies de la probeta y esfuerzos de tensión en el centro. Esto junto a las tensiones residuales debido a la soldadura, tensión térmica de expansión y contracción, produce que las propiedades del metal varíen.

Estos cambios producen en el acero austenítico mayor resistencia, dureza y mejor acabado superficial aunque reducen su fluencia, ductilidad y capacidad de soportar altas temperaturas.

Produciendo que en los ensayos de tracción **según se reduce el espesor** se produzca un cambio de tendencia en las curvas tensión-deformación pasando de tener curvas dúctiles a curvas frágiles. Así como un aumento de la tensión de rotura, del límite elástico y una disminución de la deformación.

Tanto en los ensayos de corrosión por picaduras como en los ensayos por diferencia de peso se refleja que dichos cambios de propiedades influyen negativamente cuando las piezas se someten a corrosión. Es decir según se reduce el espesor más afecta la corrosión, debido a que el metal tiene alteradas sus propiedades mecánicas y una vez la capa de pasividad desaparece se producen más picaduras y de mayor tamaño.

Analizados todos estos factores, cabe realizar una comparación entre los dos metales utilizados como aporte.

El acero **AISI 308L** es un metal que mejora el metal base AISI 304L, aun así no aporta la misma capacidad de corrosión ni de propiedades al acero que el INCONEL 625.

En las curvas de las gráficas de tracción AISI 304L + AISI 308L se ha visto un mayor cambio de la tendencia de las curvas de dúctil a frágil, así como un mayor impacto en los ensayos de corrosión por picaduras y por diferencia de peso.

Por tanto la soldadura **AISI 304L + AISI 308L**, será más aconsejable para aplicaciones industriales en ambientes de corrosión moderado-alto pero no para ambientes marinos. Recordar que dicho material de aporte posee elementos de adición como Ni, Mo, Si y Mn. Lo que permitirá su uso en aplicaciones a alta temperatura.

El metal de aportación **INCONEL 625** es una aleación Níquel-Cromo con refuerzos de Molibdeno y Niobio. Destacar que dichos elementos aportan una gran dureza al material así como una extraordinaria resistencia a la corrosión y permiten temperaturas de servicio hasta los 982°C.

Su resistencia a la corrosión se ha visto menos afectada en el ensayo de corrosión por picaduras y por diferencia de peso que la otra muestra de estudio. Y la adición de Niobio además de refinar el grano, mejora la resistencia máxima a la tracción es por ello que sus propiedades no se han visto tan afectadas en el ensayo de tracción manteniendo una tendencia más similar en todas las probetas ensayadas.

Por tanto la soldadura **AISI 304L + INCONEL 625** será más adecuada para ambientes de corrosión altos o marinos y aplicaciones industriales tales como plataformas de extracción de petróleo o construcción naval.



**CAPÍTULO 2**  
**PLIEGO DE CONDICIONES**

## 1. PLIEGO DE CONDICIONES GENERALES

El presente pliego de condiciones forma parte de la documentación del proyecto que se está ejecutando,

La descripción del proyecto y toda la información necesaria para su ejecución se encuentra en la memoria.

Todos los trabajos realizados han sido tutelados por el encargado del proyecto.

Todo el material ha sido aportado por la Universidad Politécnica de Valencia.

El alcance de este proyecto es a nivel académico.

## 2. PLIEGO DE PRESCRIPCIONES TECNICAS PARTICULARES.

### 2.1. Especificaciones de materiales y equipos.

- *Equipo de soldadura: Soldadura TIG Fronius Transtig 1700*  
Características:

Corriente de soldadura/ Ciclo de trabajo [10min/40°C]	170A / 35%
Corriente de soldadura/ Ciclo de trabajo [10min/40°C]	130A / 60%
Corriente de soldadura/ Ciclo de trabajo [10min/40°C]	100A / 100%
Tensión de trabajo	10,1V - 26V
Tensión en circuito abierto	88,0 V
Frecuencia principal	50-60Hz
Tensión principal	230V
Fusible principal	16A
Dimensión / anchura	180,0 mm
Dimensiones / profundidad	485,0 mm
Peso	15,0 kg
Tipo de protección	IP23

Comportamiento de la soldadura TIG en acero inoxidable 304L con varilla 308L e Inconel 625 frente a corrosión bajo tensión.

- *Pantalla protectora para soldadura*
- *Radial*
- *Discos para desbaste*
- *Cizalladora manual*
- *Botella de gas Argón*
- *Pletina de 180 mm x 100 mm acero inoxidable 304L*
- *Varilla acero inoxidable 308L*
- *Varilla aleación Inconel 625*
- *Piqueta soldadura*
- *Base soldadura*
- *Sargento apriete*
- *Gelatina decapante para acero inoxidable XDG HALCOM*
- *Máquina Soldadura TIG Fronius Transtig 1700*
- *Laminadora JD70 MAQUIJOY*
- *1 litro Fe Cl<sub>3</sub> (20%)*
- *Microscopio Olympus B061*
- *Balanza de precisión EW*
- *Máquina tracción INSTRON 4204*

## **2.2. Especificaciones de ejecución equipo de Soldadura TIG Fronius Transtig 1700**

### **Alimentación**

El proceso de soldadura puede realizarse en dos tipos de corriente diferentes. En corriente alterna en el cual se alimenta mediante un transformador o de corriente continua si se acopla un rectificador al generador. En este estudio se realizará en corriente continua.

### **Parámetros de soldeo**

Intensidad	48 amperios
Potencia	94 voltios
Botella de gas argón	9 l/min Argón 8 l/min CO <sub>2</sub>
Tiempo estimado de soldadura por pieza	4':40''

### **Posición del electrodo y Movimiento de avance**

La soldadura se realizará en un plano horizontal por lo que el electrodo deberá tener una inclinación en torno a los 60° y 70°, la distancia respecto a la pieza a soldar deberá ser la suficiente para que se mantenga el arco eléctrico.

La soldadura debe realizarse mediante un movimiento rectilíneo, a una velocidad constante que evite sobrecalentar el material mientras se aporta la varilla de aporte. El cordón completo debe de tratar de realizarse de una sola pasada.

Por último se retirará la escoria con una piqueta.

Comportamiento de la soldadura TIG en acero inoxidable 304L con varilla 308L e Inconel 625 frente a corrosión bajo tensión.

### **3. NORMATIVA EMPLEADA**

**AENOR. 2004. UNE-EN ISO 15607:2003.** Especificación y cualificación de procedimientos de soldeo para los materiales metálicos. Reglas generales.

**AENOR. 2011. UNE-EN ISO 6947:2011.** Soldaduras. Posiciones de trabajo. Definición de los ángulos de pendiente y de rotación.

**AENOR. 2005. UNE-EN ISO 15609-1:2004.** Especificación y cualificación de procedimientos de soldeo para los materiales metálicos. Especificación del procedimiento de soldeo. Parte 1: Soldeo por arco.

**AENOR. 2005. UNE-EN ISO 15614-1:2004.** Especificación y cualificación de procedimientos de soldeo para materiales metálicos. Ensayo del procedimiento de soldeo. Parte 1: Soldeo por arco y con gas de aceros y soldeo por arco de níquel y sus aleaciones

**AENOR.2014. UNE-EN ISO 9692-1:2014** Soldeo y procesos afines. Tipos de preparación de uniones. Parte 1: Soldeo por arco con electrodos revestidos, soldeo por arco protegido con gas y electrodo de aporte, soldeo por llama, soldeo por arco con gas inerte y electrodo de wolframio y soldeo por haz de alta energía de aceros.

**AENOR. 2012. UNE-EN 15949:2012.** Seguridad de las máquinas. Requisitos de seguridad para trenes de laminado, laminadoras de acero estructural y laminadoras de alambroón.

**AENOR. 2015. UNE-EN ISO 8044:2015.** Corrosión de metales y aleaciones. Términos principales y definiciones.

**AENOR. 2014. UNE-EN ISO 8407:2014.** Corrosión de los metales y aleaciones. Eliminación de los productos de corrosión sobre las probetas de ensayo de corrosión.

**AENOR. 2018. UNE-EN ISO 9017:2018.** Ensayos destructivos de soldaduras de materiales metálicos. Ensayo de rotura.

**AENOR. 2017. UNE-EN ISO 6892-1:2017.** Materiales metálicos. Ensayo de tracción. Parte 1: Método de ensayo a temperatura ambiente. (ISO 6892-1:2016).



**CAPÍTULO 3**  
**PRESUPUESTO**

## 1. INTRODUCCIÓN

Este presupuesto engloba el coste total del presente proyecto. El cual va a proceder a desglosarse en materiales, proceso de soldeo, procesos de mecanizado y ensayos de las probetas soldadas. Los costes son estimados según precios de catálogos industriales.

## 2. CUADROS DE PRECIOS

<b>A. MATERIALES</b>					
<i>Ref.</i>	<i>Descripción</i>	<i>Ud.</i>	<i>Cant.</i>	<i>Precio (€)</i>	<i>Precio Total (€)</i>
A.1.	Placas de acero AISI 304L de dimensiones 180x75x1,5 mm	-	12	3,5	42
A.3.	Varillas de acero AISI 308L longitud 50mm, diámetro 1,5 mm	-	5	2,5	12.5
A.5.	Varillas de acero AISI Inconel 625 longitud 50mm, diámetro 1,5 mm	-	5	3	15
A.6.	Ácido cloruro férrico al 10%	Litro	1	11	11
<b>TOTAL A.</b>					<b>80.5 €</b>

<b>B. PROCESO DE SOLDEO</b>	
<i>Ref.</i>	<i>Descripción</i>
B.1.	Soldadura realizada mediante el procedimiento TIG (en atmósfera inerte de argón) con varillas de aporte de acero AISI 308L. Se suelda un total de 6 placas de acero AISI 304L.

<i>Ref.</i>	<i>Descripción</i>	<i>Ud.</i>	<i>Cant.</i>	<i>Precio [€/Ud]</i>	<i>Precio Total (€)</i>
B.1.1.	Energía consumida por proceso B.1.	KWh	0.896	0,15	0,1344
B.1.2.	Mano de obra soldadura	h	2	25	50
B.1.3.	Gas Argón	L	280	0,1	28
<b>TOTAL B.</b>					<b>78.13 €</b>

Comportamiento de la soldadura TIG en acero inoxidable 304L con varilla 308L e Inconel 625 frente a corrosión bajo tensión.

<b>B. PROCESO DE SOLDEO</b>					
<i>Ref.</i>	<i>Descripción</i>				
B.2.	Soldadura realizada mediante el procedimiento TIG (en atmósfera inerte de argón) con varillas de aporte INCONEL 625. Se suelda un total de 6 placas de acero AISI 304L.				
<i>Ref.</i>	<i>Descripción</i>	<i>Ud.</i>	<i>Cant.</i>	<i>Precio/Ud (€)</i>	<i>Precio Total (€)</i>
B.2.1.	Energía consumida por proceso B.2.	KW	0,896	0,15	0,1344
B.2.2.	Mano de obra soldadura	h	2	25	50
<b>TOTAL B.2.</b>					<b>50.13 €</b>

<b>C. PROCESOS DE MECANIZADO Y ENSAYOS</b>						
<i>Ref.</i>	<i>Descripción</i>	<i>Nº piezas</i>	<i>Tiempo (min.)</i>		<i>Precio operador-máquina [€/h]</i>	<i>Precio Total (€)</i>
			<i>Tiempo por pieza</i>	<i>Total</i>		
C.1.	Proceso de desbaste y pulido de placa soldada con radial	12	15	180	30	90
C.2.	Proceso de corte de una placa en 10 probetas de dimensiones de 80x20x1,5 mm mediante cizalla	50	3	150	25	62.5
C.3.	Proceso de laminado de las probetas	40	6	240	40	160
C.4.	Realización de ensayos de tracción con la máquina universal de ensayos	30	5	150	50	125
C.5.	Proceso de pesado en báscula de precisión antes y después de corrosión	20	2	40	40	26.6
C.6.	Proceso de corrosión por picaduras	20	2	40	20	13.3
<b>TOTAL D.</b>					<b>477.4 €</b>	

### 3. RESUMEN PRESUPUESTO TOTAL

<i>Descripción</i>	<i>Coste Total [€]</i>
<b>A. MATERIALES</b>	<b>80.5</b>
<b>B. PROCESOS DE SOLDEO</b>	<b>128.26</b>
<b>C. PROCESOS DE MECANIZADO Y ENSAYOS</b>	<b>477.4</b>
<b>TOTAL PRESUPUESTO</b>	<b>686.16 €</b>

El presente proyecto asciende a la cantidad de seiscientos ochenta y seis euros con dieciséis céntimos.



**CAPÍTULO 4**  
**BIBLIOGRAFÍA**

## 1. BIBLIOGRAFÍA

### Libros

- “ACEROS INOXIDABLES Y ACEROS RESISTENTES AL CALOR”  
Adrian Inchaurreza Zabala
- “SOLDADURA DE LOS ACEROS, APLICACIONES”  
Manuel Reina Gomez.
- “CORROSIONES METÁLICAS”  
U. R. EVANS
- “LECCIONES DE CORROSIÓN ELECTROQUÍMICA”  
José Apraiz Barreiro

### Internet

- <http://blog.utp.edu.co/metalografia/7-aceros-inoxidables/>
- <https://www.solysol.com.es/data/documents/Soldabilidad=20Inox.pdf>
- <http://www.uniweld.com.br/espanhol/tipos-de-electrodos.html>
- <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn47.html>
- <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn48.html>
- **Figura 4.** <http://luisportillaeafe.blogspot.com/2016/05/10-practicas-de-regulacion-de-equipo.html>
- **Figura 8.** <http://isfime.blogspot.com/p/tig.html>

Comportamiento de la soldadura TIG en acero inoxidable 304L con varilla 308L e Inconel 625 frente a corrosión bajo tensión.

- **Figura 9.** <https://sites.google.com/site/procesosdemanufacturaetitc/tipos-de-procesos/proceso-de-soldadura>
- **Figura 11.** <https://www.pinterest.es/pin/665969863622428504/>
- **Figura 14.** <http://blog.utp.edu.co/metalografia/7-aceros-inoxidables/>
- **Figura 24.** <http://facingyconst.blogspot.com/2009/03/traccion-en-metales.html>